

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

Ľahká kryptografia vo VPN sieťach

Diplomová práca

2023

Bc. Marek Roháč

**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 Roháč

Abstrakt v SJ

slovak

Kľúčové slová v SJ

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

Abstrakt v AJ

english

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. 63s. Vedúci práce: prof. Ing. Miloš Drutarovský, CSc.

Tu vložte zadávací list pomocou príkazu
`\thesispec{cesta/k/suboru/so/zadavacim.listom}`
v preamble dokumentu.

Kópiu zadávacieho listu skenujte čiernobielo (v odtieňoch sivej) na 200 až 300
DPI! Nezabudnite do jednej práce vložiť originál zadávacieho listu!

Čestné vyhlásenie

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

Košice, 28. 5. 2023

.....

Vlastnoručný podpis

Podakovanie

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 skratiek	xii
Úvod	1
1 Virtual Private Network – VPN	2
1.1 Výhody a nevýhody VPN sieti	3
1.2 Charakteristika a definovanie pojmov	3
1.2.1 Tunel	3
1.2.2 GRE - Generic Routing Encapsulation	3
1.2.3 IKEv2 Internet Key Exchange version 2	3
1.2.4 Transport Layer Security – TLS	4
1.2.5 Point-to-Point Protocol (PPP)	5
1.2.6 Multiprotocol Label Switching (MPLS)	5
1.2.7 Charakteristika referenčných modelov	5
1.3 Klasifikácia VPN sietí	10
1.3.1 Rozdelenie VPN sieti podľa logickej topológie	10
1.3.2 Rozdelenie VPN sieti podľa vrstiev referenčného modelu . .	13
1.4 Protokoly vo VPN sieťach	15
1.4.1 Point-to-Point Tunneling Protocol (PPTP)	15
1.4.2 Layer 2 Tunneling Protocol (L2TP)	18
1.4.3 Internet Protocol Security (IPSec)	20
1.4.4 Secure Socket Tunneling Protocol (SSTP)	22
1.4.5 Ostatné populárne VPN protokoly	24
1.5 Zhrnutie VPN sieti	25
2 Ľahká kryptografia	26
2.1 clanok	26
2.2 Kryptografický algoritmus XOODOO a variácie	27
2.2.1 XOODOO permutácia	28
2.2.2 Xoodyak	29

2.2.3	Možnosti použitia Xoodoo algoritmu	32
3	Konfigurácia prostredia, metodika testovania a merania	33
3.1	Prostredie virtuálnych strojov pomocou VirtualBox	33
3.2	Zmena sieťových adaptérov	34
3.3	Nástroje použité v obrazoch	35
4	Implementácia jednoduchéj VPN siete	36
4.1	Dead Simple VPN	36
4.2	Kryptografia použitá v DSVPN	38
4.3	Experimentálne overenie VPN	38
4.4	Princíp fungovania programu	41
4.5	Analýza zdrojového kódu DSVPN	41
4.5.1	Súbor charm.h a charm.c	42
4.5.2	Súbor os.h a os.c	42
4.5.3	Súbor vpn.h a vpn.c	43
4.6	Analýza výpočtových nárokov DSVPN	55
5	Vyhodnotenie dosiahnutých výsledkov	56
6	Záver	57
	Literatúra	58
	Zoznam príloh	64
A	Obsah CD Média	65

Zoznam obrázkov

1.1	Ukážka typického VPN pripojenia	2
1.2	vpn fancy obrazok	3
1.3	Prehľad operácií v SSL protokole	4
1.4	https://www.comptia.org/blog/open-systems-interconnection-reference-model - dobrý zdroj na rozšírenie	6
1.5	Schéma TCP/IP modelu s niektorými protokolmi	7
1.6	spoj tento obrazok s nasledujúcim do jedného	8
1.7	spoj tento obrazok s predchádzajúcim do jedného, plus 1.4	9
1.8	11
1.9	potrebne prerobenie nech sa to nepodoba na 1.1 alebo vyhodit/upravit 1.1	12
1.10	rearanzovat	13
1.11	zacomponovat k osi vysvetleniu	14
1.12	potreba upravy iba na spoemnute vrstvy	14
1.13	Architektura PPTP siete - PPTP je az od nas do PS	16
1.14	lepsi obrazok	16
1.15	sede sifrovane biele nie	17
1.16	19
1.17	IPSec transportný režim	21
1.18	IPSec tunelovací režim	21
1.19	Proces enkapsulácie PPP rámcov pomocou protokolov naprieč SSTP protokolom	22
1.20	25
2.1	Grafické znázornenie terminológie v XOODOO	28
2.2	30
3.1	Konektivita jednotlivých sieťových adaptérov	35
4.1	Schéma jednoduchkej VPN	37

4.2	Zistenie IP adres VPN Servera na VM OSS	40
4.3	Zistenie IP adres VPN Klienta na VM OSC	40
4.4	Overenie funkcionality DSVPN pomocou traceroute	41
4.5	Beh DSVPN	47
4.6	Funkcia Doit()	49
4.7	Funkcia uc_encrypt	51

Zoznam zdrojových kódov

4.1	Obsah charm.h	42
4.2	Obsah ZK os.h	43
4.3	Obsah ZK vpn.h	44
4.4	Štruktúra Context	45
4.5	Načítanie zdieľaného kľúča	46
4.6	Premenné funkcie event loop	48
4.7	Spôsob zápisu šifrovaných dát	50
4.8	Šifrovanie správy	52
4.9	Funkcia xor128	53
4.10	Funkcia Permute + makrá	54

Zoznam skratiek

AES Advanced Encryption Standard.

AH Authentication Header.

CHAP Challenge Handshake Authentication Protocol.

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.

IP Internet Protocol.

IPSec Internet Protocol Security.

ISAKMP Internet Security Association and Key Management Protocol.

L Layer.

L2F Layer 2 Forwarding protocol.

L2TP Layer 2 Tunneling Protocol.

LAC L2TP Access Concentrator.

LNS L2TP Network Server.

LTS Long Term Support.

MPLS Multiprotocol Label Switching.

MS-CHAP MicroSoft Challenge Handshake Authentication Protocol.

NAS Network Access Server.

NAT Network Address Translation.

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.

TCP Transmission Control Protocol.

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

TLS Transport Layer Security.

UDP User Datagram Protocol.

VB Virtual Box.

VM Virtual Machine.

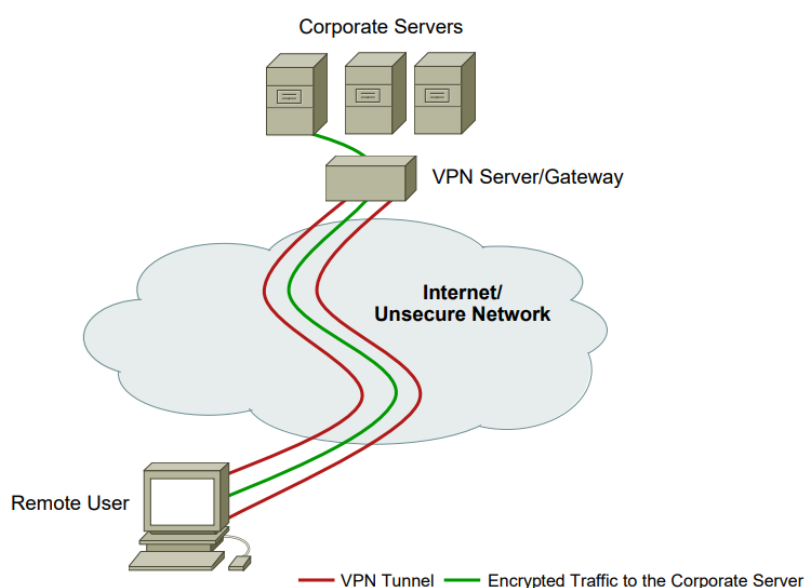
VPN Virtual Private Network.

Úvod

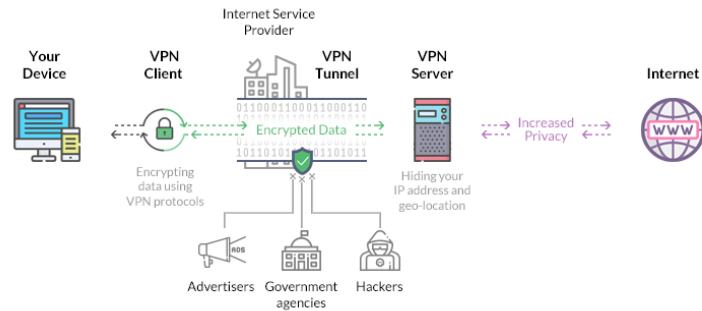
Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilissem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi necante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies-vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero utmetus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit ametante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.VPN [**book**]

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. Táto technológia patrí aktuálne k najpoužívanejším spôsobom pripojenia sa medzi 2 rôznymi internetovými doménami. Najčastejší výskyt je možné sledovať v korporačnom 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 pomocou 1.1 a 1.2.



Obr. 1.1: Ukážka typického VPN pripojenia



Obr. 1.2: vpn fancy obrazok

<https://www.webhostingsecretrevealed.net/blog/security/how-vpn-works/>

1.1 Výhody a nevýhody VPN sieti

neviem ci to bude rozsahovo treba na samostatnu podkapitolu mozno len doplnit informacie do textu zaciatku.

V prípade nestabilného spojenia, je možný vysoký výskyt straty paketov. Dôvodom je použitie TCP protokolu. Takýto problém je vhodné riešiť, tak sa odporúča prejsť na protokol

1.2 Charakteristika a definovanie pojmov

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

1.2.1 Tunel

https://en.wikipedia.org/wiki/Tunneling_protocol

1.2.2 GRE - Generic Routing Encapsulation

?? <https://www.rfc-editor.org/info/rfc1701> <https://www.ietf.org/rfc/rfc1702.txt>

1.2.3 IKEv2 Internet Key Exchange version 2

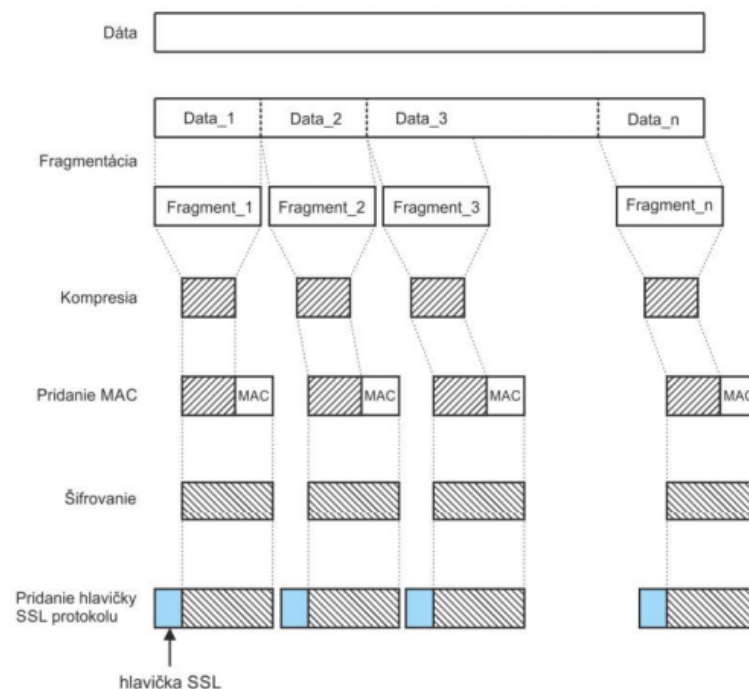
https://en.wikipedia.org/wiki/Internet_Key_Exchange

1.2.4 Transport Layer Security – TLS

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

Zabezpečenie dát bolo prvotne vykonávané pomocou protokolu *Secure Sockets Layer* – SSL. Tento spôsob používa certifikáty na odšifrovanie dát. SSL malo od svojho vytvorenia dlhý vývoj, ktorý smeroval až k doteraz najpoužívanejšiemu TLS vo verzii 1.3. 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.

TLS pracuje niekde na pomedzi aplikačnej a transportnej vrstvy. Spôsob spracovania dát je zobrazený pomocou schémy 1.3 s SSL operáciami, prebratej z [1].



Obr. 1.3: Prehľad operácií v SSL protokole

Viac informácií o TLS protokole, jednotlivých verziách a optimalizáciách je možné nájsť na [2].

viac viac viac

1.2.5 Point-to-Point Protocol (PPP)

https://en.wikipedia.org/wiki/Point-to-Point_Protocol

1.2.6 Multiprotocol Label Switching (MPLS)

MPLS by sme do slovenčiny mohli preložiť ako Multi-protokolové prepínanie štítkov. Samotný protokol pridáva k paketom tzv. MPLS hlavičku. Jej obsahom sú štítky¹, na základe ktorých dochádza k smerovaniu a preposielaniu paketov. Týmto spôsobom nie je nutná ďalšia analýza paketov. Štítky neidentifikujú koncové body, ale virtuálne spojenia medzi viacerými uzlami. Označenie multi-protokolový má, pretože dokáže zapuzdrovať viacero sieťových protokolov. MPLS pracuje na pomedzi L2 a L3 vrstvy. Často sa zvykne označovať ako L2.5 protokol. Viac o tomto protokole je možné si prečítať na [3], [4] a [5].

1.2.7 Charakteristika referenčných modelov

V rámci podkapitoly 1.3.2 je potrebné pred samotnou klasifikáciou vysvetliť pojmy Referenčný model prepojenia otvorených systémov² (ďalej OSI) a Model opisujúci balíky internetových protokolov, známy ako, TCP/IP referenčný model.

Úlohou uvedených referenčných modelov je vizualizácia postupu spracovania dát od používateľa až k ich odoslaniu zo zariadenia³. 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 vrstiev⁴:

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),

¹z ang. *labels*

²z ang. *Open Systems Interconnection reference model*

³z ang. *end-to-end data communication*

⁴z ang. *layer*

6. **prezenčná vrstva** – z ang. *Presentation Layer* (ďalej L6),

7. **aplikačná vrstva** – z ang. *Application Layer* (ďalej L7).

V schéme 1.4 sa nachádzajú stručne opísané jednotlivé činnosti vrstiev.

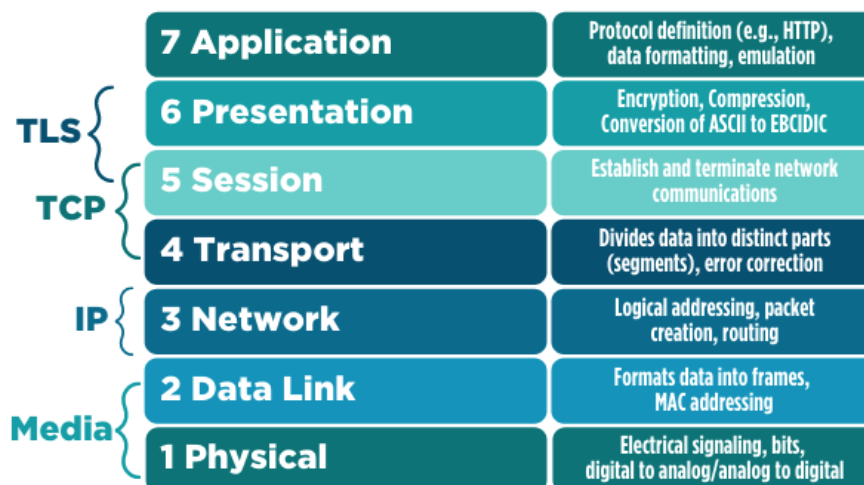


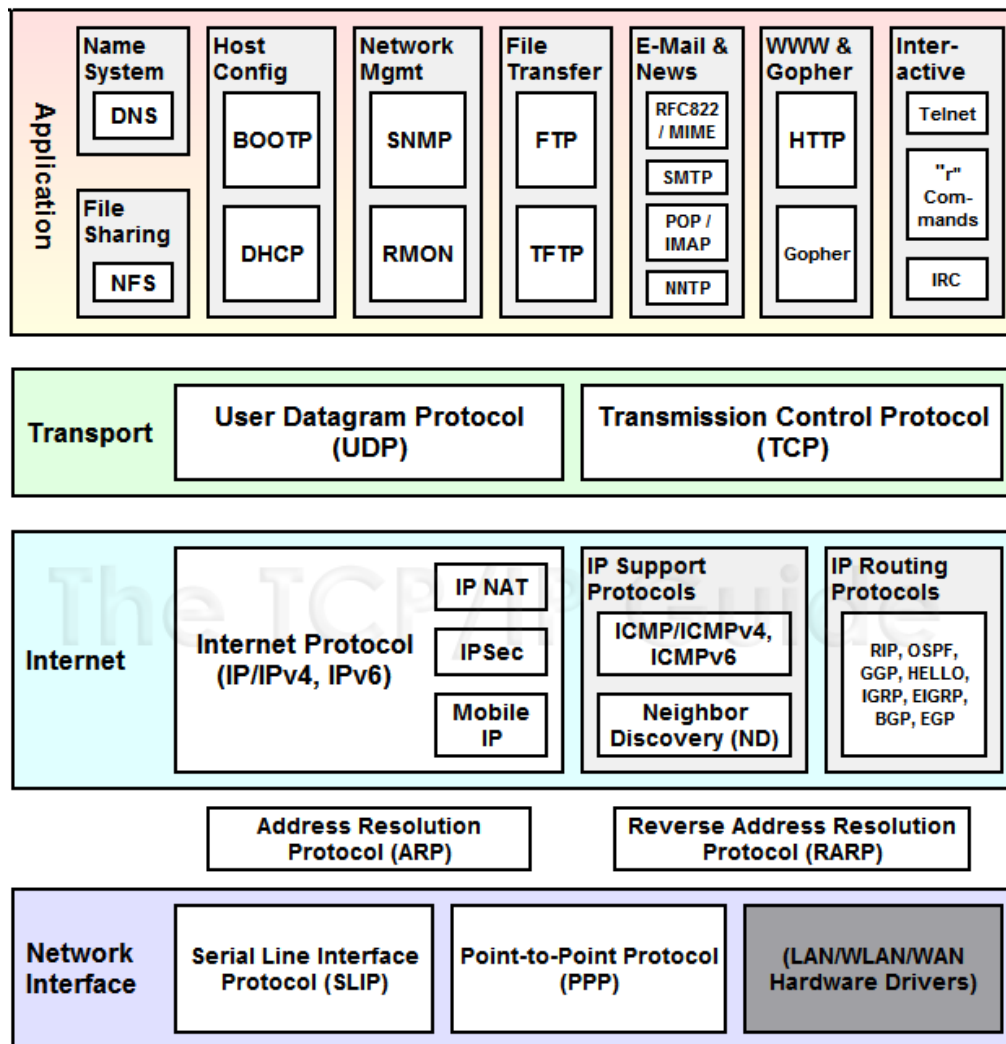
Figure 2: Mapping protocols and procedures to the OSI/RM

Obr. 1.4: <https://www.comptia.org/blog/open-systems-interconnection-reference-model> - dobrý zdroj na rozšírenie

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 TCP/IP novším modelom. Viac informácií o problematike nájde čitateľ v [osi].

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 vrstvy [tcpip]. TCP/IP model je zobrazený pomocou schémy 1.5. V uvedenej schéme sú znázornené aj niektoré z protokolov, ktoré sa na jednotlivých vrstvách používajú.

Aplikačná vrstva (L5-7) 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**.



Obr. 1.5: Schéma TCP/IP modelu s niektorými protokolmi

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:

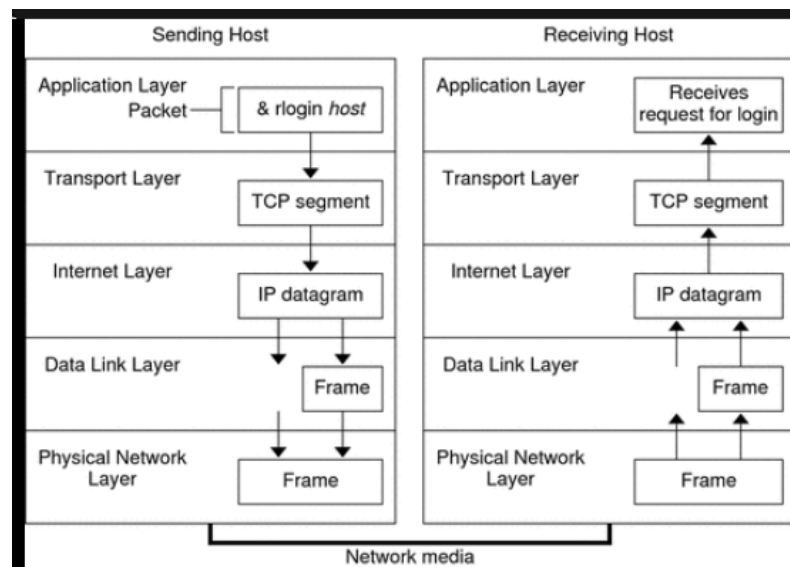
- riadenie chýb – z ang. *error control* [ec],
- segmentáciu dát – z ang. *segmentation* [sd],
- riadenie toku dát – z ang. *flow control* [fc],
- riadenie preťaženia – z ang. *congestion control* [cc],
- adresovanie aplikácií – z ang. *application addressing* [aa].

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 (L2) sa používa na presun paketov medzi rozhraniami internetovej vrstvy dvoch rôznych hostiteľov na rovnakom linku. Procesy vysielania a prijímania paketov na linke je možné konfigurovať. Zariadenia nazývané prepínače⁵, vykonávajú rámcovania⁶. Pripravujú pakety z L3 vrstvy 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 prenášané. Napríklad optický a ethernetový kábel.

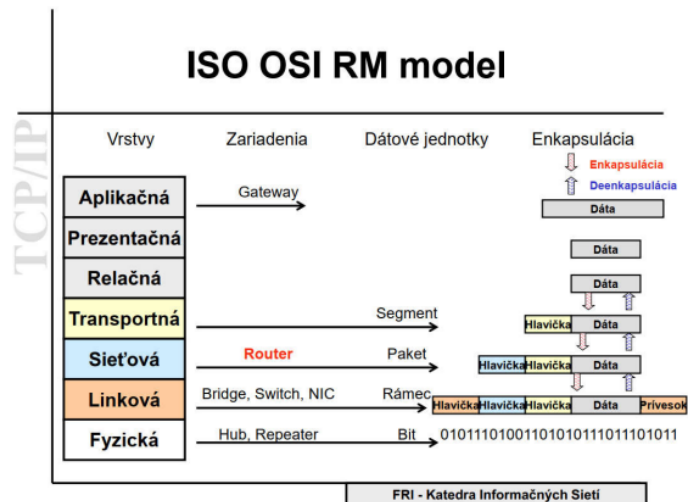
Vyššie uvedené procesy prípravy dát sú znázornené pomocou schémy 1.6 a 1.7.



Obr. 1.6: spoj tento obrazok s nasledujucim do jedneho

⁵z ang. *switch*

⁶z ang. *frame*



Obr. 1.7: spoj tento obrazok s predchadzajucim do jedneho, plus 1.4

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 prijímateľa 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 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 možné TCP protokol implementovať softvérovou aj hardvérovou. 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 koprocessorov umiestnených vo vnútri procesora. Následkom toho môžeme dnes bežne pozorovať umiestnenie spomenutých zariadení na našich zariadeniach.

Podrobnejšie informácie o TCP protokole je možné nájsť na [6]. V uvedenej publikácii sa nachádza opis TCP hlavičky, metódy nadviazania a ukončenia spo-

jenia. Obdobne je spomenuté ako dochádza k prenosu dát pomocou sekvenčných čísel. Ak má používateľ nejasnosti v fungovaní TCP protokolu, odporúča sa danú publikáciu prečítať.

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 celi datagramu.

Narozdiel od TCP) neposkytuje žiadnu záruku 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) protokole nájde čitateľ v [**udp**].

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, použitých protokolov a vrstiev, na ktorých sú postupy aplikované. Obsahom tejto podkapitoly je rozdelenie a opis jednotlivých typov VPN sietí. V závere kapitoly čitateľ nájde sumárne rozdelenie VPN sietí v tejto práci, znázornené pomocou schémy.

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*.

VPN rovný s rovným

Uvedený spôsob vytvára zabezpečený tunel medzi dvoma rovnocennými uzlami, resp. zariadeniami⁷, ktorý spoločne komunikujú cez verejnú sieť. Medzi zariadeniami je vytvorený tunel. Každý koniec má priradenú svoju IP adresu. Z uvedeného modelu vyplýva aj následná limitácia. VPN tunel vznikne iba medzi dvoma komunikujúcimi zariadeniami. Z toho dôvodu nie je toto použitie časté. Na obrázku 1.8 je znázornený uvedený typ VPN spojenia.



Figure 1: Peer to Peer VPN

Obr. 1.8

VPN Klient a Server

Tento typ spojenia pozostáva z pripojenia medzi nerovnocennými dvoma alebo viacerými 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 však možné vytvoriť $1 : N$ takýchto spojení. N reprezentuje počet VPN klientov, resp. pripojení, ktorý VPN Server dokáže nadviazať. 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 trafiky cez sieťovú bránu⁸ (ďalej GW). V danom OS, na ktorom VPN klient beží, je teda potrebné zmeniť IP adresu GW na adresu VPN servera. Vďaka tomu nastane presmerovania komunikácie. Tento úkon je väčšinou realizovaný programovo pomocou aplikácií. Typicky nastolia spojenie medzi Klientom a Serverom. Následne upravujú sieťové nastavenia systému. Spomenuté úkony sú vysoko závislé od OS a daného programovacieho jazyka, pro-

⁷ z ang. *peers*

⁸ z ang. *GateWay*

stredníctvom 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. Teda spracúva požiadavky Klienta a komunikuje s ostatnými zariadeniami. Komunikácia ďalej však už nie je zabezpečená pomocou šifrovania alebo tunelu. Tento fakt je znázornený na obrázku 1.9.

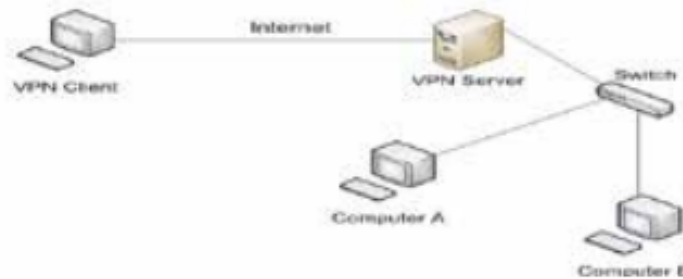


Figure 2: Client to server VPN

Obr. 1.9: potrebné prerobenie nech sa to nepodoba na 1.1 alebo vyhodit/upraviť 1.1

V súčasnosti je tento spôsob považovaný za najviac používaný v oblasti korporátneho sveta. 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*. Obidva pojmy sú správne a predstavujú rovnakú myšlienku zapojenia VPN.

Sieť so Sieťou VPN

VPN model Sieť so Sieťou vytvára zabezpečený tunel medzi dvoma rôznymi sieťami naprieč verejnou sieťou. Model pozostáva z 2 zariadení – VPN servera a VPN Koncentrátora⁹.

VPN Koncentrátor je typ sieťového zariadenia, ktoré poskytuje zabezpečené VPN spojenie a doručenie dát. Zvyčajne je to špecializovaný smerovač¹⁰. Dokáže vytvárať veľké množstvo VPN tunelov. Používa sa na nastolenie VPN modelu sieť so sieťou. Funkcionalita koncentrátora pozostáva z:

- nastolenie a konfiguráciu VPN tunela – z ang. *Establish and Configure tunnels*,
- autentizáciu používateľa– z ang. *Authenticate users*,

⁹z ang. *VPN Concentrator*

¹⁰z ang. *router*

- 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 pri spojení vedľajšej pobočky s hlavnou, ktoré sa nachádzajú na rozdielnych geografických lokalitách. Pomocou schémy 1.10 je znázornený tento model.

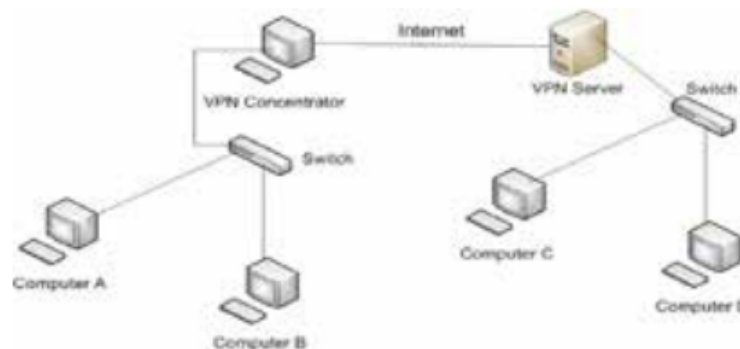


Figure 3: site to site VPN

Obr. 1.10: rearanzovat

Informácia z tejto podkapitoly boli čerpané z [7].

1.3.2 Rozdelenie VPN sietí podľa vrstiev referenčného modelu

VPN siete môžeme klasifikovať podľa vrstvy (ďalej L) referenčného modelu, na ktorej dochádza k šifrovaniu dát. Stručná charakteristika referenčných modelov je obsahom podkapitoly 1.2.7.

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 implementácii VPN komunikácie medzi zariadeniami je pre pochopenie dôležité určiť aké dáta vstupujú do šifrovacieho algoritmu. Pomocou tejto informácie a klasifikácie vyššie následne dokážeme zaradiť do určitej kategórie. Na schéme 1.11 je možné si všimnúť aké dáta sú výstupom jednotlivých vrstiev. (spoj dva obrázky do jedného netreba zbytočne dva)

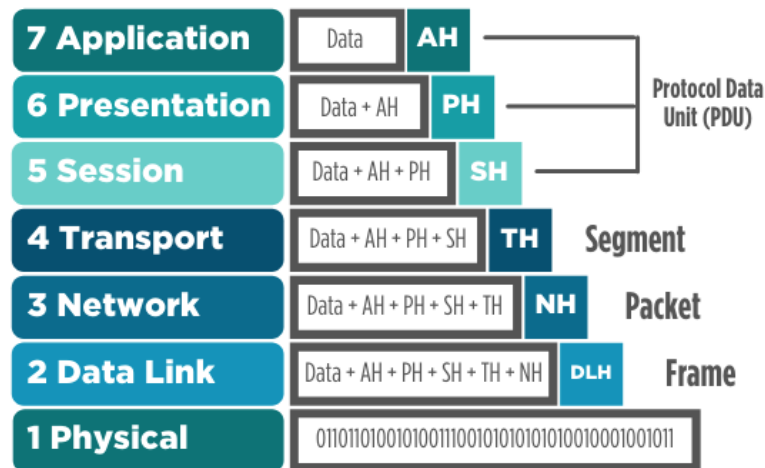
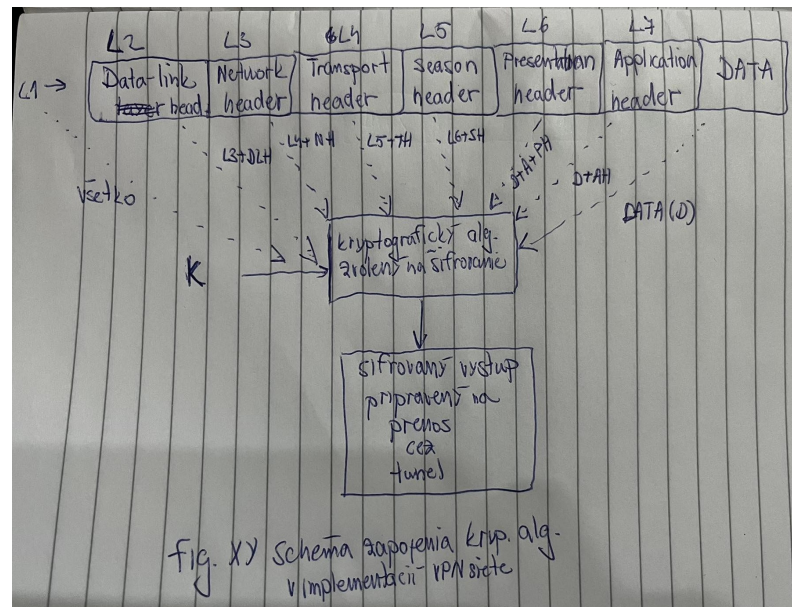


Figure 3: How the OSI/RM is used to model the creation of network packets

Obr. 1.11: zakomponovat k osi vysvetleniu



Obr. 1.12: potreba upravy iba na spoemnute vrstvy

Princíp použitia bloku na šifrovanie je znázornený pomocou schémy 1.12.

Zo schémy je viditeľné, že spracovaním nižšej vrstvy dochádza k zväčšeniu bloku dát, ktoré je potrebné šifrovať. To môže negatívne ovplyvniť výslednú rýchlosť celého systému. Okrem uvedenej vlastnosti je ďalším problémom prenos rámcov rôznych sietí. Každé zariadenie, ktoré smeruje dáta by muselo repetitívne šifrovať a dešifrovať čím by v danej implementácii vzniklo viac rizikových miest pre potencionálny útok. Z uvedených dôvodov je preto najrozšírenejší spôsob zapojenia šifrovacieho bloku na pomedzi L3 až L4 vrstvy. Smerovanie ostáva bez zásahu a k dešifrovaniu dochádza až na konečnom zariadení, prípadne v aplikácii na sa-

motných dátach.

Typický sa s L2 a L3 VPN sieťami môže používateľ stretnúť na špecializovaných sieťových zariadeniach. Konkrétne na routroch a switchoch. Prvé z uvedených je využívané najmä pri smerovaní, respektíve určení cesty smerom von z lokálnej siete až k cieľovej destinácii. Tento úkon je vykonaný za pomoci aplikácie smerovacích protokolov. Router je možné použiť aj na smerovanie v rámci lokálnej siete. V porovnaní so switchom však nedosahuje porovnateľný výkon. Na druhej strane klasický switch je možné použiť len v rámci lokálnej siete. V súčasnosti sa používajú aj tzv. L3 switche. V porovnaní s routrom je ich prednosťou vyššia rýchlosť spracovania prichádzajúcich paketov pri väčšom počte pripojených zariadení.

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 zopár protokolov, ktoré sa typicky používajú vo VPN sieťach. Pred začiatkom by som rád čitateľa upozornil, že aktuálne neexistuje svetový štandard na vytváranie VPN spojení. Dôsledkom toho existuje veľké množstvo rôznych protokolov. V rámci tejto podkapitoly si predstavíme niektoré z nich.

1.4.1 Point-to-Point Tunneling Protocol (PPTP)

?nerozumiem?PPTP enables on-demand, virtual private networks over the Internet or other public TCP/IP-based data networks ??

TCP/IP sieťový protokol PPTP poskytuje 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 pakety do IP datagramov. Následne ich prenáša cez sieť. Typicky pozostáva spojenie z 3 zariadení, ktoré sú znázornené na schéme 1.13 a 1.14.

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*,

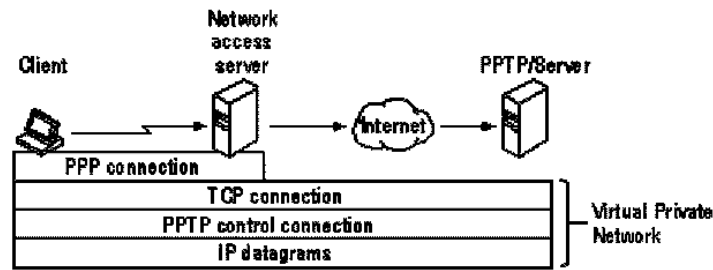
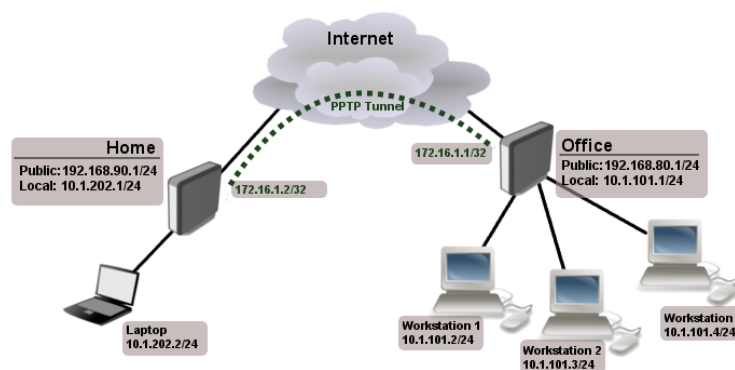


Figure 1. The PPTP tunnel

Obr. 1.13: Architektura PPTP siete - PPTP je az od nas do PS



Obr. 1.14: lepsi obrazok

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 internet¹¹ (ďalej NAS). Používa sa pri tom PPP protokol, ktorý nastolí spojenie a zašifruje pakety. V druhom kroku následne vznikne TCP pripojenie medzi NAT a PPTP serverom. Použitý je port 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 opísaný v 1.2.2. Na schéme 1.15 je znázornená schém PPTP Paketu.

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.

¹¹z ang. *Network Access Server*

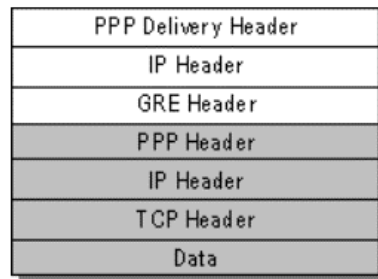


Figure 7. IP datagram containing encrypted PPP packet as created by PPTP

Obr. 1.15: sede sifrovane biele nie

V uvedenom prípade sa nevytvára prvé PPP spojenie až k internetovému poskytovateľovi. Viac informácií o protokole PPTP nájde čitateľ na [8] a [9], ktoré boli zdrojom pri tvorbe tejto podkapitoly.

Bezpečnosť a použitie protokolu

Protokol vznikol v júny 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) [10], *Microsoft Challenge Handshake Authentication Protocol* (MS-CHAP) [11] a *Password Authentication Protocol* (PAP) [12].
- **Kontrolu prístupu** – z ang. *Access Control*, po úspešnej autentizácii 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 [13] 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 definovaný TCP port 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 RFC¹² 2661 [14]. Inšpirovaný dvoma staršími protokolmi L2F¹³ [15] a PPTP.

L2TP sieť pozostáva primárne z 3 zariadení:

1. **PPP terminál** – ľubovoľné zariadenie na vykonanie PPP enkapsulácie na dáta a pripojenie k LAC¹⁴. Môže to byť aj samotné zariadenie, ktoré sa pripája.
2. **L2TP prístupového servera** – LNS¹⁵, jeden z koncov tunela, ktorý deenkapsuluje dáta a poskytuje prístup do lokálnej siete. Na zariadení prebieha autentizácia používateľa, nastolenie PPP relácie¹⁶ a L2TP tunela s LAC. Nasadzuje sa na hranici medzi privátnou a verejnou sieťou, zvyčajne ako sieťová brána na opustenie danej súkromnej siete¹⁷. Obdobne poskytuje funkcionality prekladu adres z privátnych do verejných a opačne. Uvedená funkcionality sa nazývajú Network Address Translation (NAT). Viac o tomto protokole je dostupné na [16].
3. **L2TP koncentrátora** – LAC, zariadenie umiestnené medzi LNS a klientom. Služí na preposielanie paketov oboma smermi. V smere k LNS vytvára L2TP tunel. LAC server môže byť nasadený aj na PPP termináli a pracovať ako PPPoE¹⁸ server. Zvyčajne je koncentrátor nasadený na NAS, ale je možné ho nasadiť na ľubovoľné sieťové zariadenie.

¹²z ang. *Request For Comments*

¹³z ang. *Cisco Layer 2 Forwarding Protocol*

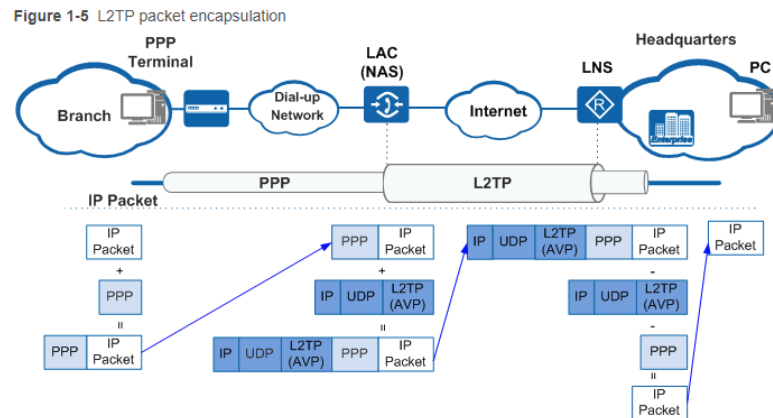
¹⁴z ang. *L2TP access concentrator*

¹⁵z ang. *L2TP Network Server*

¹⁶z ang. *session*

¹⁷z ang. *gateway*

¹⁸z ang. *PPP Over Ethernet*



Obr. 1.16

V schéme 1.16 je znázornené ako sú spomenuté zariadenia zapojené v logickej topológii. Na schéme je znázornený aj proces enkapsulácie PPP paketov, prenosu dát naprieč tunelom a následnej deenkapsulácie.

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 ním pakety s portom 1701. Prijímač po prijatí paketu taktiež náhodne určí nečinný port a preposiela ním pakety prijaté iniciátorom. Takto zvolené portové čísla sa používajú 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 viacerých tunelov medzi zariadeniami. Pozostáva z jedného alebo viacerých relačných spojení. Žiadosť o vytvorenie vytvára LAC server po prijatí PPP žiadosti od vzdialeného používateľa. LAC a LNS si vymenia informácie potrebné na vznik spojenia ako sú napríklad autentizačné informácie tunela a ID. Po úspešnom vyjednávaní¹⁹ 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

¹⁹z ang. *negotiation*

použitie UDP, vďaka tomu je možné protokol používať aj v nestabilnom sieťovom prostredí. Nevýhodou je zníženie prenosovej rýchlosti. L2TP používa tiež vopred zdieľané kľúče a v prípade ak sa nezhodujú, tak dochádza k zastaveniu chodu. L2TP podporuje iba limitovaný počet portových čísel. Samotná implementácia L2TP neposkytuje, respektíve nezabezpečuje žiadne šifrovanie alebo autentizáciu paketa. Na zabezpečenie sa používa v kombinácii 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 [17].

Viac informácií o L2TP problematike je možné nájsť v [18], [14], [19], odkiaľ boli informácie z tejto podkapitole čerpané.

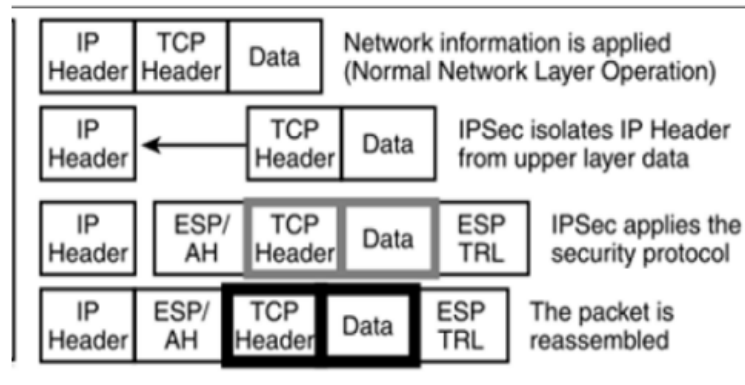
1.4.3 Internet Protocol Security (IPSec)

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

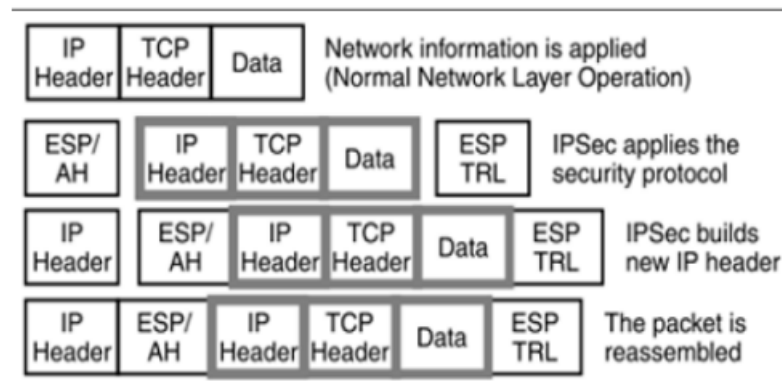
- **transportný režim** – po prijatí paketu z vyššej vrstvy sú smerovacie dáta zachované a na základe nich sú dáta odosielané ďalej. K zvyšným dátam je pridaná hlavička použitého IPSec protokolu. Princíp pridania dát k paketu je znázornený na 1.17
- **tunelovací režim** – zapuzdruje paket z vyššej vrstvy. Pridáva novú IP hlavičku a hlavičku IPSec protokolu k pôvodnému nezapuzdrenému paketu. Uvedená skutočnosť je zobrazená na obrázku 1.18

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

- **Autentizačná hlavička** – z ang. *Authentication Header*, pridáva k prepravovanému paketu dáta na zabezpečenie dátovej integrity a pôvodu. Chráni proti z ang. *Replay attack* [20]. Dáta v tomto režime nie sú šifrované. AH hlavička je vygenerovaná v závislosti od toho v akom IPSec režime je protokol použitý.



Obr. 1.17: IPsec transportný režim



Obr. 1.18: IPsec tunelovací režim

- **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 [21], RSA [22], Diffie-Hellman [23] a eliptické krivky (ECDSA [24] aj ECDH [25]).

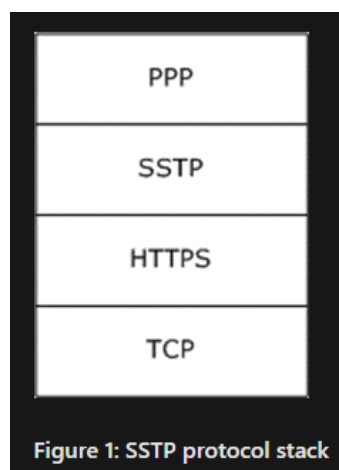
Nabudúce sa opytat ci biks predmet moze byt zdroj alebo ine. [1]

1.4.4 Secure Socket Tunneling Protocol (SSTP)

SSTP je bežný L2 VPN protokol, ktorý zapuzdruje PPP ramce cez HTTPS protokol [26]. Spolieha sa na SSL, resp. TLS, ktoré sú opísané v úvode práce. 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 štandardných protokolov. Je dostupný vo viacerých operačných systémoch vrátane Linuxu a BSD. Pravidelne udržiavaný o čom svedčia aj priebežná aktualizácia dokumentácie na Microsoft dokumentačných stránkach. Informácie k tejto podkapitole boli čerpané z [27]. V uvedenom zdroji je možné nájsť podrobnejšie informácie o protokole.

Proces enkapsulácie s využitím protokolov je znázornený pomocou schémy 1.19. Pri vytváraní SSTP segmentu dochádza k zapuzdreniu PPP rámcov pomo-



Obr. 1.19: Proces enkapsulácie PPP rámcov pomocou protokolov naprieč SSTP protokolom

cou HTTPS s využitím TCP protokolu s portovým číslom 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 premávky putujú 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 bajtov²⁰, z ľava do prava, teda od najvýznamnejšieho bitu po

²⁰z ang. *network byte order*

najmenej významný²¹. Prvé 4 parametre v oboch hlavičkách sú rovnaké:

1. **Verzia** – z ang. *Version*, má veľkosť 8-bitov, používa sa pri komunikácii a vyjednávanií SSTP verzie, ktorá sa má použiť. Prvé 4 bity signalizujú majoritnú verziu a zvyšné minoritnú verziu.
2. **Rezervované** – 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* [29], obsahujú 5. parameter
 - **5. Dáta** – pole variabilnej dĺžky. Obsahuje zapuzdrený náklad z vyššej vrstvy.
- **Kontrolné SSTP pakety** – z ang. *SSTP Control Packets* [28], obsahuje 3 dodatočné parametre:
 - **5. Typ správy** – z ang. *Message Type*, 16-bitové pole s SSTP správou o stave spojenia. Celkovo 9 možných správ [28].
 - **6. Číselné atribúty** – z ang. *Num Attributes*, 16-bitové pole, ktoré špecifikuje počet parametrov v správe
 - **7. Atribúty** – z ang. *Attributes*, 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 autentizácii. Je možné autentizovať iba používateľa, iné možnosti nie sú podporované (zariadenie, smart card, počítač,...). V prípade nestabilného spojenia, je možný vysoký výskyt straty paketov. Dôvodom je použitie TCP protokolu.

²¹sieťové spracovanie dát známe aj ako z ang. *Big Endian*

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 [27], odkiaľ boli aj informácie pre túto podkapitolu čerpané.

1.4.5 Ostatné populárne VPN protokoly

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

OpenVPN

OpenVPN je jeden z najznámejších 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 sprostredkované prostredníctvom SSL/TLS protokolu. Dokáže pracovať s dátami na L2 aj L3 vrstve v závislosti od konfigurácie. Vďaka voľnému prístupu do zdrojového kódu poskytuje jednoduché možnosti na skúmanie výsledných riešení, validáciu a prípadnú úpravu podľa potrieb konkrétného používateľa. Protokol je napísaný v jazyku C. Bezpečnostné prvky sú implementované pomocou OpenSSL knižnice. Knižnica v sebe zahŕňa funkcie potrebné na šifrovanie, autentizáciu, výmenu kľúčov a mnoho ďalšieho. Na obrázku 1.20 je znázornená výstupná štruktúra balenia po zapuzdrení.

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

Viac informácií o tomto komplexnom programe je možné nájsť v [7], [ovpn] a

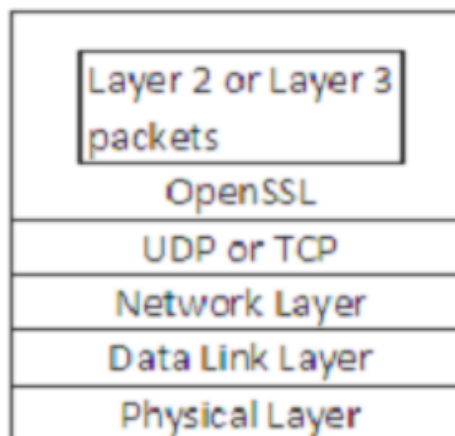


Figure 5 : Packet Structure of OpenVPN

Obr. 1.20

priamo na stránke OpenVPN²². Z uvedených zdrojov boli aj informácie čerpané. Zdrojový kód je dostupný napríklad na Githube²³.

WireGuard

1.5 Zhrnutie VPN sieti

Jednoduchá schema so vsetkym v jednom obrazku

[30], [31] <https://www.vpnmentor.com/blog/different-types-of-vpns-and-when-to-use-them/> <https://www.top10vpn.com/what-is-a-vpn/vpn-types/> <https://www.auvik.com/types/> <https://www.geeksforgeeks.org/types-of-virtual-private-network-vpn-and-its-protocols/?ref=rp> <https://www.geeksforgeeks.org/difference-between-site-to-site-vpn-and-remote-access-vpn/?ref=rp>

V súčasnosti je trend, využívanie VPN 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. – stojí za zmienku <https://github.com/vpnhood/VpnHood> a plus v iných jazykoch

²²<https://openvpn.net/faq/what-is-openvpn/>

²³<https://github.com/OpenVPN/openvpn/>

2 Ľahká kryptografia

Diplomaticky uvod do problematiky → zdroj

<https://csrc.nist.gov/projects/lightweight-cryptography/finalists> <https://csrc.nist.gov/CSRC/Cryptography/documents/final-lwc-submission-requirements-august2018.pdf>

2.1 clanok

Cieľom kryptografických blokov je utajiť správu pri jej ceste 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, kde sa uvádza) – z ang. *Data Authenticity*,
- **integrita údajov** (nebolia upravená počas prenosu) – z ang. *Data Integrity*.

Prvý z uvedených bodov je najčastejšie žiadaným a známym cieľom. Odosielateľ správy zašifruje jej obsah pomocou použitia niektorého z šifrovacích algoritmov, kryptografického kľúča a následne správu odošle. Na druhej strane, prijímateľ, musí použiť komplementárny dešifrovací algoritmus s prislúchajúcim kľúčom. Ktokoľvek kto sa dostane medzi týchto komunikantov, k takto preposielanej správe, z nej nedokáže obsahovo nič zistiť, v istom časovom období.

Dôsledkom týchto faktov je jasné, že komunikanti musia mať jasne definovaný použitý algoritmus. Zároveň je nutné aby došlo k výmene kryptografických kľúčov, ktoré sú pri šifrovaní a dešifrovaní aplikované. Tým sa zabezpečí aj druhá úloha – Autenticita dát, pretože potrebné informácie budú mať len komunikanti.

V kryptografických blokoch sú taktiež aplikované algoritmy na overenie integrity správ. Ich úlohou je potvrdiť, že do obsahu správy nebolo, počas jej transportu medzi komunikantmi, nič pridané, resp. ubrané.

V súčasnosti má používateľ možnosť vybrať si zo širokej ponuky kryptografických algoritmov. Medzi najznámejší patrí AES [21], ktorý je aktuálne používaný

ako štandardný kryptografický algoritmus. Detailný opis jednotlivých blokov a postupov použitých v AES-e, je obsahom rôznych vydání. Viac informácií o problematike nájde čitateľ v [32], ktorá obsahuje okrem opisu AES-u aj dôležité informácie, týkajúce sa kryptografických základov.

V rámci tejto práce sme sa rozhodli opísať, v súčasnosti menej známe, algoritmy:

- XOODOO [33]
- Gimli [34]
- Simpira384 [35]

Uvedené permutácie sú použité ako kryptografické primitívum a pri následnej tvorbe ďalších kryptografických blokov.

2.2 Kryptografický algoritmus XOODOO a variácie

XOODOO je sada 384-bitových kryptografických permutácií parametrizovaných počtom kôl. Funkcia kola/rundy¹ funguje na 12 slovách² po 32 bitoch. Vďaka tomu je efektívna aj na menej výkonných procesoroch nižšej triedy. Vytvoril ju tím Keccak, ktorý stojí za viacerými úspešnými kryptografickými algoritmami. Napríklad hashovacie funkcie z rodiny SHA-3 a iné – [36]. XOODOO algoritmus vznikol po vytvorení tzv. Kravatte autentizačno-šifrovacieho algoritmu [37], založené na Keccak-p permutácií [38]. Ten sa ukázal ako dostatočne rýchly na širokom spektre platforiem. Avšak nezapadá do kategórie tzv. ľahkej kryptografie³.

Tím Keccak vypracoval nové riešenie. Ním bol port medzi ich prvotným Keccak-p dizajnom a Gimli-ho [39] permutačným algoritmom. Vo výsledku autori zlúčili lepšie realizované prvky z oboch algoritmov do jedného celku. Primárny problém samotnej Gimli permutácie bol v slabom prejave zmeny výstupu po malých zmenách vo vstupnej správe. Táto vlastnosť sa v kryptografii označuje pomocou anglického pojmu, tzv. *propagation properties*⁴. Novo-vzniknuté riešenie autori pomenovali XOODOO. Na základe rôznych variácií tohto kryptografického primitíva sa im následne podarilo vytvoriť sadu vysoko efektívnych kryptografických

¹z ang. *round*

²z ang. *words*

³z ang. *lightweight cryptography*

⁴Cieľom je aby aj zmena jedného bitu na vstupe, ovplyvnila čo najviac bitov vo výstupe – tzv. *Lavínový efekt*.

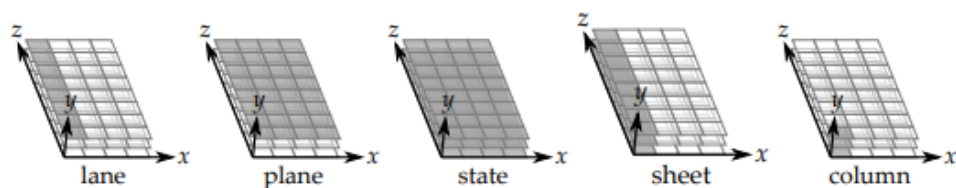
funkcií. Medzi sady, ktorých jadro tvorí XOODOO, patrí Xoodyak a Xoofff. Xoofff pozostáva zo zlúčenia Farfalle konštrukcie [40] so XOODOO permutáciou.

Xoodyak ma narozdiel od Xoofff duplexovú konštrukciu [41]. 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, výpočet 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. V rámci tejto kapitoly opíšeme kryptografické primitívum XOODOO a následne balík Xoodyak. Informácie o téme boli čerpané z týchto zdrojov: [33], [42], [43], [44], [45], [46].

2.2.1 XOODOO permutácia

XOODOO je rodina permutácií, ktorá je definovaná počtom rúnd. Má klasickú iteračnú štruktúru. Teda opakovateľne 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**. Každá z týchto rovín obsahuje štyri paralelne 32-bitové pruhy – **lanes**. Okrem tejto charakteristiky je možné opísať stav ako množinu 128 stĺpcov – **columns**, pričom jeden stĺpec obsahuje 3 bity v každej rovine. Stav je teda tvorený zo stĺpcov usporiadaných v poli o rozmere 4×32 . Posledná položka na opis stavu sú tzv. listy – **sheets**. List sa skladá z 3 na sebe uložených pruhov. Uvedené pojmy sú znázornené pomocou schémy 2.1, ktorá bola prebraná z [43].



Obr. 2.1: Grafické znázornenie terminológie v XOODOO

Roviny majú index y . $y = 0$ zodpovedá spodnej rovine a vrchná rovina $y = 2$. Bit je označený s indexom z vrámci množiny pruhov. List ich označujeme pomocou indexu x . Takže pozícia pruhu v stave je definovaná pomocou dvoch súradníc (x, y) . Konkrétny bit je možné v stave následne reprezentovať pomocou trojice súradníc (x, y, z) . Pri učení 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.

$$i = z + 32(x + 4y) \quad (2.1)$$

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 schémy 2.2, ktorá je prebratá z [43]. Schéma opisuje jednotlivé kroky algoritmu vrátane rundových konštánt.

2.2.2 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 [41]. Operačný režim, v ktorom Xoodyak pracuje sa nazýva Cyklista – z ang. *Cyclist*. Tento názov získal ako opozitum k pomenovaniu režimu Motorista, ktorý je možné nájsť v Keyak schéme [47]. Narozdiel od uvedeného balíka Keyak, nie je Xoodyak limitovaný len na autentizované 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. západky⁵ [48] $\ell_{ratchet}$. 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

⁵z ang. *the ratchet size*

Table 1: Notational conventions

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 $A_{y'}$

Algorithm 1 Definition of XOODOO[n_r] with n_r the number of rounds

Parameters: Number of rounds n_r
for Round index i from $1 - n_r$ to 0 **do**
 $A = R_i(A)$

Here R_i is specified by the following sequence of steps:

θ :
 $P \leftarrow A_0 + A_1 + A_2$
 $E \leftarrow P \lll (1, 5) + P \lll (1, 14)$
 $A_y \leftarrow A_y + E$ 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 :
 $A_0 \leftarrow A_0 + C_i$
 χ :
 $B_0 \leftarrow \overline{A_1} \cdot A_2$
 $B_1 \leftarrow \overline{A_2} \cdot A_0$
 $B_2 \leftarrow \overline{A_0} \cdot A_1$
 $A_y \leftarrow A_y + B_y$ for $y \in \{0, 1, 2\}$
 ρ_{east} :
 $A_1 \leftarrow A_1 \lll (0, 1)$
 $A_2 \leftarrow A_2 \lll (2, 8)$

 Table 2: The round constants c_i with $-11 \leq i \leq 0$, in hexadecimal notation (the least significant bit is at $z = 0$).

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

Obr. 2.2

dizajnom. Šírka permutácie b' je definovaná pomocou vzorca 2.2. Všetky uvedené parametre sú v bajtoch. Pre označenie prázdneho slova budeme používať ϵ .

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

Cyklista operuje v dvoch režimoch – **hašovací a kľúčový**⁶. Inicializácia prebieha pomocou príkazu CYCLIST($K, \text{id}, \text{counter}$). Ak sa parameter K rovná prázd-

⁶z ang. *hash and keyed mode*.

nemu slovu ϵ , tak potom nastane spustenie v hašovacom režime. Aktuálne nie je do implementácie zakomponovaná možnosť zmeny režimu po inicializácii. 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 ,
- $C \leftarrow \text{ENCRYPT}(P)$ zašifruje P do C a absorbuje P ,
- $P \leftarrow \text{DECRYPT}(C)$ dešifruje C do P a absorbuje P ,
- $Y \leftarrow \text{SQUEEZE}(\ell)$ vytvára ℓ -bajtový výstup, ktorý závisí od doteraz absorbovaných dát,
- $Y \leftarrow \text{SQUEEZEKEY}(\ell)$ funguje ako `SQUEEZE(ℓ)`, ale používa sa za účelom generovania odvodeného kľúča, `ell` nefunguje v listings `pckg`
- `RATCHET()` transformuje stav na nevratný tak, aby sa zabezpečila dopredná bezpečnosť⁷ [49].

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 pamätevej stopy. 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 [43].

Definícia a bezpečnosť

Xoodyak je definovaný pomocou operatívneho režimu Cyklista nasledovne:

$$CYCLIST[f, R_{hash}, R_{kin}, R_{kout}, \ell_{ratchet}] \quad (2.3)$$

⁷z ang. *Forward secrecy*

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. $\ell_{ratchet}$ – 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 [50].

Viac informácií o bezpečnosti Xoodyak-a je možné nájsť v [7.3, 43], odkiaľ boli informácie čerpané.

2.2.3 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.

Použitie kľúčového režimu

3 Konfigurácia prostredia, metodika testovania a merania

3.1 Prostredie virtuálnych strojov pomocou Virtual-Box

Pri testovaní funkcionality VPN sme použili virtualizačný nástroj (ďalej VM) Virtual Box (ďalej VB), spoločnosti Oracle, vo verzii 6.1.30. VB je voľne dostupný. Inštalácia je jednoduchá a rýchla. Viac informácií o nástroji je možné dohľadať v [51].

Pre použitie je potrebné aby mal používateľ k dispozícii 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 20.04.3(LTS¹) – OSC a 21.10 – OSS. Pri opise práce použijeme označenia OSS pre VPN server a OSC pre klienta.

Pri jednoduchej inštalácii VM sme použili konfiguráciu s 2048 MB RAM a 2 jadrami. (Minimálna inštalácia). V prípade potreby dávame do popredia návod na prípravu Windows OS v VM – [52], avšak postup je triviálny. Po inštalácii sme OS aktualizovali pomocou príkazov:

```
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.

¹z ang. Long Term Support

Posledné úpravy prostredia sú spojené s jazykom C a balíčkom Make. Inštalácia je opäť jednoduchá. Použili sme príkazy:

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

Uvedené úpravy boli vykonané na oboch OS.

V prípade použitia OS Windows je postup inštalácie jazyka C a balička Make zložitejší. Používateľovi odporúčam použitie knižníc Winlibs, dostupne na webe. Po stiahnutí balíčkov musí používateľ importovať uvedený balíček, resp. cestu k nemu, do premenných prostredia OS Windows. Jeden zo spôsobov je uvedený aj na Winlibs stránke.

3.2 Zmena sieťových adaptérov

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

- Not attached
- Network Address Translation (ďalej NAT)
- NAT Network
- Bridge adapter
- Internal
- Host-Only
- Generic driver
- Cloud-Based – experimentálne

Konektivita jednotlivých možností je znázornená pomocou obrázku 3.1. Viac informácií o jednotlivých režimoch je dostupných na [53].

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 režimoch je taktiež možné nájsť v [54]. Autor sa venuje postupu konfigurácie jednotlivých režimov spoločne s ich opisom.

Mode	VM→Host	VM←Host	VM1↔VM2	VM→Net/LAN	VM←Net/LAN
Host-only	+	+	+	–	–
Internal	–	–	+	–	–
Bridged	+	+	+	+	+
NAT	+	Port forward	–	+	Port forward
NATservice	+	Port forward	+	+	Port forward

Obr. 3.1: Konektivita jednotlivých sieťových adaptérov

3.3 Nástroje použité v obrazoch

winlibs, visual studio , gcc ,make, c kod na meranie poctu cyklov z bc + cas

4 Implementacia jednoduchkej VPN siete

<https://learn.microsoft.com/en-us/windows/win32/winsock/finished-server-and-client-code>

4.1 Dead Simple VPN

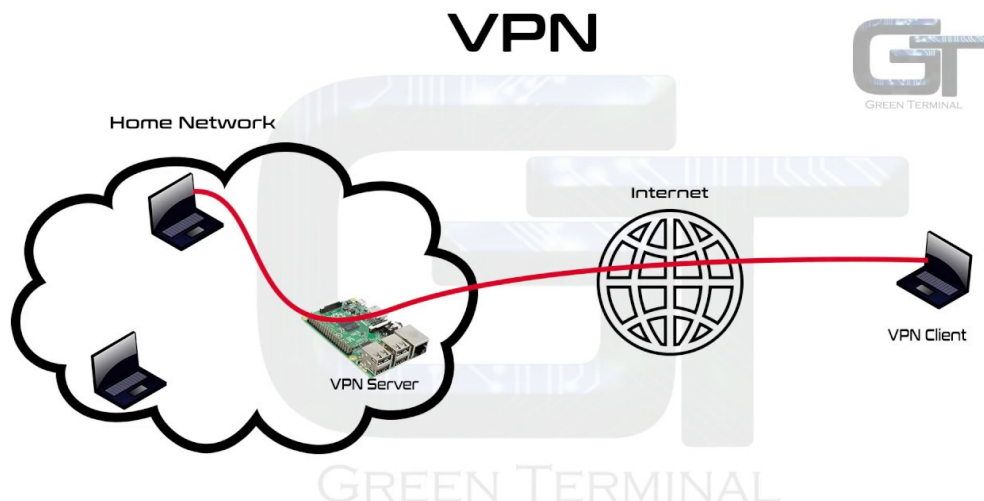
Dead Simple VPN je voľne dostupný¹ program, napísaný v jazyku C. Určený je pre operačný systém Linux. Autorom je Frank Denis. DSVPN rieši najbežnejší prípad použitia VPN, teda pripojenie klienta k VPN serveru cez nezabezpečenú sieť. Následne sa klient dostane na internet prostredníctvom servera. Uvedenú skutočnosť je možné vidieť na schéme 4.1.

DSVPN používa protokol riadenia prenosu – TCP² [55]. Medzi ďalšie pozitíva patrí:

- Používa iba modernú kryptografiu s formálne overenými implementáciami,
- Malá a konštantná pamäťová stopa. 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,
- Funguje na Linuxe (kernel ≥ 3.17), macOS a OpenBSD, DragonFly BSD, FreeBSD a NetBSD v klientskych a point-to-point režimoch. Pridanie podpory pre iné operačné systémy je triviálne,

¹<https://github.com/jedisct1/dsvpn>

²z ang. *Transmission Control Protocol*



Obr. 4.1: Schéma jednoduchej VPN

- Nedochádza k úniku IP medzi pripojeniami, ak sa sieť nezmení. Blokuje IPv6 na klientovi, aby sa zabránilo úniku IPv6 adresy.

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 však prednastavených na automatické hodnoty. Príkladom je port 443, vytvorenie rozhrania tun0, prevzatie externej IP adresy zo siete a

ďalšie.

4.2 Kryptografia použitá v DSVPN

DSVPN používa v svojej implementácii malú sebestačnú kryptografickú knižnicu – *Charm*³. 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**⁴. 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 Gimli-im⁵ [34] alebo Simpira384⁶ [35], ktorá je založená na AES-e. Uvedené algoritmy sú predmetom opisu kapitoly 2. 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 3.1. Na zariadení OSS sme pomocou balička 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 spustenie a vytvorenie spojenie 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*. Ten je potrebné vložiť do priečinka s programom *dsvpn* v oboch zariadeniach – OSS aj OSC.

³<https://github.com/jedisct1/charm>

⁴<https://cryptol.net/index.html>

⁵<https://github.com/jedisct1/gimli>

⁶<https://github.com/jedisct1/simpira384>

2. OSS zariadenie:

```
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, priradenou k vytvoreniu tunelovaciemu rozhraniu s menom *tun0*. Vytvorí sa pri spustení servera⁷. Príkazom ďalej definujeme portové číslo 2340, ktoré sa použije pri nastolení TCP spojenie medzi klientom a serverom. Poslednou konfiguráciou je priradenie IP adresy tunelov, ktoré bude využívať náš klient – 10.8.0.254 a server – 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.

3. OSC zariadenie:

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

– uvedený príkaz zabezpečí, že sa pripojíme na VPN Server, ktorý má IP adresu 192.168.88.62 s portom 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 viditeľný pomocou IP adresy, ktorú sme zvolili.

Na overenie správnosti funkcionality nám postačí jednoduchý sieťový príkaz *tracert*. Napríklad *tracert google.sk*⁸. Prvá z uvedených adries je práve tá, ktorú dané zariadenie používa.

V našom prípade bolo nutné použiť lokálne adresy vzhľadom na to, že obe VM bežia na jednom hosťovskom počítači. Obidva 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 znázornené pomocou 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.

⁷Pomocou *ip address show tun0* zistíme IPv4 adresu VPN servera.

⁸vo Windows CMD prostredí: *tracert google.sk*

```

ubuntu21@ubuntu21-VirtualBox: ~/Plocha/dsvpn-master
ubuntu21@ubuntu21-VirtualBox: ~/Plocha/dsvpn-master$ ip address show
1: lo: <LOOPBACK,UP,LOWER_UP> mtu 65536 qdisc noqueue state UNKNOWN group default qlen 1000
    link/loopback 00:00:00:00:00:00 brd 00:00:00:00:00:00
    inet 127.0.0.1/8 scope host lo
        valid_lft forever preferred_lft forever
    inet6 ::1/128 scope host
        valid_lft forever preferred_lft forever
2: enp0s3: <BROADCAST,MULTICAST,UP,LOWER_UP> mtu 1500 qdisc fq_codel state UP group default qlen 1000
    link/ether 08:00:27:42:5a:4e brd ff:ff:ff:ff:ff:ff
    inet 192.168.88.60/24 brd 192.168.88.255 scope global dynamic noprefixroute enp0s3
        valid_lft 362sec preferred_lft 362sec
    inet6 fe80::da75:ade1:9470:f56a/64 scope link noprefixroute
        valid_lft forever preferred_lft forever
3: tun0: <POINTOPOINT,MULTICAST,NOARP,UP,LOWER_UP> mtu 9000 qdisc fq_codel state UNKNOWN group default qlen 500
    link/none
    inet 10.8.0.254 peer 10.8.0.2/32 scope global tun0
        valid_lft forever preferred_lft forever
    inet6 64:ff9b::a08:fe peer 64:ff9b::a08:2/96 scope global
        valid_lft forever preferred_lft forever
    inet6 fe80::698a:bcc9:aaad:fb43/64 scope link stable-privacy
        valid_lft forever preferred_lft forever
ubuntu21@ubuntu21-VirtualBox: ~/Plocha/dsvpn-master$

```

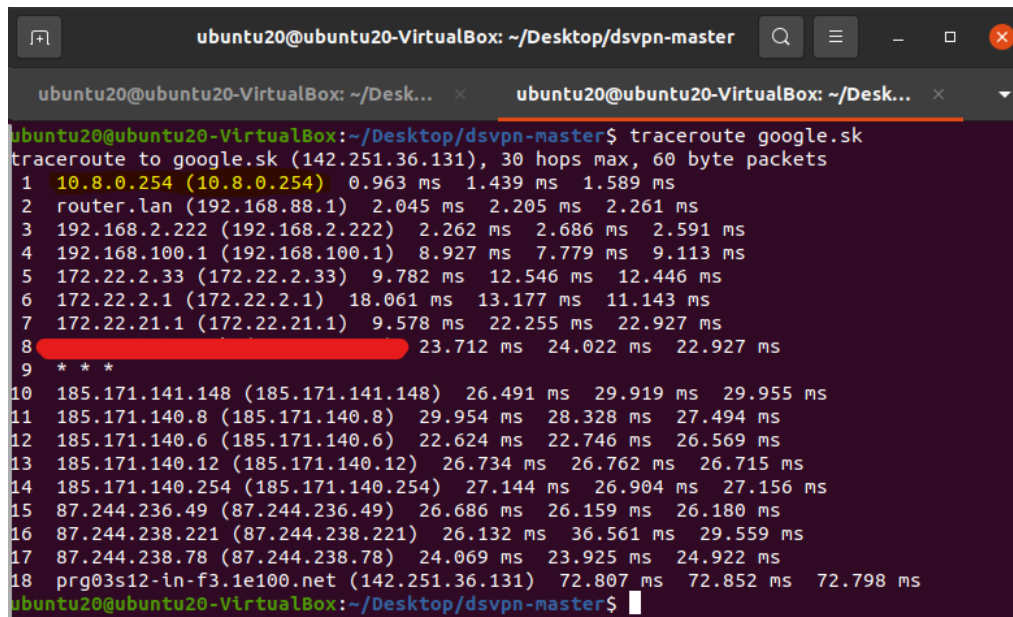
Obr. 4.2: Zistenie IP adresy VPN Servera na VM OSS

```

ubuntu20@ubuntu20-VirtualBox: ~/Desktop/dsvpn-master
ubuntu20@ubuntu20-VirtualBox: ~/Desktop/dsvpn-master$ ip addr show
1: lo: <LOOPBACK,UP,LOWER_UP> mtu 65536 qdisc noqueue state UNKNOWN group default qlen 1000
    link/loopback 00:00:00:00:00:00 brd 00:00:00:00:00:00
    inet 127.0.0.1/8 scope host lo
        valid_lft forever preferred_lft forever
    inet6 ::1/128 scope host
        valid_lft forever preferred_lft forever
2: enp0s3: <BROADCAST,MULTICAST,UP,LOWER_UP> mtu 1500 qdisc fq_codel state UP group default qlen 1000
    link/ether 08:00:27:3f:3c:49 brd ff:ff:ff:ff:ff:ff
    inet 192.168.88.62/24 brd 192.168.88.255 scope global dynamic noprefixroute enp0s3
        valid_lft 444sec preferred_lft 444sec
    inet6 fe80::b281:ce29:9ef4:aefa/64 scope link noprefixroute
        valid_lft forever preferred_lft forever
3: tun0: <POINTOPOINT,MULTICAST,NOARP> mtu 9000 qdisc noop state DOWN group default qlen 500
    link/none
4: tun1: <POINTOPOINT,MULTICAST,NOARP,UP,LOWER_UP> mtu 9000 qdisc fq_codel state UNKNOWN group default qlen 500
    link/none
    inet 10.8.0.2 peer 10.8.0.254/32 scope global tun1
        valid_lft forever preferred_lft forever
    inet6 64:ff9b::a08:2 peer 64:ff9b::a08:fe/96 scope global
        valid_lft forever preferred_lft forever
    inet6 fe80::90cf:ae1b:e16:7a93/64 scope link stable-privacy
        valid_lft forever preferred_lft forever
ubuntu20@ubuntu20-VirtualBox: ~/Desktop/dsvpn-master$

```

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



```

ubuntu20@ubuntu20-VirtualBox: ~/Desktop/dsvpn-master
ubuntu20@ubuntu20-VirtualBox: ~/Desk... x  ubuntu20@ubuntu20-VirtualBox: ~/Desk... x
ubuntu20@ubuntu20-VirtualBox:~/Desktop/dsvpn-master$ traceroute google.sk
traceroute to google.sk (142.251.36.131), 30 hops max, 60 byte packets
 1  10.8.0.254 (10.8.0.254)  0.963 ms  1.439 ms  1.589 ms
 2  router.lan (192.168.88.1)  2.045 ms  2.205 ms  2.261 ms
 3  192.168.2.222 (192.168.2.222)  2.262 ms  2.686 ms  2.591 ms
 4  192.168.100.1 (192.168.100.1)  8.927 ms  7.779 ms  9.113 ms
 5  172.22.2.33 (172.22.2.33)  9.782 ms  12.546 ms  12.446 ms
 6  172.22.2.1 (172.22.2.1)  18.061 ms  13.177 ms  11.143 ms
 7  172.22.21.1 (172.22.21.1)  9.578 ms  22.255 ms  22.927 ms
 8  [redacted]  23.712 ms  24.022 ms  22.927 ms
 9  * * *
10  185.171.141.148 (185.171.141.148)  26.491 ms  29.919 ms  29.955 ms
11  185.171.140.8 (185.171.140.8)  29.954 ms  28.328 ms  27.494 ms
12  185.171.140.6 (185.171.140.6)  22.624 ms  22.746 ms  26.569 ms
13  185.171.140.12 (185.171.140.12)  26.734 ms  26.762 ms  26.715 ms
14  185.171.140.254 (185.171.140.254)  27.144 ms  26.904 ms  27.156 ms
15  87.244.236.49 (87.244.236.49)  26.686 ms  26.159 ms  26.180 ms
16  87.244.238.221 (87.244.238.221)  26.132 ms  36.561 ms  29.559 ms
17  87.244.238.78 (87.244.238.78)  24.069 ms  23.925 ms  24.922 ms
18  prg03s12-in-f3.1e100.net (142.251.36.131)  72.807 ms  72.852 ms  72.798 ms
ubuntu20@ubuntu20-VirtualBox:~/Desktop/dsvpn-master$

```

Obr. 4.4: Overenie funkcionality DSVPN pomocou traceroute

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

4.4 Princíp fungovania programu

High level overview

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 balíčka[56]. 3 hlavičkových (.h) a k nim korešpondujúcimi zdrojovými kódmi (.c), s pomenovaním:

1. **charm.h** – kryptografická knižnica so 6 funkciami,
2. **os.h** – funkcie čítania a zápisu paketov, vytvorenia, aplikácie a zrušenia tunelu,
3. **vpn.h** – deklarácia konštánt, endianness[57] 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 slúžiace pri behu kryptografického algoritmu XOODOO. Charm.h pozostáva z 6 funkcií. Ich implementácia nie je až tak rozsiahla. Zaberá celkovo 337 riadkov. Jednotlivú implementáciu každej funkcie postupne opíšeme.

Zdrojový kód 4.1: Obsah 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 sú 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 role, pod ktorou je VPN spustená. Teda či sa jedná o server alebo klienta. Celkovo je obsahom 12 funkcií, ktoré riešia uvedené úlohy. Detail je možné vidieť v 4.2.

Zdrojový kód 4.2: Obsah ZK 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 Ccmds {
12     const char *const *set;
13     const char *const *unset;
14 } Ccmds;
15
16 Ccmds 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);
```

4.5.3 Súbor vpn.h a vpn.c

Hlavičkový súbor obsahuje prevažne definovanie niektorých parametrov potrebných na správnu funkcionálnosť VPN, spoločne s korekciou pre niektoré OS. Vid'. 4.3. Ostatné parametre, ktoré boli opísané pri spustení sú definované práve v tomto súbore (MTU,Porty,IP atď.).

Zdrojový kód 4.3: Obsah ZK 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 [58].

Vpn.c je hlavným zdrojovým kódom DSVPN. V jeho vnútri nájdeme hlavnú, štartovaciu, funkciu main. Zároveň má prilinkované aj vyššie uvedené knižnice. Ako prvé dochádza k inicializácii premennej štruktúry Context4.4.

Zdrojový kód 4.4: Štruktúra Context

```

1  typedef struct Context_ {
2      const char *   wanted_if_name;
3      const char *   local_tun_ip;
4      const char *   remote_tun_ip;
5      const char *   local_tun_ip6;
6      const char *   remote_tun_ip6;
7      const char *   server_ip_or_name;
8      const char *   server_port;
9      const char *   ext_if_name;
10     const char *   wanted_ext_gw_ip;
11     char           client_ip[NI_MAXHOST];
12     char           ext_gw_ip[64];
13     char           server_ip[64];
14     char           if_name[IFNAMSIZ];
15     int            is_server;
16     int            tun_fd;
17     int            client_fd;
18     int            listen_fd;
19     int            congestion;
20     int            firewall_rules_set;
21     Buf            client_buf;
22     struct pollfd   fds[3];
23     uint32_t        uc_kx_st[12];
24     uint32_t        uc_st[2][12];
25 } Context;

```

Následne dochádza k načítaniu kľúča pomocou pomocnej funkcie `load_key_file()` 4.5. Úlohou je prepočítanie zdieľaného kľúča, pričom sa používa funkcia z `os.c` – `safe_read()`. Realizuje sa znakové spočítanie, v ktorom je zakomponovaná funkcia `poll()` [59]. V prípade zhody veľkosti, funkcia vracia 0.

Zdrojový kód 4.5: Načítanie zdieľaného kľúča

```

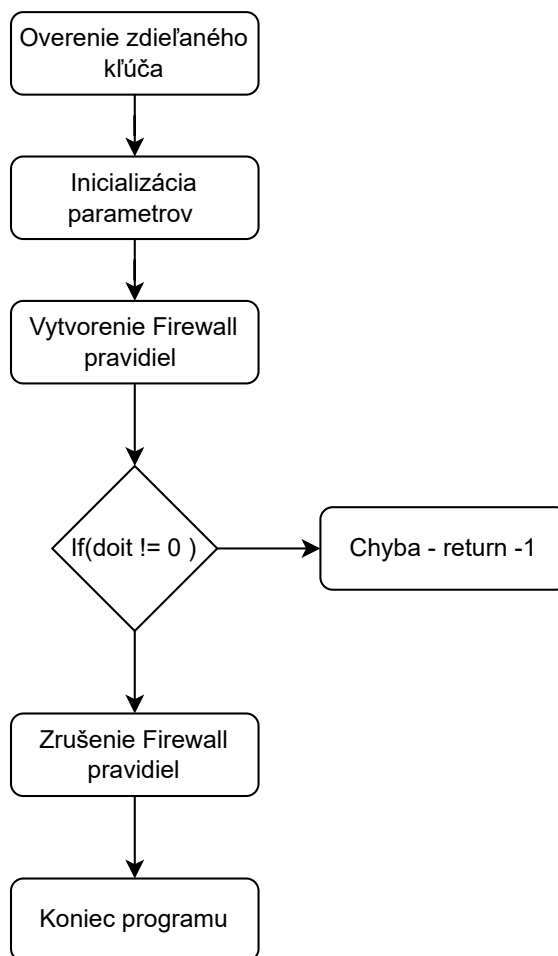
1  static int load_key_file(Context *context, const char *file)
2  {
3      unsigned char key[32];
4      int          fd;
5
6      if ((fd = open(file, O_RDONLY)) == -1) {
7          return -1;
8      }
9      if (safe_read(fd, key, sizeof key, -1) != sizeof key) {
10         (void) close(fd);
11         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 }

```

Po preverení kľúča dochádza k priradeniu parametrov do štruktúry `Context` na základe vstupu pri spustení DSVPN. V prípade že nedochádza k zmene Gateway (ďalej GW) IP adresy, tak sa priradí pôvodná. Tá sa získa pomocou `get_default_gw_ip()`, ktorá je deklarovaná v 4.2. Prostredníctvom shell príkazu `ip route...` a `read_from_shell_command()` funkcie, 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 rozhrania, ktoré bude presmerované na VPN server.

Po nastavení parametrov sa dostávame k vytvoreniu tunelovacieho rozhrania. V tomto kroku autor používa funkciu `tun_create`. Úloha je vysoko závislá od OS. Dôsledkom toho je možné vidieť vetvenie funkcionality vzhľadom k bežiacemu OS. Ako sa už spomínalo v úvode kapitoly. DSVPN poskytuje kompatibilitu pre 6 OS, medzi ktoré patrí Linux, FreeBSD, NetBSD, OpenBSD, MacOS, DragonFly. Následne na základe systému dochádza k vytváraniu tunelu s prednastaveným,



Obr. 4.5: Beh DSVPN

resp. zvoleným menom. Program ďalej nastaví hodnotu MTU.

Po príprave tunelu ešte repetitívne dochádza k overeniu. Tento krok vykonáva funkcia `resolve_ip`. Tá ma v sebe vnorené 2 funkcie, ktoré sú menným ekvivalen-
tom aj vo Windows knižniciach. Jedná sa o funkcie `getaddrinfo` a `getnameinfo`.

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 globálne definovanej funkcie `Cmds firewall_rules_cmds()`. Tá obsahuje súbor prednastavených príkazov. Ich úlohou je presmerovanie celej premávky cez novovzniknutý tunel.

Posledným úkonom je samotný beh VPN. Ten spúšťa funkcia `doit()`. Doterajší beh je jednoducho znázornený pomocou flow diagramu 4.5.

Od tohto momentu sa presúvame k postupnému vnáraníu do procesu spojenia a spracovania dát. Vo vnútri `doit()` dochádza k vetveniu programu. V prípade, že je DSVPN spustená ako server spustí sa funkcia `tcp_listener()`. V

opačnom prípade `client_reconnect()`. Ulohami funkcií je nastolenie TCP spojenia medzi klientom a serverom. Listener vytvára socket pomocou systemovej funkcie `bind()`, ktorý následne čaká na klienta. Smerník na socket je uložený do štruktúry `Context`. V tejto vetve sa v `Context` ešte nastaví smerovanie na tento socket. `Client_reconnect()` podľa prednastaveného počtu pokusov o znovu nadviazanie spojenia sa pokúša pomocou `client_connect()` o spojenie. Pred týmto úkonom samozrejme dochádza k overeniu či už nedošlo k nadviazaniu spojenia a o to sa stará `client_disconnect()`.

`Client_connect()` slúži na pripojenie klienta k serveru. Vykonáva úpravu pravidiel v FW. Následne sa pokúša o nadviazania spojenia pomocou funkcie `tcp_client()`. Po tejto sérii úloh sa vraciame opäť do `doit()`. Tu je vo **while** cykle vykonávaná funkcia `event_loop()`, v ktorej dochádza k použitiu kryptografickej knižnice `charm`. Jej obsahom je inicializácia premenných. viď. 4.6. Schéma 4.6 znázorňuje opísané skutočnosti.

Zdrojový kód 4.6: 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;
```

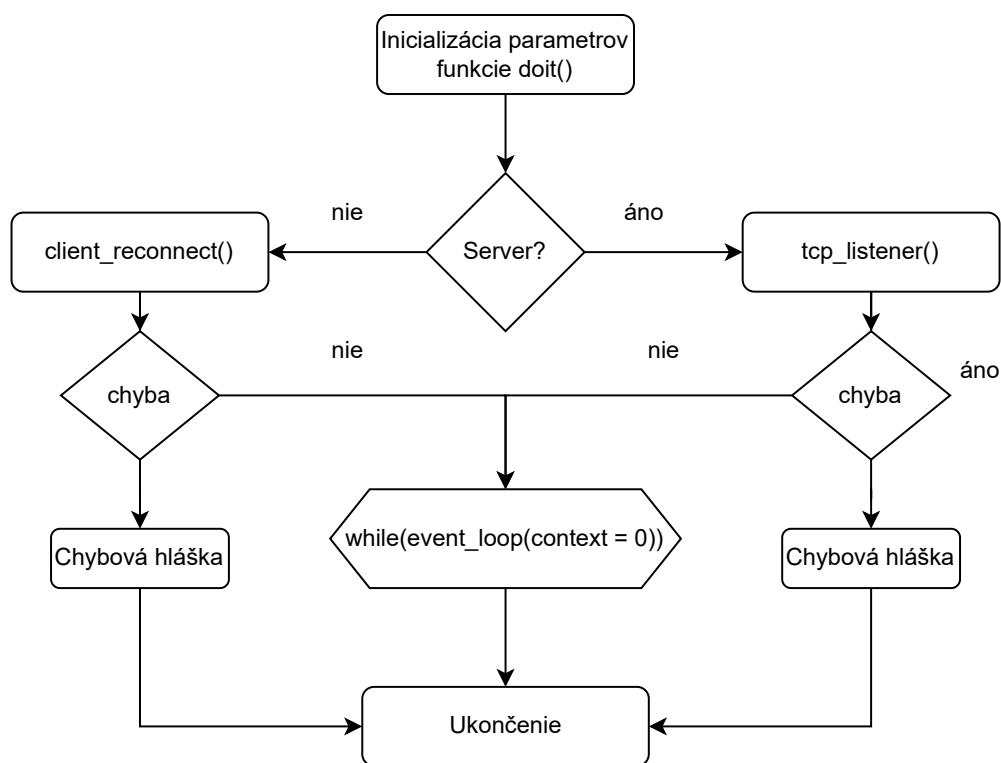
Funckia `event_loop()`

`Event_loop` je 111 riadkov dlhá funkcia. Jej obsah môžeme rozdeliť na overovací a výkonový. Úlohou niekoľkých `if-ou` vo funkcii je preverovanie signálov, spätných hodnôt a podobných premenných, ktoré by signalizovali chybu alebo používateľov záujem o ukončenie relácie programu.

Zaujímavé je taktiež predom 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. `Packet Delay Variation – PDV (Jitter)`, v paketovo-orientovaných sieťach. Viac o tejto problematike je možné si prečítať na [60].

Na druhej strane výkonové funkcie, ako hovorí ich názov, niečo vykonávajú. Do tejto kategórie sme zaradili funkcie:

- `tcp_accept()` – slúži na nastolenie nového TCP spojenia s klientom,



Obr. 4.6: Funkcia Doit()

- `tun_read()` – volá `safe_read_partial` v prípade linuxového OS,
- `uc_encrypt()` – kryptografické šifrovanie správy,
- `safe_write_partial()` – používa štandardizovanú funkciu `write` vo `while` cykle, zapíše zašifrované dáta do buffera určeného 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,
- `tun_write()` – volá `safe_write` pri OS Linux.

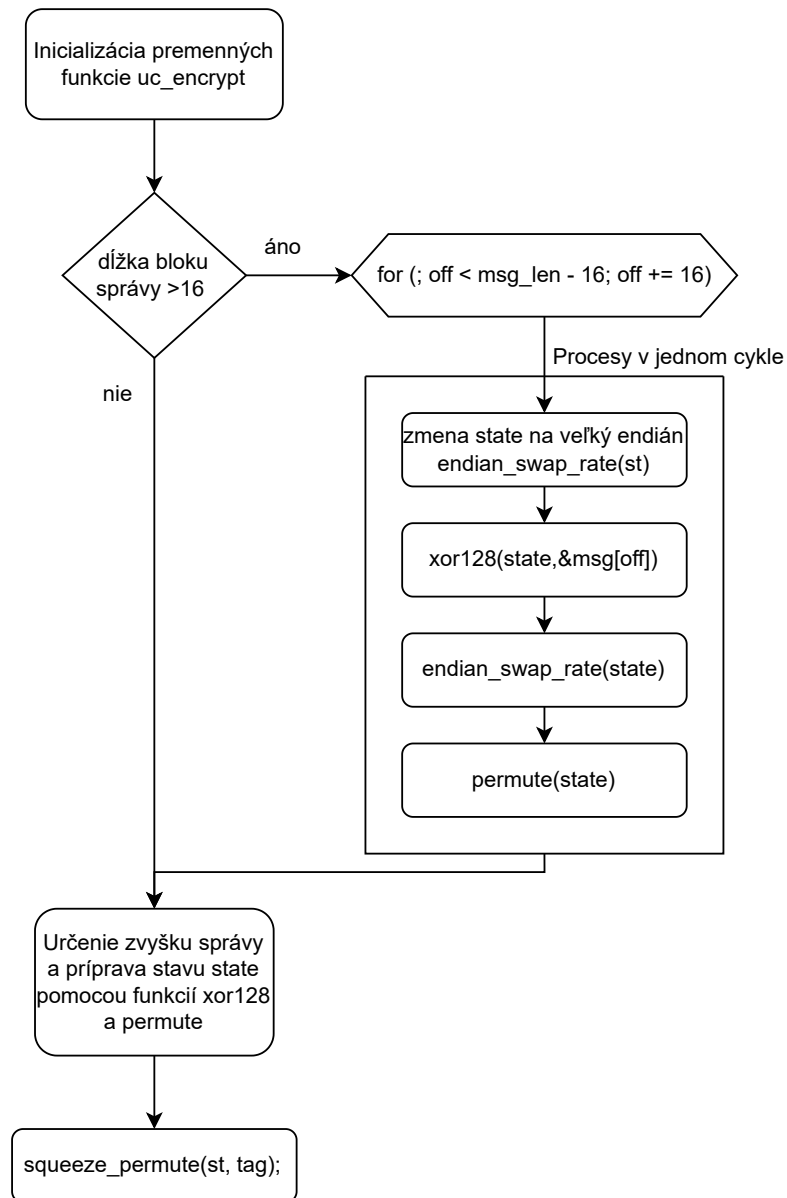
Metóda použitá pri zápise zašifrovaných dát vo funkcii `event_loop()` je znázor-
nená v 4.7.

Zdrojový kód 4.7: 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 je iny objem ako maximum
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 }
```

Šifrovanie a dešifrovanie

Proces šifrovanie resp. dešifrovania správy nastáva na oboch stránách siete, teda pri klientovy aj serveri. 4.8 demonštruje šifrovanie implementované v funkcii `uc_encrypt()`. Tento proces sme sa pokúsili opísať v grafe 4.7.



Obr. 4.7: Funkcia uc_encrypt

Zdrojový kód 4.8: Šifrovanie správy

```

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);
34 }

```

Ako je viditeľné v kóde dochádza k častému použitiu 2 funkcií. Nimi sú `xor128()` a `permute()`. Jedná sa o pomerne dôležité bloky pre správne fungovanie šifrovacieho algoritmu. Obsah prvej z uvedených je preto znázornený v 4.9.

Zdrojový kód 4.9: Funkcia xor128

```
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++) { //xorovanie jednotlivych znakov
13            out_[i] ^= in_[i]; //v 16 bitovom bloku spravy
14        }
15    #endif
16 }
```

Na druhej strane `permute()` je pomerne rozsiahla funkcia pričom jej obsah sa rozprestiera na 100 riadkoch. Funkcionalita závisí od procesorových inštrukcií. Avšak nás bude zaujímať softvérová implementácia, ktorá je aj použitá pri behu. Dôvodom je, že naše zariadenie nemá k dispozícii uvedené procesorové inštrukcie. Blok, ktorý je použitý pri volaní sa nachádza v 4.10.

Zdrojový kód 4.10: Funkcia Permute + makrá

```

1  #define ROTR32(x, b) (uint32_t)(((x) >> (b)) | ((x) << (32 - (b))))
2  #define SWAP32(s, u, v)          \
3  do {                            \
4      t      = (s)[u];            \
5      (s)[u] = (s)[v], (s)[v] = t; \
6  } while (0)
7
8  static void permute(uint32_t st[12])
9  {
10     uint32_t e[4], a, b, c, t, r, i;
11     for (r = 0; r < XOOD00_ROUNDS; r++) {
12         for (i = 0; i < 4; i++) {
13             e[i] = ROTR32(st[i] ^ st[i + 4] ^ st[i + 8], 18);
14             e[i] ^= ROTR32(e[i], 9);
15         }
16         for (i = 0; i < 12; i++) {
17             st[i] ^= e[(i - 1) & 3];
18         }
19         SWAP32(st, 7, 4);
20         SWAP32(st, 7, 5);
21         SWAP32(st, 7, 6);
22         st[0] ^= RK[r];
23         for (i = 0; i < 4; i++) {
24             a      = st[i];
25             b      = st[i + 4];
26             c      = ROTR32(st[i + 8], 21);
27             st[i + 8] = ROTR32((b & ~a) ^ c, 24);
28             st[i + 4] = ROTR32((a & ~c) ^ b, 31);
29             st[i] ^= c & ~b;
30         }
31         SWAP32(st, 8, 10);
32         SWAP32(st, 9, 11);
33     }
34 }

```

4.6 Analýza výpočtových nárokov DSVPN

mozno sekcia nie kapitola, K VPN neviem co pozerat <https://windowsreport.com/test-vpn/>

<https://www.mdpi.com/1999-5903/14/9/264>

<https://nordvpn.com/vpn-speed-test/>

<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9142755>

<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=a5639b03df528315a8e90>

5 Vyhodnotenie dosiahnutých výsledkov

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilissem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero utmetus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

6 Záver

Literatúra

1. DRUTAROVSKÝ, Miloš. Bezpečnosť v architektúre TCP/IP II (BIKS pr7). [B.r.]. [Online; Citované:6.2.2022].
2. Transport Layer Security. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/Transport_Layer_Security#TLS_1.3. [Online; Citované: 21.5.2021].
3. Multiprotocol Label Switching. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Multiprotocol_Label_Switching. [Online; Citované: 4.2.2023].
4. Princípy technológie MPLS VPN. [B.r.]. Dostupné tiež z: <https://magazin.kpi.fei.tuke.sk/2020/06/principy-technologie-mpls-vpn/>. [Online; Citované: 4.2.2023].
5. VISWANATHAN, Arun; ROSEN, Eric C.; CALLON, Ross. *Multiprotocol Label Switching Architecture* [RFC 3031]. RFC Editor, 2001. Request for Comments, č. 3031. Dostupné z DOI: 10.17487/RFC3031.
6. 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].
7. 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](https://www.worldwidejournals.com/international-journal-of-scientific-research-(IJSR)/file.php?val=July_2013_1372777193_d5c86_32.pdf). [Online; Citované: 2.2.2023].
8. 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].

9. 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].
10. Challenge-handshake authentication protocol. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Challenge-handshake_authentication_protocol. [Online; Citované: 2.2.2023].
11. MS-CHAP. [B.r.]. Dostupné tiež z: <https://en.wikipedia.org/wiki/MS-CHAP>. [Online; Citované: 2.2.2023].
12. Password Authentication Protocol. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/Password_Authentication_Protocol. [Online; Citované: 2.2.2023].
13. RC4. [B.r.]. Dostupné tiež z: <https://en.wikipedia.org/wiki/RC4>. [Online; Citované: 2.2.2023].
14. 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].
15. 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].
16. Network address translation. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://sk.wikipedia.org/wiki/Network_address_translation. [Online; Citované: 4.2.2023].
17. 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.
18. Layer 2 Tunneling Protocol. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/Layer_2_Tunneling_Protocol. [Online; Citované: 4.2.2023].
19. 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].
20. Replay attack. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/Replay_attack. [Online; Citované: 20.2.2023].

21. Advanced Encryption Standard. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_Encryption_Standard. [Online; Citované: 8.5.2021].
22. RSA (cryptosystem). [B.r.]. Dostupné tiež z: [https://en.wikipedia.org/wiki/RSA_\(cryptosystem\)](https://en.wikipedia.org/wiki/RSA_(cryptosystem)). [Online; Citované: 20.2.2023].
23. 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].
24. 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].
25. 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].
26. HTTPS. [B.r.]. Dostupné tiež z: <https://en.wikipedia.org/wiki/HTTPS>. [Online; Citované: 20.2.2023].
27. [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].
28. 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].
29. 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].
30. SRIDEVI, Sridevi; D H, Manjaiah. Technical Overview of Virtual Private Networks(VPNs). *International Journal of Scientific Research*. 2012, roč. 2, s. 93–96. Dostupné z doi: 10.15373/22778179/JULY2013/32. [Online; Citované: 22.1.2022].
31. Virtual Private Networks Simplified. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://www.cisco.com/c/dam/en_us/training-events/le21/le34/downloads/689/academy/2008/sessions/BRK-134T_VPNs_Simplified.pdf. [Online; Citované: 26.1.2022].
32. LEVICKÝ, Dušan. *Kryptografia v informačnej bezpečnosti*. Elfa, 2005.

33. 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].
34. 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].
35. 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].
36. 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].
37. 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].
38. 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].
39. 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.
40. 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].
41. 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].

42. 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](https://doi.org/10.13154/tosc.v2018.i4.1-38). [Online; Citované:6.2.2022].
43. 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].
44. 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].
45. 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].
46. 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].
47. 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].
48. What is a ratchet? [B.r.]. Dostupné tiež z: <https://crypto.stackexchange.com/questions/39762/what-is-a-ratchet>. [Online; Citované: 1.1.2023].
49. Forward secrecy. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/Forward_secrecy. [Online; Citované: 1.1.2023].
50. Security level. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/Security_level. [Online; Citované: 1.1.2023].
51. Oracle VM Virtual Box. [B.r.]. Dostupné tiež z: <https://en.wikipedia.org/wiki/VirtualBox>. [Online; Citované: 20.1.2022].

52. 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].
53. ORACLE. 6.2. Introduction to Networking Modes. [B.r.]. Dostupné tiež z: <https://www.virtualbox.org/manual/ch06.html>. [Online; Citované: 26.1.2022].
54. 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].
55. WIKIPEDIA. Transmission Control Protocol. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://en.wikipedia.org/wiki/Transmission_Control_Protocol. [Online; Citované: 26.1.2022].
56. 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].
57. WIKIPEDIA. Endianita. [B.r.]. Dostupné tiež z: <https://sk.wikipedia.org/wiki/Endianita>. [Online; Citované: 20.2.2022].
58. 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].
59. MAN7ORG. Poll. [B.r.]. Dostupné tiež z: <https://man7.org/linux/man-pages/man2/poll.2.html>. [Online; Citované: 20.2.2022].
60. Bufferbloat. [B.r.]. Dostupné tiež z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Bufferbloat>. [Online; Citované: 1.3.2021].

Zoznam príloh

Príloha A CD médium – vid'. obsah CD média

A Obsah CD Média

Obsah tohto média je dostupný na gite:

- <https://github.com/mr171hg/DiplomaProject>

Pouzite obrazy, zdrojové kody...