VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2022 Dáša Sedláková


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS


# ÚTOK A OBRANA V PROSTŘEDÍ ENERGETICKÝCH PRŮMYSLOVÝCH POČÍTAČOVÝCH SÍTÍ

CYBER SECURITY FOR POWER ENGINEERING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS


AUTOR PRÁCE — Bc. Dáša Sedláková
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. Ing. Petr Mlýnek, Ph.D.
SUPERVISOR



BRNO 2022

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Informační bezpečnost**

Ústav telekomunikací

***Studentka:*** Dáša Sedláková ***ID:*** 222419

***Ročník:*** 2 ***Akademický rok:*** 2021/22

**NÁZEV TÉMATU:**

## Útok a obrana v prostředí energetických průmyslových počítačových sítí

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Cílem práce je prakticky otestovat známé nebo odhalit nové možnosti kybernetických útoků v prostředí průmyslové počítačové sítě postavené na přenosových technologií Ethernet a TCP/IP, kde jsou využívány protokoly dle norem IEC 60870-5 a IEC 61850 a také zhodnotit předpoklady pro využitelnost daných útoků. Praktické provedení útoků a jejich mitigace bude provedeno na reálných zařízeních s uvedenými normami (např. ochrany ABB REF 615). Výstupem práce je metodika proveditelnosti útoků a jejich mitigace s reálnými testy. Reálné testy na základě navržené metodiky proveditelnosti budou důkladně zdokumentovány pro jejich opakovatelnost.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] COLBERT, Edward J. Cyber-security of SCADA and other industrial control systems. New York, NY: Springer Science+Business Media, 2016. ISBN 978-33-1932-123-3.

[2] KOLOUCH, Jan a Pavel BAŠTA. CyberSecurity. Praha: CZ.NIC, z.s.p.o., 2019. ISBN 978-80-88168-31-7.

***Termín zadání:*** 7.2.2022 ***Termín odevzdání:*** 24.5.2022

***Vedoucí práce:*** doc. Ing. Petr Mlýnek, Ph.D.

**doc. Ing. Jan Hajný, Ph.D.**
předseda rady studijního programu

# Abstrakt

Priemyselné systémy sa z dôsledku konvergencie IT a OT sietí stávajú zraniteľné na rôzne formy bezpečnostných hrozieb vrátane neustále narastajúcich kybernetických útokov. Diplomová práca sa venuje analýze bezpečnostných odporúčaní stanovených súborom noriem IEC 62351, testovaniu zraniteľností priemyselných komunikačných protokolov (napríklad IEC 61850) a následnému návrhu mitigácií. Ako základ metodiky testovania zraniteľností je vybraný ATT&CK rámec pre ICS. Použitím vybraných taktík a techník z ATT&CK rámca sú prakticky testované skeny zraniteľností, útok napadnutia časovej synchronizácie SMV, GOOSE spoofing, MMS Man in the Middle a ICMP Flood. Testované útoky sú vyhodnotené prostredníctvom analýzy rizík. Následne sú navrhované mitigačné opatrenia na úrovni OT, IT, perimetrálnej a fyzickej úrovni.

# Kľúčové slová

Smart Grid, IEC 61850, IEC 62351, OT, Mitre ATT&CK, Nessus, Nexpose, SMV, GOOSE Spoofing, MMS Man in the Middle, ICMP Flood, Mitigácia

# Abstract

Due to the IT and OT networks convergence, industrial systems are becoming vulnerable to different forms of security threats including rapidly growing cyber-attacks. Thesis is focused on an analysis of security recommendations in IEC 62351, vulnerability testing of industrial communication protocols (e.g., IEC 61850) and mitigations proposal. An ATT&CK framework for ICS was chosen to become a methodology base for vulnerability testing. ATT&CK tactics and techniques were used to practically test vulnerability scans, SMV time synchronization, GOOSE spoofing, MMS Man in the Middle and ICMP Flood attacks. Attacks tested were evaluated with a risk analysis. Subsequently, mitigation measures were proposed on several levels (OT, IT, perimeter and physical level).

# Keywords

Smart Grid, IEC 61850, IEC 62351, OT, Mitre ATT&CK, Nessus, Nexpose, SMV, GOOSE Spoofing, MMS Man in the Middle, ICMP Flood, Mitigation

# Bibliografická citácia

SEDLÁKOVÁ, Dáša. *Útok a obrana v prostředí energetických průmyslových počítačových sítí* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/138121. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Petr Mlýnek.

# Prohlášení autora o původnosti díla

| | |
|---|---|
| **Jméno a příjmení studenta:** | **Bc. Dáša Sedláková** |
| **VUT ID studenta:** | **222419** |
| **Typ práce:** | **Diplomová práce** |
| **Akademický rok:** | **2021/22** |
| **Téma závěrečné práce:** | **Útok a obrana v prostředí energetických průmyslových počítačových sítí** |

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 23. května 2022 ----------

podpis autora

# Poďakovanie

Najväčšia vďaka patrí vedúcemu tejto diplomovej práce doc. Ing. Petrovi Mlýnkovi, Ph.D. za nekončiacu trpezlivosť, ústretovosť, rady a nasmerovanie po metodickej odbornej aj formálnej stránke. Veľmi si vážim, že to so mnou nevzdal ani po predĺžení a aj naďalej prácu viedol na vysoko odbornej úrovni s ľudským prístupom. Ďalej by som chcela poďakovať priateľovi Tomimu, mojej rodine a priateľom, ktorí mi poskytli dostatok priestoru a psychickej podpory na venovanie sa tomu, čo ma baví. V poslednom rade by som chcela poďakovať kolegom z práce, ktorý mi taktiež preukázali podporu, pochopenie a podali pomocnú technickú ruku, keď som ju potrebovala.

V Brně dne: 23. května 2022 ----------

podpis autora

# Obsah

# ZOZNAM OBRÁZKOV

# ZOZNAM TABULIEK

# Úvod

Konvergencia priemyselných OT sietí s tradičnými IT sieťami prináša celú radu prevádzkových benefitov vrátane jednotnej bezpečnostnej telemetrie. Priemyselné systémy už nie sú vyložene izolované a stávajú sa čoraz dostupnejšími pre účely vzdialenej správy, kontroly alebo opravy. Na jednej strane je konvergencia veľkým krokom vpred ku zdieľaniu dát, spolupráci, prehĺbenej viditeľnosti, a tým aj šetreniu zdrojov a výdavkov. Na druhej strane ale prináša nové bezpečnostné výzvy, ktoré sa stávajú jej neoddeliteľnou súčasťou a je potrebné na ich vznik patrične reagovať. Jedná sa napríklad o rozšírenie vektorov prieniku do infraštruktúry vrátane zneužitia ľudských zdrojov, možností laterálneho pohybu po infraštruktúre, ale aj zber a odcudzenie citlivých údajov. V kontexte prevádzkových technológií tak rastie pravdepodobnosť ich dosahu útočníkom a zneužitia často zastaralých a nedostatočne zabezpečených systémov.

Práca sa preto venuje komplexnému pohľadu na zaistenie bezpečnosti konvergovaných OT/IT sietí so zameraním na priemyselné energetické systémy, ktoré spadajú pod kritickú infraštruktúru a ich ochrana je preto mimoriadne dôležitá. V úvodnej časti práce je predstavený teoretický rámec energetických komunikačných protokolov s ich analytickým posúdením bezpečnosti. Následne sú prácou identifikované aktuálne bezpečnostné hrozby, medzi ktoré patria aj neustále narastajúce kybernetické úroky. Pre účel hodnotenia predpokladov a využiteľnosti kybernetických útokov je v práci predstavená metodológia analýzy rizík. Ich praktickému testovaniu je venovaná významná časť práce zakončená návrhom mitigačných opatrení.

# 1. SMART GRID

Označenie Smart Grid je využívané v energetickom priemysle pre modernú a rýchlo sa rozvíjajúcu podobu tradičnej elektrickej siete. Jedná sa o komplexný systém pre dodávku elektriny od jej výroby až k príjemcovi s dôrazom na integráciu komunikačných. operačných a informačných technológií pre vylepšenie celého procesu. Cieľom je zlepšenie spoľahlivosti, bezpečnosti a efektívnosti elektrického systému prostredníctvom obojsmernej sieťovej komunikácie a optimalizácie operácií, správy a plánovania [1]. Do systému sú tak integrované inteligentné elektrické zariadenia, vzdialené koncové jednotky, senzory, elektrické rozvodne, ochrany, SCADA a mnohé ďalšie systémy a zariadenia [2]. Hardware a software používaný na monitorovanie a riadenie fyzických komponentov priemyselnej siete je často označovaný ako prevádzková technológia (OT). Pre správnu interoperabilitu bola komunikácia v rámci Smart Grid štandardizovaná vo viacerých normách a protokoloch. Organizácia International Electrotechnical Commission (IEC) sa stará o prípravu a následne vydáva zmienené medzinárodné štandardy pre elektrotechnologické systémy. V tejto práci bude venovaná najväčšia pozornosť trom sadám noriem, ktoré definujú sieťovú komunikáciu a bezpečnosť v rámci Smart Grid. Tieto normy sú podľa IEC organizácie označované ako IEC 61850, IEC 60870-5 a IEC 62351.

## 1.1 IEC 61850

Súbor noriem IEC 61850 – Komunikačné siete a systémy v podriadených staniciach je medzinárodný štandard špecifikujúci metódy komunikácie a komunikačné protokoly pre podriadené stanice v oblasti energetiky. Českým ekvivalentom súboru noriem IEC 61850 je ČSN EN 61850, publikovaný pod súbornými názvami „Komunikační sítě a systémy v podřízených stanicích“ a „Komunikační sítě a systémy pro automatizaci v energetických společnostech“. IEC 61850 predstavuje jednotnú metódu tvorby energetických komunikačných sietí, kde medzi sebou môžu komunikovať zariadenia rôznych výrobcov [3]. Tento súbor noriem popisuje pravidlá pre komunikáciu medzi zariadeniami v rozvodniach, určuje požiadavky, ktoré by z hľadiska komunikácie mali rozvodne a ich zariadenia spĺňať, obsahuje definície komunikačných protokolov a štandardy pre riadiace funkcie a inžiniering rozvodní [4].

Veľkú časť komunikácie v elektrických rozvodniach tvoria inteligentné elektrické zariadenia (IED), ktorých cieľom je najčastejšie zbierať prevádzkové dáta, nastavovať parametre regulácie a jednotlivé zariadenia na diaľku konfigurovať a ovládať. Vďaka protokolom IEC 61580 je okrem zmienených cieľov možné dosiahnuť aj prenášanie súborov a dát s informáciami o aktivitách z IED do systémov SCADA, kde neskôr môžu byť použité k analýze udalostí. Protokoly IEC 61580 využívajú štandardnú technológiu Ethernet s MMS a TCP/IP, vďaka čomu je možné využiť mnoho známych nástrojov využívaných zariadeniami bežnej komunikačnej infraštruktúry. IEC 61580 špecifikuje dátové modely založené na objektovo orientovanom programovaní, čo prináša spojenie

programov a dát do objektov na jednom mieste, a to následne zjednodušuje modifikáciu vytvorených systémov a prispôsobenie novým požiadavkám. Dátové modely sú špecifické pre doménu, obsahujú sémantiku a ich základnými prvkami sú logické uzly, ktoré predstavujú informačný obsah internej funkcie pre automatizačný systém rozvodne alebo informáciu z externého procesného zariadenia. Pre výmenu informácií o konfigurácii je využívaný SCL jazyk založený na XML, vďaka čomu je možné využiť konfiguračné informácie aj mimo konkrétnej rozvodne. Architektúra komunikačného systému podľa IEC 61850 prináša veľkú komunikačnú flexibilitu, nakoľko je jej hlavná časť založená na type komunikácie klient-server. Oproti klasickej architektúre klient-server sa ale líši tým, že prináša možnosť aj klientskym staniciam aby riadili prenos dát. To dovoľuje presunúť riadiace a komunikačné funkcie bližšie k prevádzkovým procesom a vytvára tak flexibilitu v systéme. Ďalej zároveň podporuje metódy, ktoré môžu byť využité na rýchlu výmenu informácií v reálnom čase medzi IED. Mapovanie na už existujúce komunikačné protokoly ako je MMC a TCP/IP cez Ethernet rieši pomocou abstraktnej podoby v ACSI rozhraní [5].

### 1.1.1 Časti súboru noriem IEC 61850

Súbor noriem IEC 61850 sa skladá z niekoľko častí a rozšírení. Prvé štyri časti popisujú a špecifikujú prostredie, terminológiu, požiadavky na zariadenia atď. Ďalej časti 5 až 10 sa zaoberajú vlastnou komunikáciou. Jedná sa o [4] [6, 8, 9] :

1. IEC/TR 61850-1, v českej terminológii zavedená ako ČSN 33 4850-1 *Komunikační sítě a systémy v podřízených stanicích – Část 1: Úvod a přehled,* ktorá poskytuje úvod a prehľad o celom súbore noriem IEC 61850.
2. IEC/TS 61850-2, ako ČSN IEC/TS 61850-2 *Komunikační sítě a systémy v podřízených stanicích – Část 2: Výklad zvláštních výrazů*, ktorá obsahuje slovník základnej terminológie a výklad výrazov v kontexte systémov energetických služieb.
3. IEC 61850-3, je v ČR zavedená ako ČSN EN 61850-3 *Komunikační sítě a systémy v podřízených stanicích – Část 3: Všeobecné požadavky*, ktorá špecifikuje všeobecné požiadavky na komunikačnú sieť.
4. IEC 61850-4, resp. ČSN EN 61850-4 *Komunikační sítě a systémy v podřízených stanicích – Část 4: Systémové a projektové řízení*, ktorá sa sústreďuje na požiadavky systémového a projektového riadenia a na špeciálne podporné nástroje pre inžinierske práce a systém skúšok rozvodní.
5. IEC 61850-5, resp. ČSN EN 61850-5 *Komunikační sítě a systémy v podřízených stanicích – Část 5: Požadavky na komunikaci pro funkce a modely zařízení,* je časť, ktorá špecifikuje komunikačné požiadavky vykonávaných funkcií v systémoch pre automatizáciu energetických služieb a na modely zariadení.
6. IEC 61850-6, resp. ČSN EN 61850-6 *Komunikační sítě a systémy v podřízených stanicích – Část 6: Konfigurační popisový jazyk pro komunikaci v elektrických stanicích*, ktorá sa zaoberá špecifikáciou formátu súborov pre popis konfigurácie jednotlivých IED a súborov parametrov spojených s komunikáciou a konfiguráciou komunikačného systému. Spolu s časťami 5 a 7 zaisťuje kompatibilitu inžinierskych nástrojov od rôznych dodávateľov.
7. IEC 61850-7 je ďalej rozdelená na niekoľko dielov:

a. IEC 61850-7-1, resp. ČSN EN 61850-7-1 *Komunikační sítě a systémy v podřízených stanicích – Část 7-1: Základní komunikační struktura pro podřízené stanice a napájecí zařízení – Zásady a modely*, poskytuje prehľad o architektúre komunikačných systémov a interakcií medzi zariadeniami rozvodní. Ďalej obsahuje popis vzťahov medzi ostatnými časťami IEC 61850-7-x a popis dosiahnutia interoperatibility zariadení.
b. IEC 61850-7-2, resp. ČSN EN 61850-7-2 *Komunikační sítě a systémy v podřízených stanicích – Část 7-2: Základní komunikační struktura pro podřízené stanice a napájecí zařízení – Abstraktní rozhraní pro komunikační služby (ACSI)*, popisuje dve rozhrania: prvé pre komunikáciu medzi klientom a vzdialeným serverom a druhé pre rýchle a spoľahlivé šírenie informácií o časovo kritických udalostiach v rámci celého systému rozvodne a na prenos súborov vzorkovaných hodnôt.
c. IEC 61850-7-3, resp. ČSN EN 61850-7-3 *Komunikační sítě a systémy v podřízených stanicích – Část 7-3: Základní komunikační struktura pro podřízené stanice a napájecí zařízení – Obecné třídy dat*, ktorá špecifikuje triedy dát pre informácie o stave zariadenia, vzorkovaných veličinách, informácie spojené s riadením stavu zariadení. Informácie o analógových žiadaných veličinách v regulačných slučkách a o konfigurácii zariadení.
d. IEC 61850-7-4, resp. ČSN EN 61850-7-4 *Komunikační sítě a systémy v podřízených stanicích – Část 7-4: Základní komunikační struktura pro podřízené stanice a napájecí zařízení – Třídy kompatibilních logických uzlů a třídy dat*, stanovuje názvy kompatibilných logických uzlov a názvy dát pre komunikáciu medzi programovateľnými elektronickými zariadeniami, vrátane vzťahu medzi logickými uzlami a dátami.
e. IEC 61850-7 má ďalej dva doplnkové diely, IEC 61850-7-410, resp. ČSN EN 61850-7-410 *Komunikační sítě a systémy pro automatizaci v energetických společnostech – Část 7-410: Vodní elektrárny – Komunikace pro sledování a řízení* a IEC 61850-7-420, resp. ČSN EN 61850-7-420 *Komunikační sítě a systémy pro automatizaci v energetických společnostech – Část 7-420: Základní komunikační struktura – Logické uzly pro decentralizované zdroje elektrické energie*.

8. IEC 61850-8-1, resp. ČSN EN 61850-8-1 *Komunikační sítě a systémy v podřízených stanicích – Část 8-1: Mapování specifických komunikačních služeb (SCSM) – Mapování na MMS (ISO 9506-1 a ISO 9506-2) a na ISO/IEC 8802-3,* špecifikuje metódy pre výmenu časovo kritických a nekritických dát po sieťach LAN pomocou mapovania ASCI na MMS a na rámce Ethernet z ISO/IEC 8802-3 (IEEE 802.3).
9. IEC 61850-9-1, resp. ČSN EN 61850-9-1 *Komunikační sítě a systémy v podřízených stanicích – Část 9-1: Mapování specifických komunikačních služeb (SCSM) – Přenos vzorkovaných hodnot po sériovém jednosměrném (neorientovaném) vícebodovém spoji bod-bod*. Časť definuje mapovanie špecifických komunikačných služieb pre komunikáciu na úrovni poľa rozvodne. Platí pre elektronické transformátory s digitálnym vstupom cez zlučovaciu jednotku.
10. IEC 61850-9-2, resp. ČSN EN 61850-9-2 *Komunikační sítě a systémy v podřízených stanicích – Část 9-2: Mapování specifických komunikačních služeb (SCSM) – Vzorkované hodnoty z ISO/IEC 8802-3*, je stanovené mapovanie SCSM pre prenos vzorkovaných hodnôt v súlade s abstraktné špecifikáciou podľa IEC 61850-7-2.

11. IEC 61850-10, resp. ČSN EN 61850-10 *Komunikační sítě a systémy v podřízených stanicích – Část 10: Zkoušky shody*, stanovuje metódy a popisuje abstraktné prípady skúšok pre skúšanie zhody zariadení používaných v automatizovaných systémoch rozvodní.

## 1.2 Komunikácia podľa IEC 61850

Ako bolo spomínané v podkapitole 2.1, IEC 61850 popisuje komunikáciu a prenos dát s využitím moderných technológií počítačových sietí prostredníctvom modelov TCP/IP, ISO/OSI a techník zapuzdrovania do Ethernetu. TCP/IP a ISO/OSI sú referenčné modely, ktoré rozdeľujú sieťovú komunikáciu do jednotlivých vrstiev a tým poskytujú koncepčný rámec, ktorý štandardizuje komunikáciu medzi heterogénnymi sieťami. IEC 61850 umožňuje využívať IP siete a komunikáciu uplatňujú tri hlavné služby, ktoré je možné rozdeliť na časovo kritické služby 1) Sampled Values (SV), 2) Generic Object Oriented Substation Event (GOOSE) a časovo nekritické 3) Manufacturing Messaging Specification (MMS) [10].

### 1.2.1 Sampled Mesured Values (SMV)

SV predstavujú nespracované vzorkované dáta komunikované senzormi umiestnenými na primárnych zariadeniach energetických systémov. Dáta sú zvyčajne prenášané sériovými optickými vláknami do spojovacej jednotky (Merging Unit, MU), kde sú zapuzdrené do eternetových rámcov a pomocou multicast alebo unicast prenosu odoslané do ďalších komponentov [11].

### 1.2.2 Generic Object Oriented Substation Event (GOOSE)

GOOSE sa používa pre vytváranie objektovo orientovaných udalostí rozvodne a je dôležitou funkciou pre ochranu, kontrolu a automatizáciu podriadených staníc. Takisto ako SV správy bývajú GOOSE zapuzdrené priamo do eternetového rámcu, čo zlepšuje výkon v reálnom čase vďaka skracovaniu eternetových rámcov (skrátenie o réžiu protokolu vyššej vrstvy) a zníženiu času spracovania. Priame zapuzdrenie do ethernetu umožňuje využívanie hodnôt prioritných značiek na oddelenie kritického a vysoko prioritného prenosu od prenosu s nižšou prioritou. GOOSE pomocou multicastu poskytuje efektívny spôsob súčasného doručovania informácií o udalosti rozvodne pre viacero fyzických zariadení. Stavové dáta a hodnoty premenných sú pri prenose zoskupené do jedného dátového objektu a prenášané v danom časovom intervale. Na GOOSE komunikáciu sú vzhľadom na jej dôležitú funkciu kladené prísne požiadavky na rýchlosť a spoľahlivosť [12].

GSSE (Generic Substation Status Event) je oproti GOOSE generická stavová udalosť rozvodne. Prostredníctvom GSSE sa prenášajú iba stavové dáta. Využíva sa pritom stavový zoznam, teda reťazec bitov a nie dátový objekt. Správy GSSE sú typicky prenášané prostredníctvom MMS. V porovnaní s GOOSE trvá ich spracovanie a prenos dlhšie [13].

### 1.2.3 Manufacturing Messaging Specification (MMS)

MMS je medzinárodný štandard služieb používaný na spoľahlivú komunikáciu v reálnom čase zahŕňajúcu prenos procesných údajov a informácií o kontrole medzi zariadeniami v sieti a/alebo aplikáciami. Oproti SV a GOOSE je MMS protokol mapovaný priamo na aplikačnú vrstvu referenčného modelu ISO/OSI. MMS komunikácia je štruktúrovaná do dvoch odlišných rolí: MMS klient a MMS server. Klient je užívateľ, ktorý zadáva požiadavku a server je užívateľ, ktorý vykonáva požadovanú akciu alebo generuje požadovanú odpoveď. Väčšinou sa používa v automatizačných a riadiacich funkciách. MMS nemá žiadne výslovné požiadavky na načasovanie, ktoré výrazne uľahčujú zabezpečenie takejto komunikácie [14].

## 1.3 IEC 60870

IEC 60870 je komplexný súbor noriem pre vzdialenú správu v elektrotechnike a aplikáciách automatizácie energetických systémov. V českej terminológii je súbor zavedený ako ČSN EN 60870 s názvom „*Systémy a zařízení pro dálkové ovládání“*. Súbor pozostáva zo šiestich častí, kde piata časť sa zaoberá komunikáciou medzi SCADA systémami a ďalšími stanicami (jedná sa napríklad o primárne stanice – CC a sekundárne stanice - RTU). Využíva komunikáciu cez sériové linky (časť 101) aj cez siete (časť 104) [15] [16].

Prvé dve časti IEC 60870-1 a 60870-2 tvoria úvod do celého súboru noriem a zaoberajú sa všeobecnými zásadami, návodmi pre špecifikácie, výkladom výrazov, prevádzkovými podmienkami a podobne.

Tretia časť IEC 60870-3 popisuje elektrické charakteristiky rozhraní tak, aby bolo možné prepojenie rôznych prvkov do funkčného systému a následnej vzdialenej správy užívateľom.

Štvrtá časť 60870-4 sa zaoberá požiadavkami na vlastnosti, ktoré majú vplyv na prevádzku systémov vzdialenej správy a súvisia s vlastnosťami aplikácií a funkciami spracovania dát. Ďalej je tu zahrnutý súbor pravidiel pre hodnotenie a špecifikáciu požiadaviek na výkon podľa klasifikácie do výkonnostných tried [17].

## 1.4 Komunikácia podľa IEC 60870

Práve piata časť súboru noriem IEC 60870 je výrazne dôležitá pre komunikáciu systémov, pretože poskytuje komunikačný profil na zasielanie základných telekontrolných správ. Piata časť sa skladá zo šiestich hlavných častí a ďalších doplňujúcich [15][17]:

1. IEC 60870-5-1 Formáty prenosového rámca, kde sú popísané operácie fyzickej a linkovej vrstvy ako napríklad využitie protokolov half-duplex a full-duplex, štandardov pre kódovanie, formátovanie, synchronizácia rámcov alebo výber medzi 4 typmi rámcov linkovej vrstvy.

2. IEC 60870-5-2 Procedúry spojového prenosu, ktorá popisuje služby a procedúry pre sériový prenos dát. Definuje ďalej aj činiteľa inicializácie prenosu.
3. IEC 60870-5-3 Všeobecná štruktúra aplikačných dát, špecifikuje všeobecnú štruktúru dát na aplikačnej vrstve a pravidlá pre štruktúru jednotiek aplikačných dát v prenosových rámcoch.
4. IEC 60870-5-4 Definícia a kódovanie aplikačných informačných prvkov, popisuje pravidlá pre definovanie informačných prvkov a bežne používané informačné prvky a procesné parametre v aplikáciách.
5. IEC 60870-5-5 Základné aplikačné funkcie, definuje štandardy pre zaistenie interoperability zariadení v elektrizačnej sústave.
6. IEC 60870-5-6 Pokyny pre testovanie zhody pre sprievodné normy IEC 60870-5.

### 1.4.1 IEC 60870-5-101

Komunikačný protokol IEC 60870-5-101 patrí pod súbor noriem IEC 60870-5 a primárne určuje funkčný profil pre základné úlohy diaľkového ovládania (monitorovanie, kontrolu a súvisiacu komunikáciu pre telekontrolu, teleochranu a telekomunikácie pre energetické systémy). Definuje komunikácie medzi dvoma systémami (napríklad riadiacou stanicou a podriadenou stanicou) prepojenými permanentným dátovým obvodom (sériová linka). Je založený na architektúre EPA (Enhanced Performance Architecture), ktorá obsahuje iba tri vrstvy modelu ISO/OSI: fyzickú vrstvu, linkovú vrstvu a aplikačnú vrstvu.

Fyzická vrstva protokolu IEC 60870-5-101 definuje hardvérovo závislé špecifikácie komunikačného rozhrania IEC 60870-5-101. Táto vrstva ďalej poskytuje binárny symetrický a bez pamäťový prenos medzi DCE (zariadenie na ukončenie dátových obvodov) a DTE (dátové koncové zariadenie) primárnych (riadiacich) a sekundárnych (riadených) staníc.

Vrstva dátového spoja (linková vrstva) protokolu IEC 60870-5-101 definuje rámcové formáty a postupy prenosu komunikácie IEC. Linková vrstva pozostáva z niekoľkých postupov pre prenos linkami použitím výhradných Link Protocol Control Information (LPCI). Tieto procedúry sú schopné prenášať ASDU ako spojové užívateľské dáta. Linková vrstva prijíma, vykonáva a riadi funkcie prenosovej služby požadované vo vyšších vrstvách. Taktiež postupne po jednom riadi prenos rámcov a hlási úspech alebo neúspech prenosu do vyšších vrstiev spolu so stavom prenosového vedenia a stanice. Norma IEC 60870-5-101 definuje dva rôzne typy rámcov, rámec s pevnou dĺžkou (používaný pre riadiace správy) a rámec s premennou dĺžkou (používaný na prenos správ na úrovni aplikácie).

Aplikačná vrstva protokolu IEC 60870-5-101 definuje informačné prvky na štruktúrovanie dát aplikácií a funkcií komunikačných služieb. Aplikačná vrstva obsahuje množstvo „aplikačných funkcií“, ktoré zahŕňajú prenos ASDU medzi zdrojom a cieľom. Používa implicitné informácie o riadení protokolu. Táto vlastnosť je implicitná v obsahu

polí identifikátora dátových jednotiek ASDU a v type použitej linkovej služby. Link Protocol Data Unit (LPDU) obsahuje iba jedno ASDU, ktoré je zložené z identifikátora dátovej jednotky a jedného alebo viacerých informačných objektov. Správa odoslaná IEC 60870-5-101 môže nadobúdať dva smery komunikácie. Kontrolný smer, kde sa jedná o komunikáciu od riadiacej stanice smerom k vzdialenej stanici. Monitorovací smer, kde sa jedná o komunikáciu od vzdialenej stanice na riadiacu stanicu [15] [17].

### 1.4.2 IEC 60870-5-104

Protokol EC 60870-5-104 (IEC 104) je súčasťou normy IEC 60870-5 pre zariadenia a systémy, ktoré odosielajú dozorné údaje a požiadavky na zber dát v elektrickom inžinierstve a automatizačných aplikáciách energetických systémov. Protokol poskytuje komunikačný profil na zasielanie základných telekontrolných správ medzi dvoma systémami v elektrotechnike a automatizácii energetických systémov. Protokol IEC 60870-5-104 je obdobou protokolu IEC 60870-5-101 a zatiaľ čo časť -101 špecifikuje mechanizmy prenosu dát, časť -104 stanovuje/odporúča ich použitie v bežných komunikačných sieťach, TCP/IP. Uvádza základné typy ASDU pre prevádzkové informácie v smere ovládania aj sledovania. Stanovuje požiadavky nevyhnutné pre funkčnú spoluprácu zariadení od rôznych výrobcov [15] [17].

## 1.5 IEC 62351

IEC 62351 je súbor noriem, ktorý sa predovšetkým zameriava na zdokonalenie bezpečnosti v systémoch a protokoloch, ktoré sa používajú v automatizačných systémoch distribúcie energie. Súbor noriem obsahuje ustanovenia informačnej bezpečnosti pre operácie riadenia energetických systémov a celkovým cieľom je zabezpečiť vlastnosti dôvernosti, integrity, dostupnosti, autentizácie a neodmietnutia v energetickom systéme, najmä zavedením autentifikačných mechanizmov [18].

### 1.5.1 Prehľad častí súboru noriem IEC 62351

Súbor noriem IEC 62351 je rozdelený do hlavných 10 častí, pričom každá sa zameriava na určitú oblasť systémov, protokolov alebo procedúr [18, 19]:

1. IEC 62351-1 obsahuje prehľad štandardu, ciele, úvod k ďalším častiam, bezpečnosť a hrozby a možné protiopatrenia.
2. IEC 62351-2 obsahuje definície termínov.
3. IEC 62351-3 stanovuje bezpečnosť na základe TCP/IP pre automatizované systémy v energetike. Zaoberá sa využitím TLS x X.509 certifikátmi, zaistením autenticity a integrity na sieťovej vrstve, dôvernosťou pomocou šifrovacích mechanizmov TLS. 3. časť normy ďalej stanovuje využitie obojstrannej autentizácie certifikátmi (klient aj server) a predpisuje algoritmy, stanovuje minimálne dĺžky používaných kľúčov a určuje postup spracovania tzv. revocation certifikátov.
4. IEC 62351-4 sa zameriava na bezpečnosť profilov ako napríklad MMS, ISO 2014 (IEC 61850-8-1 a IEC 60870-6). Obsahuje odporúčania pre používanie A-profilu, kde hovorí o využití X.509 certifikátov pre autentizovanie aplikácií a T-profilu, kde opisuje ako použiť TLS ako vrstvu medzi TCP a ISO Transport Service a stanovuje TLS šifry, ktoré musia byť podporované.
5. IEC 62351-5 stanovuje bezpečnosť pre protokoly IEC 60870-5, DNP3, message-based protokoly, kde opisuje autentizáciu per-message. V stanovách berie do úvahy limitovanú procesnú silu a ďalej sa zaoberá napríklad popisom vzdialenej aktualizácie kľúčov používaných pre šifrovanie.
6. IEC 62351-6 stanovuje bezpečnosť pre protokol MMS IEC 61850 a priamu aplikáciu časti IEC 62351-4. Popisuje bezpečnostné rozšírenie 61850 GOOSE a SV pridaním security poľa do PDU a rozširuje Substation Configuration Language o povolenie definície certifikátov.
7. IEC 62351-7 popisuje využitie SNMP na správu operácií systémov a využívanie modelov dátových objektov.
8. IEC 62351-8 Stanovuje kontrolu prístupu. Rozdeľuje priamy a vzdialený prístup a prístup človeka a automatizovaného stroju. Stanovuje 3 formáty prístupových tokenov – X.509 ID certifikáty s rozšíreniami, X.509 atribútové certifikáty a softvérové tokeny.
9. IEC 62351-9 popisuje štandardizáciu používaných certifikátov a management kľúčov. Definuje ako ich generovať, distribuovať a narábať s nimi.

10. IEC 62351-10 stanovuje smernicu pre architektúru energetických systémov, náhľad bezpečnostných kontrol a podobne.
11. IEC 62351-11 definuje zabezpečenie súborov XML. Poskytuje mechanizmus na autentifikáciu zdroja súboru a mechanizmus na detekciu neoprávnenej manipulácie.

# 2. ANALÝZA A VYHODNOTENIE NORIEM A ŠTANDARDOV

Súbory noriem a štandardov teoreticky popísané v predošlých kapitolách sa stali významným prvkom v zaistení interoperability zariadení, sieťovej komunikácie ale aj bezpečnosti v energetickom priemysle. Nakoľko sa ale jedná o komplexné a kritické systémy, je dôležité prikladať dôraz nielen na aplikovanie noriem a štandardov ako takých, ale hlavne na vhodnosť ich aplikácie a časovú relevantnosť stanov z noriem vyplývajúcich. Táto kapitola je z tohto dôvodu zameraná na analýzu a vyhodnotenie stanov, ktoré zo súborov noriem vyplývajú s dôrazom na aktuálnosť odporúčaných bezpečnostných štandardov a relevantnosti ich aplikácie.

Aktuálnosť bezpečnostných štandardov bude v kapitole analyzovaná na základe odporúčaní vydanými významnými organizáciami, ktoré cielia na oblasť kybernetickej bezpečnosti. Medzi tieto organizácia patrí Národní úřad pro kybernetickou a informační bezpečnost (NÚKIB), National Institute for Standard and Technology (NIST) a European Union Agency for Cybersecurity (ENISA) [20, 21, 22].

## 2.1 Analýza a vyhodnotenie IEC 61850

Súbor noriem IEC 61850 je v rámci energetických systémov jedným z najdôležitejších a najpoužívanejších štandardov pre automatizáciu rozvodní, najmä vďaka jeho objektovo orientovanému a interoperabilnému dizajnu. Súbor noriem IEC 61850 definuje rôzne protokoly pre výmenu informácií, nedefinuje však ako tento prenos zabezpečiť. Zabezpečenie týchto protokolov je preto odkázané na aplikovaní ďalších bezpečnostných postupov, ktoré napríklad definuje práve IEC 62351.

### 2.1.1 GOOSE a Sampled Measured Values (SMV)

Z rôznych komunikačných protokolov IEC 61850 je bezpečnosť GOOSE správ o niečo kritickejšia, nakoľko prenáša časovo dôležité informácie týkajúce sa prevádzky energetického systému. Ak dôjde k narušeniu GOOSE správy, môže to mať katastrofické dopady na prevádzku časti alebo celku energetického systému. IEC 62351-1 identifikuje autentickosť a integritu správ GOOSE/SV za najdôležitejšie bezpečnostné požiadavky a ich naplneniu sa venuje v časti IEC 62351-6 aplikovaním kryptografických algoritmov. Práve u kryptografických algoritmov je možné identifikovať hneď niekoľko výziev. V prvom rade hrá významnú rolu prísna časová požiadavka na doručenie GOOSE správ do 3 ms. Ďalšie problémy môžu nastať v hardwarovej predispozícií komunikujúcich zariadení, ktoré sú často limitované pamäťou a výpočtovým výkonom.

Stanovy podľa IEC 62351-6-2007 popisujú použitie digitálnych podpisov generovaných hashovacím algoritmom SHA256 a následným podpisom hodnôt hashu algoritmom RSASA-PSS a RSA algoritmom pre vytvorenie kľúčov. Tento digitálny podpis by mal byť generovaný pre každú GOOSE/SV správu a následne k správe pripojený ako nové pole rozšírenia Extensions. Celková pridaná réžia síce záleží od dĺžky

použitých kľúčov a výkonu procesoru, ale v reálnom nasadení aj pri minimálnych štandardoch je veľmi náročné dosiahnuť stanovenú rýchlosť doručenia správ. Z tohto dôvodu novela pôvodného štandardu, IEC 62351-6-2020 navrhuje alternatívu digitálnemu podpisu, použitím symetrického algoritmu Message Authentication Code (MAC), kedy v reálnom nasadení aj pri minimálnych kryptografických štandardoch už je možné dosiahnuť časovú požiadavku správ. Hodnota MAC je znovu pridávaná ako nové pole rozšírenia Extensions. Na druhej strane je možné za nevýhodu MAC algoritmu považovať nutnosť pred-zdieľaných kľúčov pre obe strany, kde je potrebné dbať na ich správnu distribúciu, časovú platnosť, uchovávanie, zmenu a súčinné operácie [19]. Stanovy v IEC 62351 popisujú minimálne kryptografické algoritmy odporúčané pre využitie v sieťovej komunikácii. Ich relevantnosť a vyhodnotenie je popísané v tabuľke 2.1, zobrazenej nižšie.

Tabuľka 2.1 Analýza a vyhodnotenie kryptografických algoritmov podľa IEC 62351

| **Odporúčanie podľa IEC 62351** | **Stanovisko NÚKIB, NIST a ENISA** | **Vyhodnotenie** |
|---|---|---|
| SHA-256 | Aktuálne bezpečné | U starších systémov je využitie SHA-256 v poriadku, pre novo implementované systémy, prípadne s ohľadom do budúcna je odporúčané využitie minimálne SHA-384. |
| RSA-1024 (spätná kompatibilita) | Aktuálne neodporúčané | RSA-1024 bolo považované za bezpečné do roku 2020, z tohto dôvodu je odporúčané využiť RSA s dĺžkou kľúčov minimálne 2048b. |
| RSA-2048 | Aktuálne bezpečné | U starších systémov je použitie RSA-2048, s ohľadom do budúcna (2030) je odporúčané využiť RSA-3072. |
| RSASSA-PSS | Aktuálne bezpečné s dosluhujúcou dĺžkou kľúčov 2048b | Bezpečné do budúcna (2030) s využitím dĺžky kľúčov minimálne 3072b. |
| ECDSA-256 | Aktuálne bezpečné | U starších aj nových systémov je využitie ECDSA-256 v poriadku, s ohľadom do budúcna je odporúčané zvážiť použitie silnejšieho ECDSA-512. |
| ECDSA-512 | Aktuálne bezpečné | Bezpečné aj do budúcna (2030). |
| HMAC-SHA256-224 | Dosluhujúce | Výstup veľkosti 224b je dostačujúci, ale do budúcna je odporúčaný minimálne 256b, ideálne 384b a viac. |
| HMAC-SHA256-256 | Aktuálne bezpečné | Bezpečné aj do budúcna (2030), odporúčané je využitie veľkosti výstupu minimálne 384b. |

### 2.1.2 Manufacturing Message Specification (MMS)

Ďalšou kritickou službou je protokol MMS definovaný v IEC 61850. Norma IEC 62351 vzhľadom k MMS stanovuje za dôležité bezpečnostné požiadavky dôvernosť, integritu a autenticitu. Bezpečnosť v MMS je podľa IEC 62351-4:2007 delená cez OSI vrstvy na transportný profil (fyzická vrstva, linková vrstva, sieťová vrstva a transportná vrstva) a aplikačný profil (relačná vrstva, prezentačná vrstva a aplikačná vrstva).

Na úrovni transportného profilu je podľa normy IEC 62351-4 odporúčané využívať TLS 1.2 definované podľa RFC 5246 s využitím špeciálneho TCP portu 3782 miesto štandardného TCP 102. Minimálnou požiadavkou na použitý súbor šifier sa podľa normy stáva TLS_DH_DSS_WITH_AES_256_CBC_SHA pre natívny režim. Vo výnimočných prípadoch pre kompatibilný režim je možné využiť minimálne TLS 1.0. Nakoľko je protokol TLS 1.0 považovaný za bezpečnostne nedostačujúci a náchylný na rôzne formy útokov, je použitie vysoko neodporúčané a preferované by malo byť použitie TLS 1.2 alebo TLS 1.3. Pre zaistenie autenticity komunikujúcich strán je štandardom odporúčané využitie certifikátov formátu X.509 s maximálnou veľkosťou 8192B.

Na úrovni aplikačného profilu dochádza k deleniu na peer-to-peer bezpečnostnú špecifikáciu (P2P profil) a end-to-end aplikačnú bezpečnosť (E2E profil). P2P profil stanovuje zaistenie autentifikácie prostredníctvom pridania autentifikačnej informácie do asociačných správ. Tieto informácie sa skladajú zo zakódovaného X.509 certifikátu, digitálneho podpisu a časovej hodnoty. Na rozdiel od E2E bezpečnostného profilu je pri P2P profile nutná implementácia transportného profilu pre zaistenie bezpečnej komunikácie [26].

Pridanie TLS zabezpečenia ale zároveň zavádza výpočtové latencie pri spracovaní MMS správ, ktorých veľkosť závisí od použitých šifrovacích algoritmov. MMS správy ale nie sú časovo kritické ako GOOSE správy, preto je pridanie zabezpečenia vysoko odporúčané [22]. IEC 62351 stanovuje minimálne kryptografické algoritmy, ktoré sú odporúčané pre využitie v TLS. Nakoľko TLS 1.0 už nie je vo všeobecnosti považovaná za bezpečnú, sú prezentované výsledky vyhodnotenia a relevantnosti algoritmov pre TLS 1.2, zobrazené v tabuľke 2.2 nižšie. Ďalej je dôležité poznamenať, že implementácie MMS by mali zaistiť podporu TLS verzií 1.0 a 1.1 z dôvodu spätnej kompatibility aj napriek ich aktuálnemu nevyužívaniu.

Tabuľka 2.2 Analýza a vyhodnotenie TLSv1.2 podľa IEC 62351

| **Odporúčanie podľa IEC 62351 pre TLS 1.2** | **Stanovisko NÚKIB, NIST a ENISA** | **Vyhodnotenie** |
|---|---|---|
| TLS_RSA_WITH_AES_128_CBC_SHA256 | Dosluhujúce | Aktuálne bezpečné, ale cipher suite by mal byť rozšírený o minimálne DHE algoritmus a CBC by malo byť nahradené GCM. |
| TLS_DH_RSA_WITH_AES_128_CBC_SHA256 | Nedostatočné | DH nepodporuje funkciu PFS, čím sa komunikácia stáva náchylná na útoky a cipher suite preto nie je odporúčané používať. Navyše CBC by malo byť nahradené GCM. |
| TLS_DH_RSA_WITH_AES_128_GCM_SHA256 | Nedostatočné | DH nepodporuje funkciu PFS, čím sa komunikácia stáva náchylná na útoky a cipher suite preto nie je odporúčané používať. |
| TLS_DHE_RSA_WITH_AES_128_GCM_SHA256 | Bezpečné | Odporúčané je zvýšiť dĺžku výstupu hashovacej funkcie na 384b. |
| TLS_DH_RSA_WITH_AES_256_GCM_SHA384 | Nedostatočné | DH nepodporuje funkciu PFS, čím sa komunikácia stáva náchylná na útoky a cipher suite preto nie je odporúčané používať. |
| TLS_ECDHE_RSA_WITH_AES_128_GCM_SHA256 | Bezpečné | Bezpečné a odporúčané aj do budúcna. (2030) |
| TLS_ECDHE_RSA_WITH_AES_256_GCM_SHA384 | Bezpečné | Bezpečné a odporúčané aj do budúcna. (2030) |
| TLS_ECDHE_ECDSA_WITH_AES_128_GCM_SHA256 | Bezpečné | Bezpečné a odporúčané aj do budúcna. (2030) |

## 2.2 Analýza a vyhodnotenie IEC 60870-5

Súbor noriem IEC 60870-5 definuje dôležité komunikačné protokoly a štandardy najmä pre telekontrolu (SCADA systémy) a aplikácie automatizácie energetických systémov. Podobne ako súbor noriem IEC 61850, tak ani IEC 60870-5 sám o sebe nedefinuje zabezpečenie komunikácie a je preto takisto nutné aplikovanie ďalších bezpečnostných postupov, akým je práve IEC 62351, ktoré vo svojom znení bezpečnosť IEC 60870-5 priamo adresuje. Najdôležitejšou časťou sa stáva IEC 62351-5, ktorá poskytuje rôzne riešenia pre sériovú komunikáciu (predovšetkým IEC 60870-5-101) a sieťovú komunikáciu (predovšetkým IEC 60870-5-104).

Jadrom tejto časti sa stáva odporúčanie autentifikačného mechanizmu používajúceho HMAC s pred zdieľanými kľúčmi pre zaistenie požiadavky na integritu, spolu so

stanovami na vzdialenú aktualizáciu kľúčov (symetrických aj asymetrických). Komplikácie ale môžu nastať hneď v niekoľkých prípadoch. Prvým nedostatkom štandardu je stanovenie zneplatnenia kľúčov relácie pokiaľ stanica obdrží viacero správ, ktoré obsahujú neplatné autentifikačné údaje. Stanica sa následne nepokúša o opätovné zadanie kľúča sama od seba ale iba v dôsledku ďalšej udalosti (ako napríklad reštart zariadenia alebo vypršanie doby platnosti kľúča). Riešením by preto mala byť buď implementácia mechanizmu, ktorý by opätovné zadanie kľúča povolil alebo prehodnotenie vynucovania zneplatnenia kľúča po prijatí viacerých správ s neplatnými autentifikačnými údajmi.

Štandard IEC 62351-5 ďalej stanovuje, že zatiaľ čo stanica čaká na odpoveď na autentifikačnú výzvu, mala by zahodiť všetky nesúvisiace správy prijaté v medzičase. Tento mechanizmus je ale rizikový, nakoľko otvára príležitosť útočníkovi udržiavať stanicu v stave zahadzovania všetkých správ [18].

Najvážnejším rizikom, ktoré IEC 62351 adresuje je, že na aplikačnej vrstve dáta tečú nešifrovane, čo umožňuje hneď niekoľko útokov. Toto riziko sa týka oboch protokolov IEC 60870-5-101 aj -104, nakoľko sú obidva protokoly mapované okrem iného aj na aplikačnú vrstvu. IEC 62351 toto riziko adresuje odporúčaním pre použitie TLS protokolu, ktorý je popísaný v časti IEC 62351-3 a rieši bezpečnostné požiadavky na integritu aj dôvernosť správ. Analýza konkrétnych odporúčaných kryptografických algoritmov je popísaná v Tabuľke 2.1 a 2.2 tohto dokumentu.

## 2.3 Súhrn vyhodnotenia IEC 62351

Súbor noriem IEC 62351 definuje riziká technológii energetického priemyslu, ktoré následne adresuje priamymi a najmä konkrétnymi mechanizmami pre ich minimalizáciu. Veľkým prínosom súboru noriem je, že odporúčané mechanizmy sú priebežne vyhodnocované v spolupráci s bezpečnostnými organizáciami ako napríklad NIST alebo NSA. Nevýhodou naopak, že aktualizácie častí noriem nie sú tak dynamické ako technologický posun. Čo môžeme pozorovať napríklad z vyhodnotenia odporúčaných algoritmov v tabuľke 2.1 a tabuľke 2.2 tohto dokumentu. Nakoľko je v rámci energetického priemyslu nevyhnutné zachovať možnosti spätnej kompatibility, normy a následne aj implementácie v praxi budú vždy obsahovať slabšie bezpečnostné varianty. Tieto varianty bezpečnostných mechanizmov tak môžu byť útočníkmi využité ako jeden z primárnych vektorov útokov. Čím prichádza v dôležitosť časť normy IEC 62351-7, ktorá navrhuje mechanizmus sledovania stavu sietí a systémov a najmä zisťovanie možných narušení bezpečnosti. Každá podozrivá komunikácia (napríklad využitie slabších bezpečnostných algoritmov) by mala byť operátorovi oznámená alarmom, prípadne priamo blokovaná pomocou bezpečnostných riešení ako napríklad IPS alebo firewall.

# 3. BEZPEČNOSTNÉ HROZBY

V kontexte Smart Grid prevádzka energetického systému silno závisí od presných a aktuálnych informácií. Informačná a prevádzková infraštruktúra musí byť udržiavaná a riadená tak, aby jej spoľahlivosť bola na dostatočne vysokej úrovni, podobne ako je spoľahlivosť celkovej infraštruktúry energetického systému. Energetický systém predstavuje kritickú infraštruktúru a je vystavovaný rôznym kybernetickým útokom a škodlivým činnostiam. Vo všeobecnosti komunikačné protokoly využívané v energetickom systéme sami o sebe neimplementujú bezpečnostné opatrenia. Tieto opatrenia navyše musia presahovať bežnú autentifikáciu používateľa a šifrovanie protokolov napríklad plánovaním zabezpečenia, správou kľúčov a mechanizmami kontroly prístupu [24]. Bezpečnostné požiadavky sa tradične členia do troch hlavných kategórií, označované ako CIA triáda [25]:

1. Dôvernosť (zabránenie neoprávnenému prístupu k informáciám)
2. Integrita (zabránenie zmenám informácií počas ich prenosu)
3. Dostupnosť (zabránenie odmietnutia služby a poskytnutia oprávneného prístupu k informáciám)

Do CIA triády sú ďalej mapované ďalšie princípy bezpečnostných požiadaviek:

1. Autentickosť - Integrita
2. Nepopierateľnosť - Integrita
3. Správnosť v špecifikácii – Integrita a Dostupnosť
4. Zodpovednosť - Integrita
5. Integrita ľudí - Integrita
6. Dôvera – Dôvernosť a Integrita
7. Etickosť - Integrita
8. Správa identít – Dôvernosť, Integrita a Dostupnosť

Model CIA triády je všeobecne rešpektovaný a tvorí základ pre architektúru bezpečnostných systémov a politík vo svete informačných aj operačných technológií. CIA model je často používaný pri vyhľadávaní zraniteľností systémov ako aj pri identifikácii vhodných metód na ich riešenie a odstránenie. Vytvorenie a naplnenie všetkých troch požiadaviek vyplývajúcich z CIA triády je výzva, s ktorou sa stýka celý bezpečnostný priemysel. Model je zároveň škálovateľný v závislosti od typu príslušného systému, na ktorý cieli. Zreteľné rozdiely sú napríklad pri cielení na informačné a prevádzkové technológie využívané v priemyselnom odvetví. Aj napriek silnej konvergencii týchto technológií si OT zachovávajú svoju jedinečnosť vo výraznej dominancii požiadavky dostupnosti voči dôvernosti a integrite. Systémy, ktoré riadia priemyselné procesy netolerujú neočakávané výpadky a dokonca aj zdanlivo neškodné oneskorenie systému dokáže spôsobiť výrazné škody. Z tohto dôvodu je nevyhnutné pristupovať k bezpečnosti OT systémov pomocou osobitných stratégií.

Norma IEC 62351-1 rozdeľuje hrozby pre Smart Grid do dvoch kategórií:

1. Neúmyselné hrozby
    a. Poruchy bezpečnosti

   b. Poruchy nástrojov
   c. Neopatrnosť
   d. Prírodné katastrofy
2. Zámerné hrozby
   a. Všeobecné
   b. Nespokojný zamestnanec
   c. Priemyselná špionáž
   d. Vandalizmus
   e. Kybernetický hackeri
   f. Vírusy a červy
   g. Krádež
   h. Terorizmus

Táto práca je špecificky zameraná na hrozbu kybernetických útokov.

## 3.1 Kybernetické útoky

Kybernetické útoky voči priemyselným systémom boli preslávené malwarom STUXNET v roku 2010. Od tej doby dochádza ku kontinuálnemu nárastu počtu kybernetických útokov vedených na priemyselné organizácie. Medzi najznámejšie patria: Industoyer, BlackEnergy, Havex alebo Triton. Útočníci si dobre uvedomujú aké riziká konvergencia IT a OT sietí pre priemyselné odvetvia prináša a naopak aj vektory, ktoré vďaka konvergencii vznikajú a sú zneužiteľné k preniknutiu do infraštruktúry a následnému páchaniu škôd. Príkladom takýchto vstupných vektorov je zneužitie techník sociálneho inžinierstva, ktoré sa aktuálne stávajú jednými z najčastejšie využívaných s najvyšším podielom úspešnosti. Prostredníctvom sociálneho inžinierstva je možné do IT/OT prostredia prepašovať škodlivý kód, vytvoriť si zadné vrátka alebo napríklad zneužiť získané užívateľské prístupové údaje na priamy vstup. Vďaka konvergencii sietí by sa mohol útočník ďalej laterálne pohybovať a vyhľadať vhodné ciele a použiteľné metódy. Medzi najčastejšie typy kybernetických útokov na priemyselné prostredia patrí:

1. Muž uprostred (Man in the Middle)
2. Odcudzenie hesla (Password stealth)
3. Podvrhávanie (Spoofing)
4. Nepovolený prístup (Unauthorized access)
5. Analýza sieťovej komunikácie (Traffic analysis)
6. Odpočúvanie (Eavesdropping)
7. Manipulácia (Tampering)
8. Prehrávanie (Replay)
9. Vkladanie dát (Data Injection)
10. Synchronizácia času (Time Synchronization)
11. Úprava dát (Data Modification)
12. Záplavové útoky (Flooding)

13. Odoprenie služby (DoS/DDoS)
14. Rušenie (Jamming)
15. Pretečenie vyrovnávacej pamäte (Buffer Overflow)
16. Škodlivý software (Malware)

### 3.1.1 Zhrnutie

OT systémy majú štandardnú životnosť kľudne aj 10 rokov, kvôli čomu sa v nich nachádza množstvo známych starších aj nových zraniteľností. Ich odstránenie nie je jednoduché, nakoľko aplikovanie záplat a aktualizácií na prevádzkových systémoch môže vyvolať oneskorenie až dočasnú úplnú nedostupnosť systémov, čo v operačnom prostredí nie je tolerované. Na druhej strane OT zariadenia disponujú veľkým množstvom bezpečnostných a kontrolných vlastností a operátori sú často zdatný pri vnímaní neštandardných stavov, vďaka čomu nie je vykonanie úspešného a nedetekovateľného útoku na priemyselné systémy úplne jednoduché. ICS zariadenia sú veľmi krehké a útočníci tak musia byť opatrný a hlavne mať silný znalostný základ pre úspešnú exploitáciu a vyhnutie sa odhaleniu. Pokiaľ ale k úspešnému útoku dôjde, dôsledky sú príliš vysoké na to aby sa brala bezpečnosť na ľahkú váhu a preto je riziko kybernetických útokov pre priemyselné prostredia veľmi vysoké.

## 3.2 Analýza rizík v Smart Grid

Riziká v kontexte Smart Grid je možné identifikovať viacerými metódami. Medzi tieto metódy patria napríklad súlad a audit štandardov, SME metóda využívajúca expertov na danú problematiku alebo prístup založený na výkone a efektivite. Nakoľko je v práci predpokladané využívanie bezpečnostných štandardov a hlavný dôraz je kladený na zavedenie mitigačných opatrení, bola pre účely vyhodnotenia bezpečnostných rizík v tejto práci využitá metóda založená na výkone a efektivite. Výhodou metódy je jej opakovateľnosť a reprezentácia v číselných hodnotách. Podľa tejto metódy je možné bezpečnostné riziko v Smart Grid definovať ako pravdepodobnosť, že útočník zneužije zraniteľnosť a spôsobí škodu na počítači, sieti, systéme alebo obslužnom prostriedku, čo bude mať za následok prevádzkové a obchodné dopady. Kvantitatívna reprezentácia rizika je podľa pôvodnej metódy autormi vyjadrená ako súčin pravdepodobnosti úspešného útoku s dôsledkom [23]:

$$R = P_A \, x \, (1 - P_E) \, x \, C \tag{3.1}$$

Pravdepodobnosť úspešného útoku je hodnotená na základe súčinu pravdepodobnosti útoku, pravdepodobnosti prerušenia útoku (s ohľadom na zistenie a zhodnotenie útoku, oneskorenie a odpoveď) s pravdepodobnosťou neutralizácie:

$$P_E = P_I \, x \, P_N \tag{3.2}$$

Dôsledok je následne stanovený na základe súčinu geografických vplyvov, času na opätovné zotavenie systému a rozsahu finančných dopadov:

$$C = 1 – (1 - C_A) \; x \; (1 - C_T) \; x \; (1 - C_C) \tag{3.3}$$

Prvky metódy boli v práci využité a doplnené o nové prvky určené na prispôsobenie aktuálnym bezpečnostným požiadavkám v Smart Grid podľa CIA triády. V definícii pravdepodobnosti úspešného útoku bola pôvodná premenná pravdepodobnosti prerušenia útoku ($P_I$) modifikovaná na pravdepodobnosť zásahu ($P_Z$), ktorá je určovaná schopnosťou odhalenia útoku a iniciáciou zásahu. Ďalej bola vykonaná zásadná zmena v definícii premennej dôsledku ($C$), ktorá je v originálnom znení vyjadrovaná na základe geografických, časových a finančných vplyvov. V tejto práci boli na pôvodnú premennú aplikované 3 najdôležitejšie bezpečnostné požiadavky pre Smart Grid, ktorými sú dôvernosť, integrita a dostupnosť. A práve na základe miery narušenia týchto bezpečnostných požiadaviek je vyjadrená nová premenná dôsledku ($D$), ktorá plne nahradzuje pôvodnú. Základná definícia rizika je využitá z pôvodnej metódy vyjadrená ako:

*Riziko = Pravdepodobnosť úspešného útoku x Dôsledok*

Rovnica sa snaží o koreláciu rôznych elementov rizika a môže byť ďalej vyjadrená ako:

$$R = P_U \; x \; (1 - P_E) \; x \; D \tag{3.4}$$

Kde:

$R$ reprezentuje predpokladanú úroveň rizika, alebo zvyškovú mieru rizika po nasadení bezpečnostných mechanizmov. Nadobúda hodnotu medzi 0 a 1, ktorá predstavuje kombináciu pravdepodobnosti útoku na systém, účinnosť obrany systému a dôsledok úspešného útoku.

$P_U$ reprezentuje pravdepodobnosť útoku s nadobúdacou hodnotou znovu medzi 0 a 1, kedy hodnota 1 reprezentuje 100% pravdepodobnosť.

$P_E$ reprezentuje pravdepodobnosť účinnosti bezpečnostného mechanizmu a ($1 - P_E$) meria nedostatočnosť bezpečnostných opatrení.

$D$ reprezentuje dôsledok úspešného útoku so závažnosťou vyjadrenou znovu hodnotami medzi 0 a 1.

$P_E$ môže byť ďalej rozšírené:

$$P_E = P_Z \; x \; P_N \tag{3.5}$$

Kde:

$P_Z$ reprezentuje pravdepodobnosť zásahu, určenou pravdepodobnosťou odhalenia útoku a iniciovaným zásahom.

$P_N$ reprezentuje pravdepodobnosť neutralizácie hrozby, teda ako efektívny bol vykonaný zásah voči zastaveniu útoku.

*D* môže byť ďalej rozšírené:

$$D = 1 - (1 - D_D) \times (1 - D_I) \times (1 - D_O) \tag{3.6}$$

Kde:

$D_D$ reprezentuje dopad na požiadavku dôvernosti.

$D_I$ reprezentuje dopad na požiadavku integrity.

$D_O$ reprezentuje dopad na požiadavku dostupnosti.

Konkrétne reprezentácie hodnôt sú uvedené v *Prílohe A - Tabuľky hodnôt pre atribút D* tohto dokumentu.

Pre zreteľnejšie pochopenie použitej metodológie je znázornené príkladné hodnotenie rizika, ktoré predstavuje Spoofing útok pre GOOSE správy komunikujúce na druhej vrstve ISO/OSI, definované v súbore noriem IEC 61850. V prvom kroku sú stanovené podmienky pri ktorých je možné útok vykonať a rozsiahlosť už implementovaných bezpečnostných mechanizmov.

Vychádzajúc z povahy GOOSE správ je prvou podmienkou dosah útočníka na cieľový systém vďaka úspešnému prieniku do siete (či už fyzicky, prostredníctvom kompromitovaných interných zariadení alebo z externého prostredia). V tomto príklade predpokladáme úspešný prienik do siete a dosah útočníka na cieľový systém. Nasleduje už samotný výpočet:

$$R = P_U \times (1 - (P_Z \times P_N)) \times (1 - (1 - D_D) \times (1 - D_I) \times (1 - D_O)) \tag{3.7}$$

V atribúte $P_U$ je hodnotené s akou pravdepodobnosťou útočník po úspešnom prieniku vykoná práve daný útok, na základe jeho zložitosti a efektivity. V tomto prípade sa jedná o zvýšenú náročnosť útoku, nakoľko je nutná znalosť princípu GOOSE správ a možnosť modifikácie rámcu. Predpokladáme, že útočník cielili priamo na IEC 61850, z čoho vyplýva znalosť daného protokolu, ale na druhej strane nemusí v momente prieniku do siete disponovať potrebnými nástrojmi na modifikáciu rámcu (pokiaľ napríklad k cieľovému systému prenikol fyzicky). Spoofing útokom je možné získať prístup k prenášaným dátam ako aj vykonať odopretie dostupnosti služby, na základe čoho hodnotíme 70% (0.7) pravdepodobnosť, že by daný útočník vykonal práve Spoofing útok.

Nakoľko jedným z hlavných cieľov tejto práce je určiť efektívne mitigačné opatrenia voči kritickým útokom, sú v atribúte $P_E$ predpokladané minimálne až žiadne bezpečnostné mechanizmy. Atribút $P_Z$ uvažuje pravdepodobnosť odhalenia útoku ako takého, s tým, že už počiatočný prienik sa predpokladá ako neodhalený a tým nastavuje počiatočnú hodnotu atribútu $P_Z$ = -0.5. Atribút $P_N$ uvažuje pravdepodobnosť neutralizácie útoku s ohľadom na odhalenie a následne zastavenie prieniku, čo znovu stanovuje počiatočnú hodnotu atribútu $P_N$ = -0.5. Nakoľko môže pri pokuse o útok dochádzať k častému vypínaniu/zmenám vo funkčnosti systému je porucha ľahko detekovateľná (80%, $P_Z$ = 0.8 ), ale na druhej strane skrz modifikáciu rámcov je náročnejšia detekcie útoku bez

dôsledkov ako sú viditeľné zmeny vo funkčnosti (-30%, $P_Z$ = 0.8-0.3) x časovo náročnejší troubleshooting a rozpoznanie problematických rámcov (-60%, $P_N$ = *0.4* ) = -0.5 x (0.5 x 0.4) = 0

V poslednom kroku ostáva vyhodnotiť potencionálne dôsledky úspešne vykonaného útoku, ktorých konkrétne hodnoty sú uvedené v *Prílohe A - Tabuľky hodnôt pre atribút D.* Vďaka priamemu prístupu k nezabezpečenej GOOSE komunikácii sa útočník dostane k prevažnej časti informácií v cieľovom systéme, $D_D$ = 0.7. Všetky dáta, ku ktorým sa útočník dostane môžu byť počas ich prenosu modifikované, z čoho vyplýva, že dôjde k narušeniu integrity triedy I1; $D_I$ = 1. Doba nedostupnosti cieľového systému je podmienená samotným zistením nedostupnosti/výpadku/oneskorenia a následnou reakciou na incident. Keďže sa môže jednať o nedostupnosť v rámci milisekúnd ale aj výpadok v rámci desiatok minút (doba kým sa k zariadeniu fyzicky dostaví zodpovedná osoba) je premenná vsadená na maximálnu hodnotu, $D_O$ = 1. Po dosadení hodnôt do rovnice dosiahneme výsledok rizikovosti útoku na konkrétny systém pre definované požiadavky a prostredie.

$$0.7 = 0.7 \ x\ (1 - (0))\ x\ (1 - (1 - 1)\ x\ (1 - 0.7)\ x\ (1 - 1)) \tag{3.8}$$

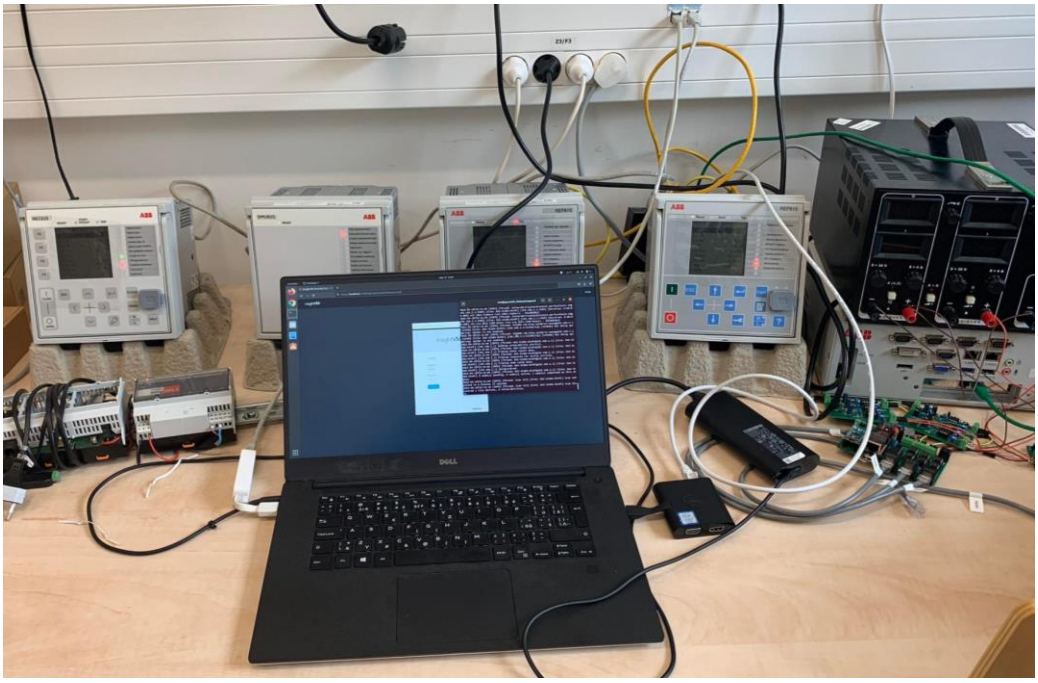
### 3.2.1 Zhrnutie

Rizikovosť jednotlivých kybernetických útokov závisí od viacerých faktorov, najmä aktuálneho stavu bezpečnostných mechanizmov nasadených v prostredí a potencionálne dopady na základné bezpečnostné požiadavky CIA triády v prípade úspešnosti útoku. Použitím vybranej metódy analýzy rizík budú v práci hodnotené testované zraniteľnosti, ktoré vyplývajú z implementácie súborov noriem IEC 61850 a IEC 60870. Vďaka jednotnej forme hodnotenia rizikovosti bude možné využiť teoretický základ analýzy rizík pre vlastnú adaptáciu a praktické prevedenie analýzy pre podklad navrhovania mitigačných opatrení.

# 4. TESTOVACIE PROSTREDIE

V rámci semestrálnej práce bolo pripravené prostredie, ktoré bude následne využité pre praktické testovanie vybraných kybernetických útokov a návrhu mitigačných opatrení. Prostredie sa skladá z desktopového počítaču s operačným systémom Windows 10 Pro, ktorý je sieťovo pripojený ku dvom IED REF615 zariadeniam a jednému RER615, ktoré podporujú súbor noriem IEC 61850. Vo vytvorenom testovacom prostredí je využívaný software Teamviewer, ktorý umožňuje vzdialený prístup ku GUI desktopového počítaču a ktorý je využívaný na vzdialenú správu prostredia. Teamviewer pre komunikáciu využíva cloudové servery v doméne *.teamviewer.com a špecifický TCP/UDP port 5938 alebo štandardne používané TCP 443 a TCP 80.

Ochranné zariadenia REF615 budú slúžiť ako cieľ testovaných kybernetických útokov. Pre účely vykonávania reálnych útokov je do testovacieho prostredia pripojený laptop DELL s operačným systémom Ubuntu, inštaláciou software Nexpose a virtuálnou distribúciou Kali Linux. Sieťové prepojenie všetkých prvkov testovacieho prostredia je realizované prostredníctvom nemenežovateľného switchu a priradeniu adresácie 192.168.2.0/24. Jedná sa o oddelenú privátnu podsieť bez akéhokoľvek ďalšieho sieťového prestupu. Východiskovou bránou je windowsový stroj, ktorý disponuje dvomi sieťovými rozhraniami, prestupom do WAN a inštaláciou aplikácie PCM600 čím zároveň pre prostredie slúži ako inžinierska stanica.



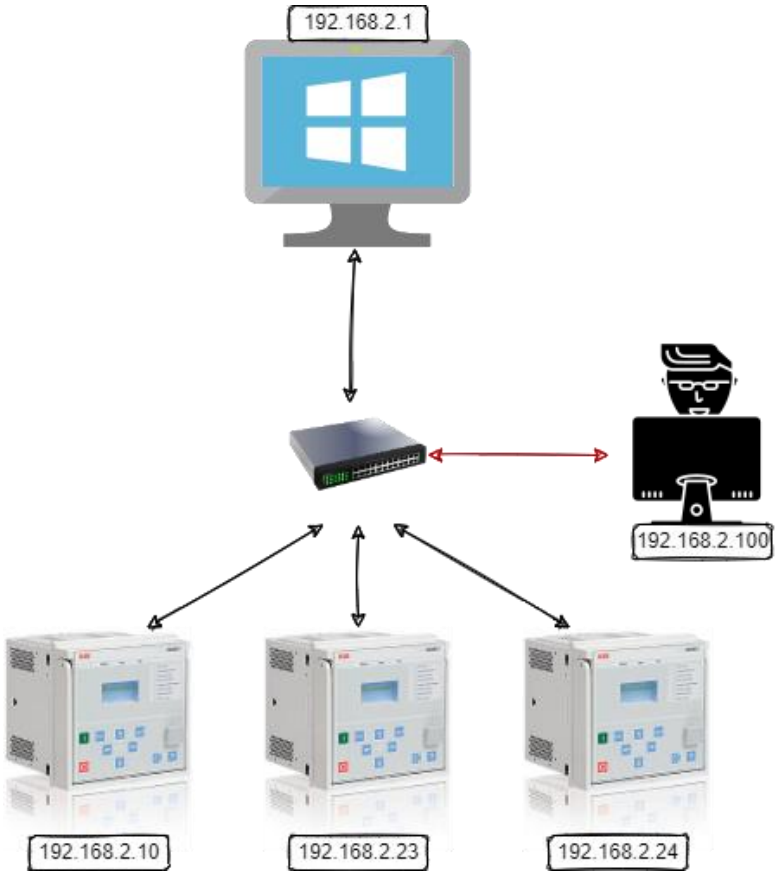
Obrázok 4.1 Zapojenie útočnického stroju k IED zariadeniam.

## 4.1 IED REF615

IED REF615 je špecifické zariadenie vývodu určené pre chránenie, ovládanie, meranie a monitorovanie systémov v rozvodniach energetických spoločností aj v energetických systémoch priemyselných podnikov, vrátane radiálnych, okružných a zauzlených distribučných sietí s distribuovanou výrobou aj bez výroby elektrickej energie. Použité REF615 sú výrobkom produktovej skupiny Relion® firmy ABB. Zariadenia podporujú celú radu protokolov vrátane protokolu IEC 60870-5 a IEC 61850 vrátane časovo kritického protokolu GOOSE.

Na konfiguráciu signálov bude využitá grafická aplikačná funkcia nástroja PCM600 (Protection and Control IED Manager), ktorá zároveň podporuje tvorbu viacvrstvových logických funkcií, ktoré v kombinácii sa ochrannými funkciami umožňujú IED prispôsobiť aj náročnejším aplikačným požiadavkám. Komunikácia medzi PCM600 a IED zariadeniami prebieha na sieťovej vrstve ISO/OSI [30]. Schéma zapojenia s pridruženými IP adresami použitými pre komunikáciu je zobrazená na obrázku 4.2, zobrazenom nižšie.

Medzi základné vlastnosti REF615 patrí napríklad monitorovanie signálu, riadenie komunikácie, aplikačné konfigurácie alebo zobrazenie zmenových stavov udalostí a disponuje množstvom ochranných a kontrolných funkcií.




Obrázok 4.2 Schéma zapojenia testovacieho prostredia.

### 4.1.1 Ovládanie

REF615 disponuje možnosťou ovládania lokálne cez čelný panel (LHMI) s LCD displejom alebo diaľkovým riadením (WHMI, COM600, PCM600). Okrem bloku pre ovládanie vypínača je IED vybavené aj dvoma blokmi riadenia, ktoré sú určené pre ovládanie odpojovača alebo podvozku vypínača s motorovým pohonom a pre indikáciu polôh týchto prvkov. IED ďalej ponúka jeden blok riadenia, ktorý je určený pre ovládanie jedného uzemňovača s motorovým pohonom a pre indikáciu jeho polohy. [29]

### 4.1.2 Komunikácia

REF615 disponuje natívnou podporou štandardu IEC 61850 vrátane horizontálneho prenosu binárnych a analógových správ GOOSE. Podporuje aj procesnú zbernicu so vzorkovanými hodnotami analógových fázových napätí. Disponuje rýchlou komunikačnou schopnosťou, trvalou kontrolou integrity systému ochrán aj komunikačného systému a značnou flexibilitou. IEC 61850 podporuje všetky monitorovacie a kontrolné funkcie. Použitím protokolu IEC 61850-8-1 sa okrem toho sprístupnia záznamy porúch a poruchové zápisy. Súbory záznamov porúch sú k dispozícii v štandardnom formáte COMTRADE pre akúkoľvek aplikáciu, ktorá pracuje na báze Eternetovej komunikácie. Implementácia komunikačného profilu IEC 61850-8-1 GOOSE umožní vysielať dáta binárnych signálov z IED a tieto dáta tiež prijímať z iných IED (3ms). Podporuje aj vysielanie a príjem analógových dát a vypínanie prostredníctvom správ GOOSE a komunikáciu až s 5 rôznymi klientami na zbernici. Súhrn všetkých podporovaných komunikačných protokolov predstavuje tabuľka 4.1.

Tabuľka 4.1 Podporované TCP/UDP porty

| Číslo portu | Typ | Default stav | Popis |
|---|---|---|---|
| 20, 21 | TCP | Otvorený | FTP,FTPS |
| 102 | TCP | Otvorený | IEC 61850 |
| 80 | TCP | Uzatvorený | Web Server HTTP |
| 443 | TCP | Uzatvorený | Web Server HTTPS |
| 123 | UDP | Neaktívny | NTP |
| 502 | TCP | Uzatvorený | Modbus TCP |
| 2000 | TCP | Uzatvorený | DNP TCP |
| 2000 | UDP | Uzatvorený | DNP UDP |

REF615 podporuje vertikálnu komunikáciu mapovaním podľa IEC 61850-8-1. Ochrany REF615 môžu súčasne sprístupniť dáta až piatim klientom (pokiaľ sa nejedná o ovládanie primárnych prvkov). V rámci služby MMS je poskytovaný zber dát a monitoring.

Podporované komunikačné protokoly:

- IEC 61850 – GOOSE, SMV a MMS
- Protokoly časovej synchronizácie – IEEE 1588 (PTP), HSR/PRP (IEC 62439-3), SNMP a IRIG-B
- Ďalšie protokoly - DNP3, Modbus, RSTP a Profibus DPV1

### 4.1.3 Natívna bezpečnosť

REF615 podporuje autentizáciu, preverovacie záznamy (audit trail), zabezpečenie prístupu ku konfigurácii a prenos súborov. Ochrany uchovávajú až 2048 udalostí v audit trail a 1024 procesných udalostí v event list. Tieto zoznamy fungujú na princípe FIFO (First in First out). Logované sú tu napríklad udalosti spojené s prihlásením ako Login/Logout a Violation remote/local - z IEC 61850-8-1 (MMS), WHM, FTP alebo LHMI, zmenou času, kde sa ale neloguje legitímna synchronizácia s dedikovaným protokolom (SNTP, IRIG-B, IEEE 1588 v3) a napríklad užívateľské auditné udalosti podľa IEEE 1686, ktoré sú dostupné cez IEC 61850-8-1, PCM600, LHMI a WHMI..

Ochrany REF615 disponujú 3 úrovňami zabezpečenia súborov. Pri nízkej úrovni zabezpečenia nie je vykonávaná žiadna kontrola podpisu nahrávaného súboru. Pri strednej úrovni je vykonávané overovanie digitálneho podpisu každého binárneho súboru pred jeho nahratím a pri vysokej úrovni zabezpečenia je vykonávané vylepšené overenie podpisu binárnych súborov, čím REF615 adresuje požiadavku integrity. Žiadne heslá v REF615 nie sú ukladané v čistom texte, ale šifrované pomocou hashovacej funkcie SHA256 a sú na nich kladené bezpečnostné požiadavky pri ich vytváraní. Požiadavky na heslo pre LHMI sú: 4-8 znakov, a pre WHMI: 9-20 znakov, pričom za znak sú považované čísla 0-9, písmená a-z, A-Z, medzera a špeciálne znaky "#%&'()*+´-./:;<=>?@[\]^_`{|}~). [35]

Ochrana prístupu je riešená pomocou protokolu DAA (HTTP Digest Access Authentication) podľa RFC2617 vo forme „užívateľské meno“ + „heslo“. Tabuľka Tab. 6-3 predstavuje prehľad možností užívateľov.

REF615 ďalej disponuje bezpečnostným parametrom „Secure Communication“, ktorý automaticky vynúti využitie TLS pre WHMI a FTPS pre prenos súborov, kde TLS spojenie je šifrované pomocou AES256 alebo AES128 algoritmu a kľúč pre šifrovací algoritmus je zdieľaný pomocou RSA kľúčového páru.

Tabuľka 4.2 Prehľad možností užívateľov

| Typ užívateľa | Práva užívateľa | LHMI default heslo | WHMI default heslo |
|---|---|---|---|
| Viewer | Read only | "0001" | "remote0001" |
| Operator | Kontrola, zmena setting groups,... | "0002" | "remote0002" |
| Engineer | Zmena nastavení, premazanie listov,... | "0003" | "remote0003" |
| Administrator | Všetko + zmena hesiel, factory reset, logy... | "0004" | "remote0004" |

### 4.1.4 Zhrnutie

REF615 od spoločnosti ABB podporujú plné spektrum funkcií ochrany, kontroly alebo monitoringu rozložených do variabilných konfiguračných profilov. Pre zaistenie operácie a konfigurácie funkcií zariadení, disponujú podporou pre viaceré komunikačné protokoly vrátane štandardizovaných protokolov (napr. IEC 61850).

Z pohľadu bezpečnosti ale disponujú minimálnymi mechanizmami pre zaistenie základných bezpečnostných požiadaviek na dôvernosť, integritu a dostupnosť.

Vďaka podpore analyzovaných komunikačných protokolov a minimálnym bezpečnostným mechanizmom sú REF615 považované za vhodný prostriedok pre testovanie potenciálnych kybernetických hrozieb a návrh relevantných opatrení v rámci tejto práce.

# 5. METODIKA KYBERNETICKÝCH ÚTOKOV

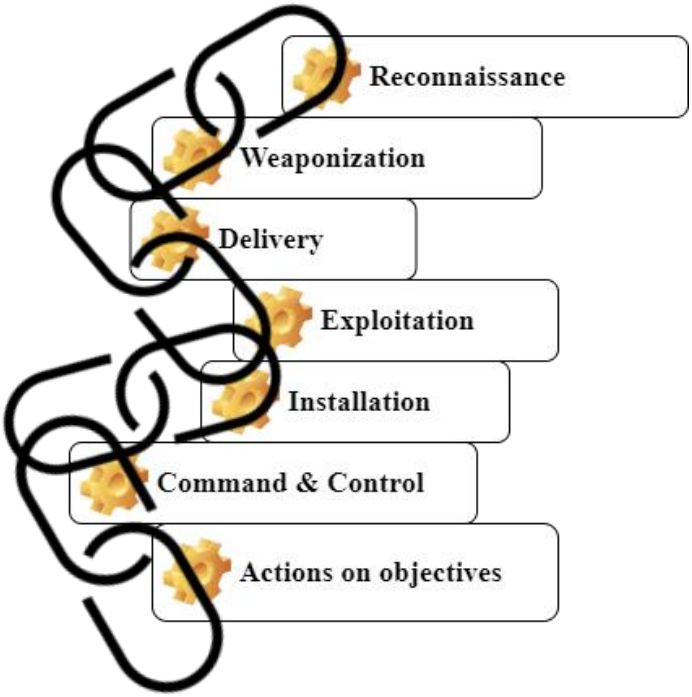
Úspešné vykonanie kybernetického útoku je vo všeobecnosti komplexný proces pozostávajúci hneď z niekoľkých fáz a často aj rôznych predispozícií a premenných. V rámci kapitoly je preto najprv venovaná pozornosť teoretickej rovine zostavenia kybernetického útoku. Predstavený je metodický základ kybernetických útokov využiteľný špecificky pre priemyselné kontrolné systémy. Metodický základ je v ďalšej časti kapitoly aplikovaný v praktickej rovine na zostavenie jednotlivých testov.

## 5.1 Metodický základ

Pre získanie prehľadnosti a porozumenia v rámci celého životného cyklu kybernetického útoku boli vyvinuté štruktúry, ktoré identifikujú a mapujú jednotlivé kroky útočníka pri podnikaní kybernetického útoku. Vyvinuté štruktúry poskytujú bezpečnostným pracovníkom a akademikom východiskový bod pre testovanie bezpečnosti ale aj nasadzovanie bezpečnostných opatrení. Medzi najznámejšie štruktúry kybernetických útokov patrí Cyber Kill Chain® a MITRE ATT&CK.

Cyber Kill Chain, vytvorená bezpečnostným kontraktorom Martinom Lockheed, aplikuje tradičnú vojenskú koncepciu útoku na kybernetický útok. Štruktúra rozkladá útok do presne definovanej sekvencie siedmich fáz od prieskumu po akcie na dosiahnutie cieľov. Zámer takéhoto reťazca je zlepšiť obranu pomocou analýzy útočníckeho správania a zabránenie aktívnemu útoku pomocou narušenia reťazca v ktoromkoľvek bode. Jednotlivé kroky sú zobrazené na obrázku 5.1.

MITRE ATT&CK, vydaná neziskovou organizáciou The MITRE Corporation v roku 2015, je neustále sa rozvíjajúci rámec spoločných taktík, techník a postupov (TTP) využívaných hackerskými skupinami a jednotlivcami, ktoré spoločnosť sprístupňuje súkromnému sektoru, vládam, profesionálom v oblasti kybernetickej bezpečnosti aj širokej verejnosti. Na rozdiel od Cyber Kill Chain, ATT&CK mapuje a indexuje útoky do matice a to z pohľadu oboch strán, útočníka aj obrancu. V roku 2020 bola spoločnosťou vydaná matica taktík, techník a postupov špecializujúca sa na priemyselné riadiace systémy (ICS), ktorej znázornenie predstavuje obrázok 5.2.




Obrázok 5.1 Vizualizácie fáz rámcu Attack Kill Chain.

Cyber Kill Chain je skvelým východiskom pri počiatočných návrhoch bezpečnostných analýz a architektúr. Pri dnešnej dynamickosti a sofistikovanosti kybernetických útokov sa ale môže stať, že tento teoretický model sa v praxi zjaví ako nedostatočný napríklad z dôvodu nedostatočnej škálovateľnosti a rozvoja. Množstvo bezpečnostných profesionálov a vendorov sa preto pri implementácii bezpečnostných postupov a riešení riadi ATT&CK maticou a vedomostnou základňou, ktorú spoločnosť MITRE Corporation ponúka. Pre účel zjednotenia teoretickej základne celého procesu testovania, hodnotenia a mitigovania kybernetických útokov a širokého spektra možností využitia je pre metodiku použitá štruktúra MITRE ATT&CK.

## 5.2 MITRE ATT&CK pre ICS

MITRE ATT&CK pre ICS sa po architektonickej stránke zameriava na systémy a funkcie spojené s funkčnými úrovňami 0 - 2 architektúry Purdue, ktoré sú zároveň primárnym cieľom útočníkov. Jedná sa o základné kontrolné systémy ako sensory, pumpy, ventily a podobne na nultej úrovni, distribuované kontrolné systémy a PLC na prvej úrovni a inžinierske stanice a HMI na úrovni druhej. Systémy spájané s vyššími funkčnými úrovňami sú pokryté v pôvodných podnikových maticiach, kde je primárne zameranie na IT technológie najmä v spojitosti s windowsovými a linuxovými platformami. Matica pre ICS reaguje na konvergenciu IT a OT technológií a preto využíva podnikové matice ako základ pre systémy nachádzajúce sa na prelome ako napríklad PLC, HMI alebo RTU. Samotná štruktúra matice sa skladá z taktík, na ktoré sú nadviazané konkrétne techniky, postupy a mitigácie. [35]

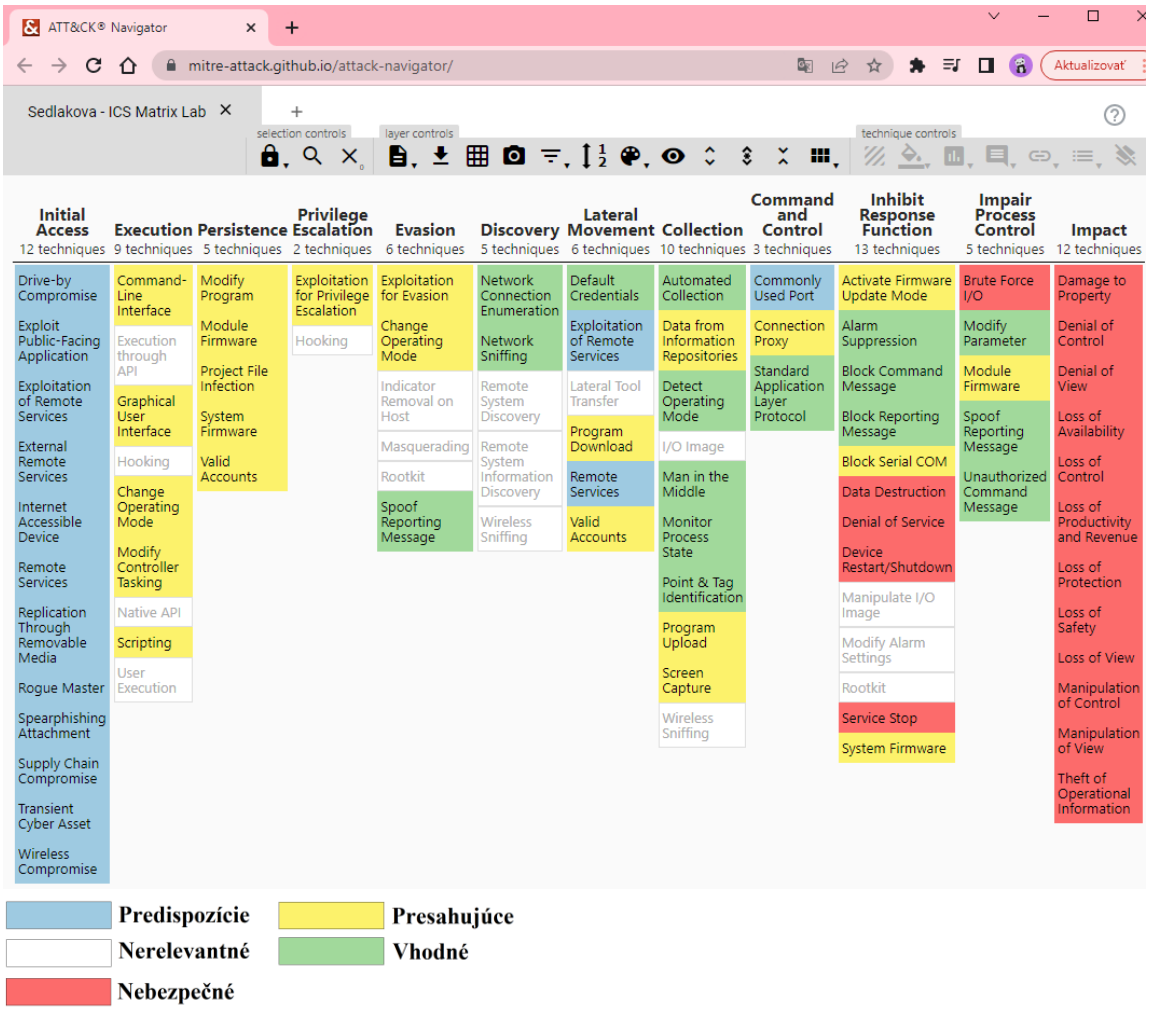
Tabuľka 5.1 Prehľad a stručný popis taktík MITRE ATT&CK pre ICS

| Taktika | Popis |
|---|---|
| **Initial Access** | Útočník sa snaží preniknúť do prostredia ICS. |
| **Execution** | Útočník sa pokúša spustiť kód alebo manipulovať systémovými funkciami, parametrami a údajmi. |
| **Persistence** | Útočník sa snaží zachovať svoju pozíciu v cieľovom ICS prostredí. |
| **Privilege Escalation** | Útočník sa snaží získať povolenia vyššej úrovne na systéme alebo v sieti. |
| **Evasion** | Útočník sa snaží vyhnúť povšimnutiu bezpečnostnej obrany. |
| **Discovery** | Útočník vyhľadáva dostupné informácie k vyhodnoteniu a identifikácii cieľov. |
| **Lateral Movement** | Útočník sa snaží pohybovať v rámci prostredia ICS. |
| **Collection** | Útočník sa snaží zhromaždiť zaujímavé a relevantné dáta o cieľovom prostredí pre vyhodnotenie cieľov a techník. |
| **Command and Control** | Útočník sa snaží komunikovať a zároveň kontrolovať napadnuté systémy vďaka prístupu do cieľového prostredia. |
| **Inhibit Response Function** | Útočník sa snaží zabrániť tomu, aby rôzne bezpečnostné mechanizmy reagovali na vytvorenú poruchu, nebezpečenstvo alebo neštandardný stav. |
| **Impair Process Control** | Útočník sa snaží zmanipulovať, deaktivovať alebo poškodiť procesy fyzického zariadenia. |
| **Impact** | Útočník sa pokúša zmanipulovať, prerušiť alebo zničiť cieľové ICS systémy, dáta a ich okolité prostredie. |

Matica disponuje mapovaním bezpečnosti naprieč celým priemyselným odvetvím a nie je preto aplikovateľná priamo v surovej forme na akékoľvek prostredie. Je dôležité maticu revidovať a prispôsobiť konkrétnemu prostrediu, na ktoré sa bude implementovať. Priamo MITRE Corporation ponúka viaceré nástroje použiteľné pre revíziu a prispôsobenie štruktúry:

- ATT&CK Navigator - webový nástroj na anotovanie, skúmanie a vizualizáciu matíc.
- ATT&CK Workbench - aplikácia umožňuje používateľom skúmať, vytvárať, komentovať a zdieľať rozšírenia vedomostnej základne ATT&CK.
- ATT&CK Python Utilities - množstvo Python skriptov využiteľných na priamu prácu s ATT&CK alebo ako príklady pre programátorskú prácu s ATT&CK.

Pre vizualizáciu relevantných techník bol použitý nástroj ATT&CK navigator a výsledný stav znázorňuje obrázok 5.2.




Obrázok 5.2 Plánovanie testovacích techník v online nástroji MITRE ATT&CK® Navigator, od spoločnosti The MITRE Corporation, dostupnom na: https://mitre-attack.github.io/attack-navigator/.

### 5.2.1 Nerelevantné techniky

V prvej fáze boli oddelené techniky, ktoré nie sú pre vytvorené testovacie prostredie relevantné. Jedná sa o techniky zneužívajúce API, užívateľskú interakciu, potlačenie a modifikáciu alarmov, bezdrôtové technológie, vzdialené technológie. rootkity a I/O Obrazy.

### 5.2.2 Predispozície

Prvou podmienkou pre vykonanie akéhokoľvek útoku v energetickej sieti je dosah útočníka na daný cieľový systém. Tento prienik je možné dosiahnuť hneď niekoľkými vektormi, medzi ktoré patrí napríklad fyzický prístup k cieľovému zariadeniu, infikovanie užívateľského, testovacieho alebo inžinierskeho počítaču, ktorý je pripojený k cieľovému zariadeniu alebo staničnej zbernici, kompromitácia úložiska nastavení a testovacích dokumentov, kompromitácia riadiaceho centra, zraniteľnosti v známych protokoloch, databázové útoky, prípadne kompromitácia sieťových prvkov. Takýto prienik je pre

testovanie kybernetického útoku nevyhnutný a pre účel práce sú preto techniky spájané s prvotným prienikom do siete považované za predispozičné.

### 5.2.3 Presahujúce

Ďalšou oddelenou skupinou sú techniky, ktorých podstata je zacielená na PLC zariadenia, inžinierske a operačné stanice a napríklad grafické užívateľské rozhrania. Tieto systémy nie sú primárnym predmetom záujmu práce a preto nebudú testované dopodrobna. Nakoľko je ich význam pre bezpečnosť rozvodne a celkovo ICS veľmi dôležitý, je predstavený teoretický rámec ich využiteľnosti. Využitiu techník opäť predchádza požiadavka dosahu útočníka na cieľový systém, ako je popísané v kapitole 5.2.2.

### 5.2.4 Vhodné

Pre účel práce najdôležitejšou kategóriou sú techniky označené ako vhodné a ktorých praktickému aplikovaniu a popisu sa venuje podkapitola 5.3.

### 5.2.5 Nebezpečné/Deštruktívne

Poslednou kategóriou sú techniky, ktoré môžu na systéme spôsobiť mierne odchýlky, oneskorenia, dočasnú nedostupnosť služieb a celého systému až trvalé následky. Využitie týchto techník pre testovanie bezpečnosti v ICS je odporúčané iba v izolovanom testovacom prostredí.

## 5.3 Útoky na testovacie prostredie

Vybrané kybernetické útoky sú na prostredí testované v troch fázach. Prvú fázu tvorí prieskum prostredia, kde sú využité najmä taktiky Discovery a Collection z ATT&CK rámca. Druhá fáza sa zameriava na vyhodnotenie získaných informácií z prvej fáze a vytvára tak podklady, stanovuje ciele a navrhuje techniky pre ďalšie pokračovanie testovania. Tretiu fázu tvorí samotná realizácia kybernetického útoku, ktorá využíva zvyšné taktiky ako napríklad Impair Process Control alebo Evasion.

### 5.3.1 Fáza 1: Prieskum

Prieskum prostredia a zber relevantných informácií sú najčastejšie využívané počiatočné body kybernetických útokov alebo etického penetračného testovania v bežných IT prostrediach, a je možné ich aplikovať aj na OT prostredia. V tejto fáze sa útočníci snažia zmapovať prostredie spolu so všetkými jeho aktívnymi a pasívnymi prvkami a získať čo najviac informácií o aktívach, užívateľoch a napríklad typoch dát a rôznych interakcií. Pre tieto úkony sú obvykle používané nástroje na zachytávanie sieťovej prevádzky a prípadne sociálne inžinierstvo. Sociálne inžinierstvo je technika zneužívajúca nepozornosť a nevedomosť ľudského faktoru. Nakoľko v laboratórnom prostredí bol jediným ľudským faktorom útočník, pre túto fázu sú využité iba sieťové nástroje.

Predispozíciou pre zachytávanie sieťovej prevádzky je priamy dosah útočníka na danú sieť a to kompromitovaním aktívneho alebo pasívneho prvku. Vo vytvorenom laboratórnom prostredí bola táto predispozícia dosiahnutá fyzickým zapojením útočníckej stanice do nemenežovateľného switchu, ktorý pracuje na druhej vrstve referenčného modelu ISO/OSI. Následne bola stroju staticky priradená adresa z rovnakého subnetu, v akom sa nachádzajú ciele. Po úspešnom splnení predispozícií je možné pristúpiť k ďalšiemu kroku, ktorým je výber vhodného nástroja.

### 5.3.2 Nástroje na sieťový prieskum

Sieťových nástrojov vyvinutých na prieskum prostredia je v dnešnej dobe mnoho, ale len niektoré z nich sú prispôsobené špecifikám ICS technológií. Postupne dokonca vznikajú aj bezpečnostné nástroje špecificky zamerané na ICS prostredia. Takýmto nástrojom je napríklad mladá, ale aktívne vyvíjaná linuxová distribúcia ControlThings I/O, ktorej predchodcami boli distribúcie SamuraiWTF a SamuraiSTFU. Distribúcia ponúka zopár vstavaných nástrojov špecializovaných na bezpečnostné hodnotenie a interakciu s binárnymi sériovými zariadeniami, so zariadeniami využívajúcimi Modbus (TCP/UDP aj sériovými (RTU/ASCII)), s EEPROM, Flash čipmi a ďalšími vstavanými čipmi pomocou SPI alebo I2C a na interakciu s PLC Velocio. Okrem spomínaných funkcií disponuje distribúcia platformou pre vytváranie vlastných nástrojov. Ďalej existujú verejne dostupné špecializované skripty, pluginy a nadstavby na už existujúce nástroje ako napríklad na knižnicu libiec61850 alebo sieťový nástroj scapy. Napriek tomu, že majú tieto nástroje značný potenciál, ich vývoj bol vo väčšine prípadov pozastavený, dokumentácia limitovaná alebo ich účel jednosmerný. Ich využitie je preto často sprevádzané s nutnosťou časovej investície na riešenie problémov a závislostí. Z tohto dôvodu sa realizácia fáze 1 vykoná pomocou známych a overených nástrojov. Tabuľka 5.2 predstavuje často používané prieskumné nástroje zaradené podľa typu. Hlavným zámerom je využitie skeneru zraniteľností z dôvodu jeho komplexity, nakoľko takýto nástroj často priamo využíva skenery portov aj webových služieb.

Tabuľka 5.2 Prehľad nástrojov na vykonanie prieskumných útokov

| **Skenovanie portov** | **Webové služby** | **Skeny zraniteľností** |
|---|---|---|
| NMap | Nikto | Nexpose |
| Netcat | Burp Suite | Nessus |
| Advanced Port Scanner | ZAP | OpenVAS |

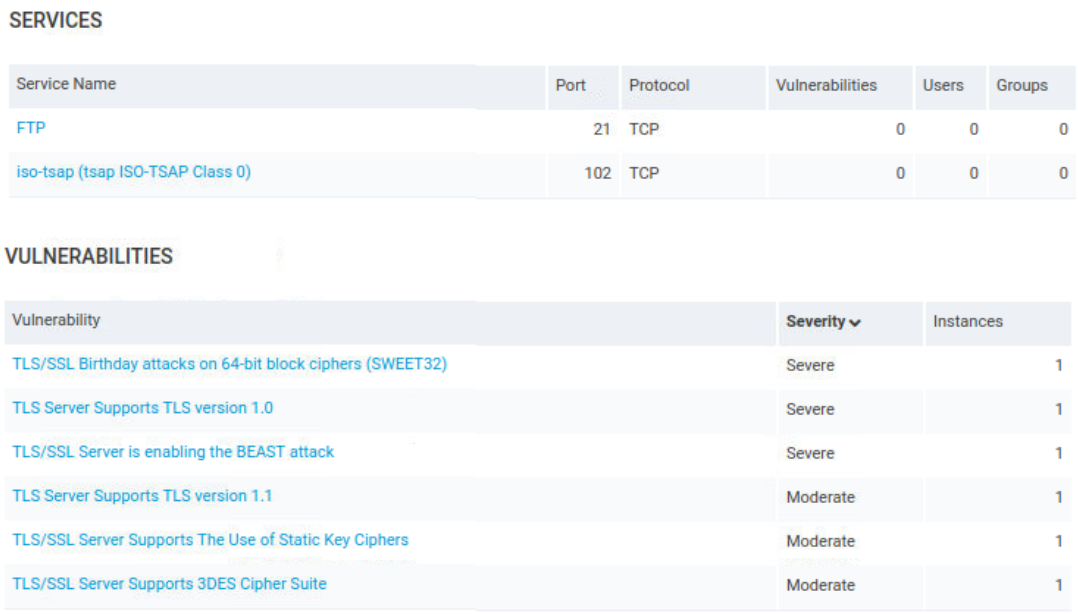
Všeobecne najvyužívanejším skenerom zraniteľností medzi penetračnými testermi je Nessus od spoločnosti Tenable. Nessus primárne slúži pre komerčné využitie a ponúka možnosť 7-dňovej trial licencie pre testovacie účely. Okrem skeneru zraniteľností Tenable ponúka napríklad riešenie tenable.ot slúžiace na inventarizáciu aktív, správu zraniteľností, forenznú podporu a konfiguráciu ovládacích prvkov v rámci OT prostredia.

Konkurenčným riešením je skener zraniteľností Nexpose od výrobcu Rapid7. Jedná sa taktiež o komerčný produkt, ale bez možnosti trial licencie. Významnou výhodou oproti Nessusu je priame napojenie na Metasploit, svetovo najpoužívanejší nástroj na penetračné testovanie, ktorý je taktiež pod záštitou Rapid7. V rámci zamerania na OT disponuje Nexpose možnosťou spojenia s treťostranovým doplnkom SCADAfence, vďaka čomu je možné dosiahnuť hlbší prehľad nad OT infraštruktúrou a jej rizikami.

OpenVAS je open-source skenovací nástroj od spoločnosti Greenbone Networks, ktorý plne vystačí na bežné hodnotenie zraniteľností v IT svete. V porovnaní s komerčnými skenermi ale nie je na OT infraštruktúru dostatočne pripravený a pri jeho spustení by mohlo dôjsť k výraznému ovplyvneniu produkcie.

Útočníkova stanica disponuje softwarom Nexpose, ktorý bol pre účel vykonania prieskumnej fáze zapožičaný od spoločnosti COMGUARD a.s.. Spoločnosť COMGUARD sa špecializuje na oblasť bezpečnosti informačných technológií, produktov a služieb v pozícii distribútora s pridanou hodnotou. Na stanici je taktiež nasadená virtualizovaná linuxová distribúcia Kali cez platformu VirtualBox. Distribúcia Kali bude využitá v neskoršej fáze na vykonanie Man-in-the-Middle útoku.

Skener Nexpose disponuje intuitívnym webovým grafickým rozhraním, cez ktoré sa manažuje celý proces prieskumu od konfigurácie konkrétnej inštancie skenu až po reporting. Už v základe prichádza s viacerými preddefinovanými šablónami, vrátane šablóny určenej ku prieskumu SCADA a priemyselných systémov s názvom SCADA audit. Táto šablóna bola duplikovaná a upravená tak aby bola k cieľovým systémom čo najšetrnejšia. Výsledkom bolo odhalenie živých aktív 192.168.2.1, 192.168.2.10, 192.168.2.23 a 192.168.2.24, využívaných služieb a potencionálnych zraniteľností.



SERVICES

| Service Name | Port | Protocol | Vulnerabilities | Users | Groups |
|---|---|---|---|---|---|
| FTP | 21 | TCP | 0 | 0 | 0 |
| iso-tsap (tsap ISO-TSAP Class 0) | 102 | TCP | 0 | 0 | 0 |

VULNERABILITIES

| Vulnerability | Severity | Instances |
|---|---|---|
| TLS/SSL Birthday attacks on 64-bit block ciphers (SWEET32) | Severe | 1 |
| TLS Server Supports TLS version 1.0 | Severe | 1 |
| TLS/SSL Server is enabling the BEAST attack | Severe | 1 |
| TLS Server Supports TLS version 1.1 | Moderate | 1 |
| TLS/SSL Server Supports The Use of Static Key Ciphers | Moderate | 1 |
| TLS/SSL Server Supports 3DES Cipher Suite | Moderate | 1 |

Obrázok 5.3 Výstup objavených služieb a zraniteľností z Nexpose.

Za živé aktívum sa považuje stroj, ktorý odpovedá na sieťové výzvy. Typicky sa jedná o využitie protokolov ICMP, ARP alebo TCP. Na odhalenie aktív využíva Nexpose priamo nástroj nmap so špeciálnymi parametrami tak, aby zariadenia nezahltil a nespôsobil im tak stav DoS. Pokiaľ by bol využitý nástroj nmap samostatne, jeho spustenie by obsahovalo špeciálny parameter -sT, ktorý zabezpečí aby bola každá otvorená relácia aj správne ukončená. Týmto úkonom sa predchádza vytvoreniu veľkého počtu polo-otvorených relácií, ktoré by mohli mať negatívne až kritické dopady na prevádzku. Príklad takéhoto skenu je uvedený na obrázku 5.4, ktorý popisuje bezpečný prieskum zariadení z IP rozsahu 192.168.2.1-192.168.2.99 so zameraním na konkrétne porty.

```
┌──(root㉿ DESKTOP-FLCH5SN)-[/home/kali]
└─# nmap -sT --scan-delay 1s -p 21,80,102,443,2404 192.168.2.1-192.168.2.99
```

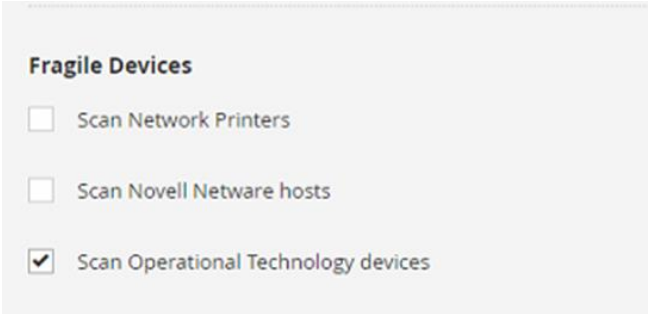
Obrázok 5.4 Prikladná ukážka spustenia skenu so špeciálnym parametrom.

Rovnaký prieskum bol vykonaný aj za pomoci software Nessus, ktorý bol inštalovaný priamo na windowsovú stanicu 192.168.2.1. Jedná sa o ľahký software, ktorý na lokálnom porte TCP 8834 otvorí prístup na webové rozhranie, cez ktorý sa jednotlivé inštancie skenov riadia. Webové rozhranie je dostupné na adrese https://localhost:8834.

```
C:\Users\labSG>netstat -aof | findstr :8834
  TCP    0.0.0.0:8834           DESKTOP-FLCH5SN:0      LISTENING       8092
  TCP    [::]:8834              DESKTOP-FLCH5SN:0      LISTENING       8092
```

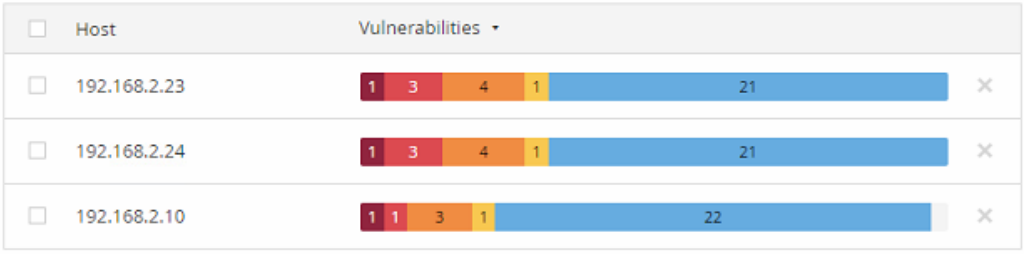
Obrázok 5.5 Zobrazenie počúvania na porte TCP8834 službou s ID 8092.

Vo webovom rozhraní sa definujú ciele skenu, metódy, pluginy, následne je sken uložený a pripravený na spustenie. Pozornosť bola vztiahnutá na špeciálne nastavenie šetrnosti skenu, kde Nessus priamo disponuje možnosťou označiť ciele za zariadenia OT. Toto nastavenie zapríčiní, že sa sken prepne do takzvaného pasívneho stavu a nespôsobí zariadeniam záťaž ani škodu.

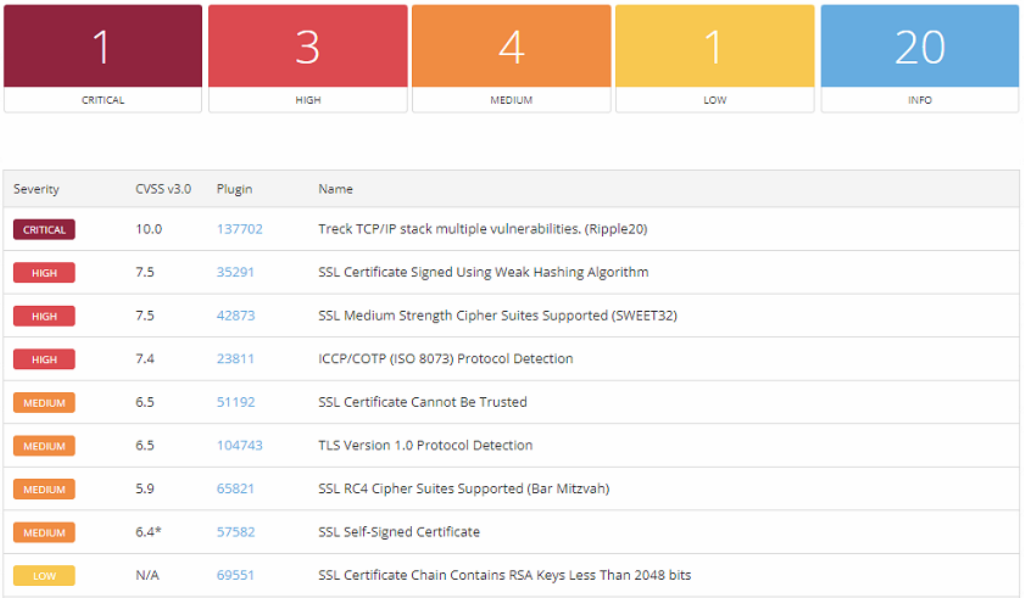



Obrázok 5.6 Definícia typu cieľových zariadení v rozhraní Nessus.

Výsledkom skenu bolo, podobne ako u Nexpose, odhalenie využívaných služieb a nájdenie potencionálnych zraniteľností, ktoré sú zobrazené na obrázkoch 5.7 a 5.8. Oproti Nexpose skenu došlo k odhaleniu potencionálnej kriticky závažnej zraniteľnosti nazývanej Ripple20. Jedná sa o sadu 19 zraniteľností objavených v implementácii TCP/IP spoločnosti Treck. Ďalšie odhalené zraniteľnosti boli veľmi podobné u obidvoch skenovacích nástrojov, ako napríklad zraniteľnosť sweet32 v slabej implementácii protokolu SSL alebo využívanie služby ICCP/COTP. Výsledky z automatických skenov nemusia byť vždy presné a preto je všeobecne odporúčané výskyt odhalených potencionálnych zraniteľností aj prakticky overiť v ďalších fázach penetračného testu.




Obrázok 5.7 Grafické zrhnutie počtu detegovaných zraniteľností z rozhrania Nessus.




Obrázok 5.8 Grafické znázornenie konkrétnych odhalených zraniteľností v rozhraní Nessus.

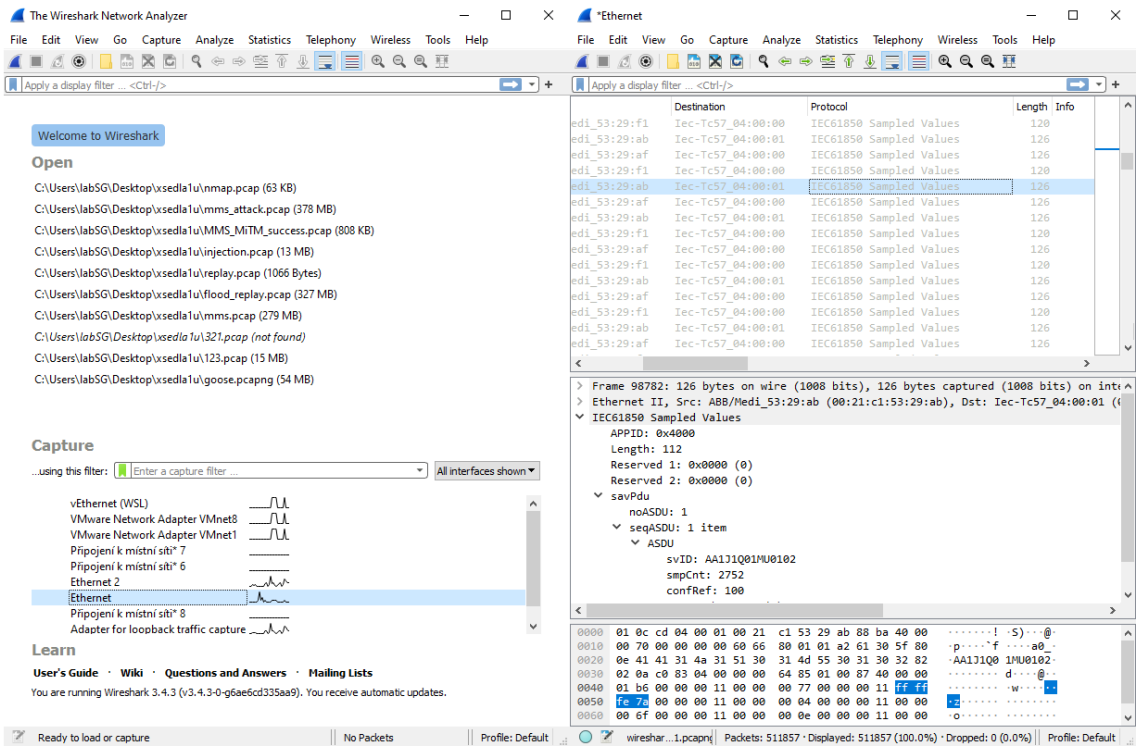
V priebehu celého trvania skenu nedošlo k narušeniu cieľových zariadení ani ich komunikácií vrátane služieb GOOSE a SMV. Tabuľka 5.3 poskytuje stručné porovnanie výsledkov oboch technológií, z ktorej je možné usúdiť, že Nessus je v základe lepšie pripravený na hodnotenie zraniteľností priemyselných technológií. Limitáciou porovnania je, že nedošlo k otestovaniu Nexpose rozšírenia od spoločnosti SCADAfence, ktoré sa špecializuje na OT kyberbezpečnosť.

Tabuľka 5.3 Porovnanie testovaných skenerov zraniteľností

| Funkcia | Nexpose (Rapid7) | Nessus (Tenable) |
|---|---|---|
| Odhalenie aktív | Áno | Áno |
| Stav portov | Čiastočne | Áno |
| Zraniteľnosti | 6 | 20 |
| Trvanie skenu | 40 minút | 19 minút |

Na základe informácií zo skenovacích nástrojov si je možné vytvoriť základný prehľad o prostredí, teda koľko živých aktív sa v ňom nachádza, aké služby sú využívané a na aké zraniteľné miesta je možné ďalšie fáze zamerať. Získaný prehľad do prostredia sa v ďalšom kroku prehĺbi vďaka odchyteniu a následnej analýze sieťovej prevádzky. Nakoľko je útočník pripojený do rovnakej siete s IED zariadeniami, môže vykonať odchyt rámcov/paketov priamo na svojom sieťovom rozhraní. K tomuto účelu je použitá tzv. Network Sniffing technika z ATT&CK rámcu.

Medzi najpoužívanejšie verejne dostupné nástroje patrí napríklad nástroj WireShark a Tcpdump. Tcpdump je nástroj sieťovej analýzy určený pre rýchlu prácu v príkazovom riadku. WireShark disponuje grafickým rozhraním a okrem zachytávania umožňuje sieťový tok uložiť, analyzovať alebo aj dešifrovať. Navyše je podporovaný na viacerých platformách a preto bol nainštalovaný ako na útočnícky stroj tak aj na windowsovú inžiniersko-operačnú stanicu. Jeho funkcionality sú založené na knižniciach libpcap pre unixové distribúcie a Npcap alebo staršia WinPcap pre windowsové platformy. Knižnice je možné využiť na nekomerčné účely aj pre vývoj vlastných nástrojov určených na interakciu so sieťovou prevádzkou. Po spustení WireShark si používateľ zvolí na ktorom sieťovom rozhraní chce na prevádzku naslúchať. Obrázok 5.9 ukazuje nastavenie zachytávania na Windowsovej stanici, kde bolo zvolené fyzické rozhranie Ethernet, ktoré je pripojené do siete s IED zariadeniami, a príklad prehľadu zachytených rámcov.




Obrázok 5.9 Ukážka grafického rozhrania sieťového nástroja Wireshark.

### 5.3.3 Fáza 2: Analýza

Po zachytení toku dát prichádza na rad analytická fáza, v ktorej dochádza k ich preskúmaniu. V testovacom prostredí aktívne komunikujú tri IED zariadenia odosielaním IEC 61850 SMV rámcov, z ktorých dve posielajú aj IEC 61850 GOOSE rámce, čo potvrdzuje zachytená komunikácia aj výsledky zraniteľnostných skenov. Štruktúra zachytených rámcov je rozdelená na jednotlivé polia [33]:

- Preambula (8 bajtov),
- Hlavička MAC (16 bajtov) - obsahujúca cieľovú multicast MAC adresu definovanú ako 01:0c:cd:xx:xx:xx (6 bajtov) a zdrojovú MAC adresu IED zariadenia (6 bajtov),
- Voliteľné označenie priority a VLAN príslušnosti (4 bajty),
- Typ Ethernet (2 bajty) - fixná hodnota 0x88B8 pre GOOSE a 0x88ba pre SMV,
- APPID (2 bajty) - aplikačný identifikátor,
- Dĺžka (2 bajty) - počet oktetov PDU začínajúc od APPID,
- 2 x Rezervované (2 bajty),
- GOOSE/SMV PDU – Jednotlivé polia sú zobrazené v tabuľke 5.4 a tabuľke 5.5,
- FCS (4 bajty) - sekvencia kontroly rámca.

Tabuľka 5.4 Prehľad polí GOOSE PDU so stručnými informáciami

| Pole | Dátový typ | Veľkosť | Popis |
|---|---|---|---|
| gocbRef | String | Max. 65 bajtov | Referencia inštancie GOOSE kontrolného bloku v rámci LLN0. |
| timeAllowedtoLive | Integer | Max. 2 bajty | Čas inkrementácie atribútu stNum a informácia o čase opakovania správy. |
| datSet | Integer | Max. 65 bajtov | Referencia súborov dát, ktorých hodnoty budú zasielané. |
| goID | String | Max. 65 bajtov | Špecifický identifikátor pridelený užívateľom. |
| t | Timestamp | Max. 8 bajtov | Čas inkrementácie atribútu stNum. |
| stNum | Integer | Max. 8 bajtov | Počítadlo inkrementované pri každom odoslaní správy GOOSE a detekovanej zmene hodnoty DataSet. |
| sqNum | Integer | Max. 8 bajtov | Aktuálne poradové číslo správy, inkrementované pri každom odoslaní GOOSE správy a počiatočnou hodnotou 0 |
| Simulation/test | Boolean | Max. 1 bajt | Nastavené pokiaľ sa jedná o testovací rámec. |
| confRev | Integer | Max. 8 bajtov | Revízia konfigurácie a označenie zmeny. |
| ndsCom | Boolean | Max. 8 bajtov | Oznámenie o prípadnej potrebe zásahu v prípade pravdivej hodnoty. |
| numDatSetEntries | String | Max. 1 bajt | Počet záznamov súborov dát. |
| allData | List | Max. 65 bajtov | Zoznam užívateľom definovaných informácií. |

Tabuľka 5.5 Prehľad polí SMV PDU so stručnými informáciami

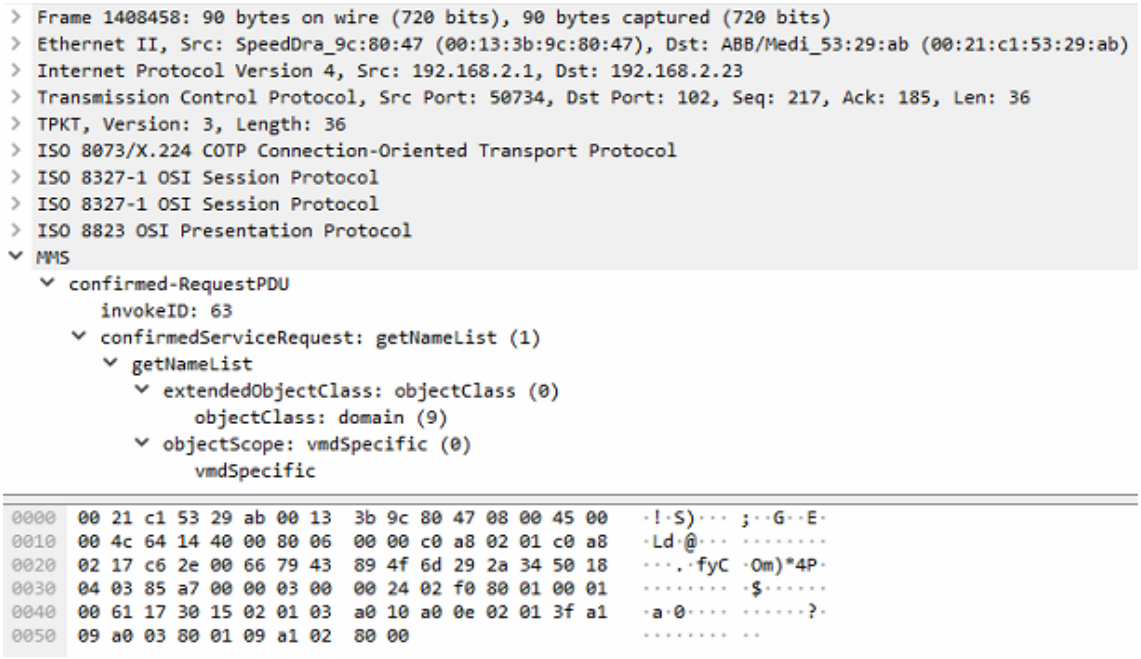
| Pole | Dátový typ | Veľkosť | Popis |
|---|---|---|---|
| noASDU | Integer | Max. 8 bajtov | Počet ASDU v rámci jedného APDU. |
| svID | String | Max. 65 bajtov | Špecifický identifikátor pridelený užívateľom. |
| smpCnt | Integer | Max. 8 bajtov | Počítadlo inkrementované pri každom odobratí novej vzorkovanej hodnoty. |
| confRev | Integer | Max. 8 bajtov | Revízia konfigurácie a označenie zmeny. |
| smpSynch | Enumeration | Max. 8 bajtov | Informácia o synchronizácii SMV. |
| PhsMeas1 | List | Max. 65 bajtov | Aktuálne dáta |

Okrem pravidelne odosielaných GOOSE a SMV rámcov boli v testovacom prostredí zachytené komunikácie protokolu MMS a FTPS. GOOSE/SMV rámce je možné cez WireShark odchytiť na ktoromkoľvek aktíve nachádzajúcom sa na lokálnej sieti, teda aj na útočníkovej stanici, nakoľko sa jedná o multicastovú prevádzku typu publisher-subscriber. Komunikačné protokoly MMS a FTPS prebiehajú na aplikačnej vrstve ISO/OSI modelu a na komunikáciu vyžadujú dve zariadenia vzťahu klient-server. Odchytiť ich je preto možné priamo na jednom z komunikujúcich aktív, na aktívnom/pasívnom sieťovom prvku typu smerovač alebo prepínač alebo za pomoci techniky muža uprostred (Man in the Middle) uvedenej v ATT&CK rámci pod taktikou

Collection. Táto technika bude testovaná v nasledujúcej fáze útoku. Pre účely analýzy bola prevádzka zachytená na windowsovej stanici.

Príkladný paket z MMS komunikácie je uvedený na obrázku 5.10, z ktorého je možné spozorovať hneď niekoľko relevantných informácií:

1. Informácie o komunikujúcich zariadeniach - zdrojová IP 192.168.2.1 (klient) a cieľová IP 192.168.2.23 (server),
2. Mapovania na jednotlivé vrstvy ISO/OSI referenčného modelu,
3. Jedná sa o nešifrovanú prevádzku,
4. Jedná sa o MMS prevádzku typu potvrdenej služby,
5. Komunikácia je vo fáze dopytovania na VMD objekt pomocou služby GetNameList.



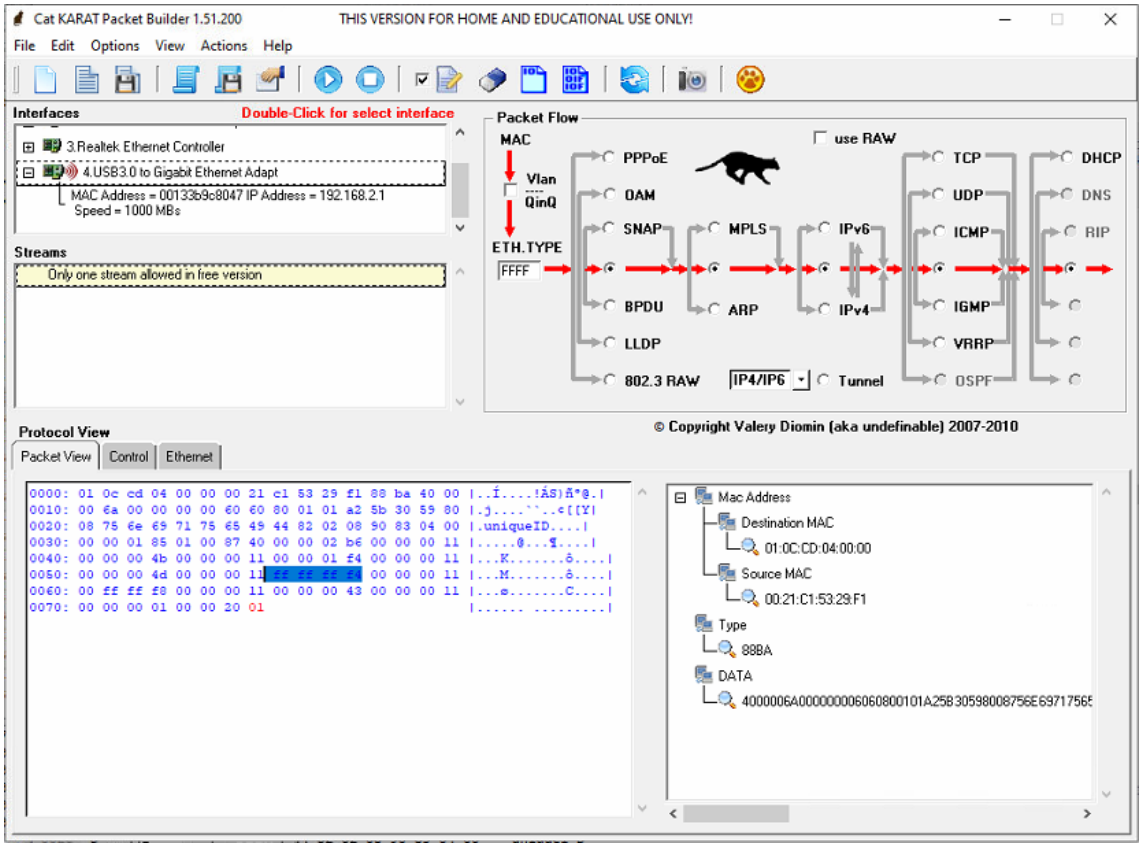

Obrázok 5.10 Ukážka zachyteného MMS paketu.

Vďaka početným získaným informáciám z predchádzajúcich fáz je možné pokračovať realizáciou cieleného kybernetického útoku. Využité budú techniky z ATT&CK rámca predstaveného v kapitole 5.2, vyhodnotené za vhodné.

### 5.3.4 Fáza 3: Realizácia kybernetického útoku

Všetky zachytené dátové toky sú v rámci testovacieho prostredia zasielané bez použitia akéhokoľvek šifrovacieho alebo autentizačného mechanizmu. Zásluhou toho je možné do prevádzky nahliadať a analyzovať prenášané dáta. Okrem zmienenej viditeľnosti to ponúka príležitosť do prevádzky vkladať vlastné dáta alebo modifikovať stávajúce, na čo budú zamerané vykonané útoky. Komunikačné protokoly GOOSE a SMV definované v IEC 61850 sú spravidla odosielané multicastovo vydavateľom na L2 vrstve referenčného modelu ISO/OSI. Odberateľ túto prevádzku sleduje a vyčítava z nej relevantné dáta. Útočník by tak mohol takúto legitímnu prevádzku imitovať a vsadiť do

nej vlastné alebo modifikované dáta. Protokoly MMS alebo IEC 60870-5-104 využívajú až L7 vrstvu referenčného modelu ISO/OSI, čím sa komunikácia stáva komplexnejšou. Pre modifikovanie dát v rámci komunikácie sa preto využíva technika muža uprostred, v ktorej je legitímna komunikácia preposielaná obom stranám skrz prostredníka, ktorý následne môže jednotlivé správy aj napríklad upravovať alebo blokovať. Z dôvodu náročnej požiadavky na časové oneskorenie u správ GOOSE a SMV a všeobecnej limitácie zdrojov IED zariadení a podobných je reálne nasadenie odporúčaní IEC 62351 veľmi náročné. Komunikácia tak v praxi môže často ostať nešifrovaná a práve preto sú spomenuté techniky útočníkmi využívané najčastejšie. Pre účel úprav a následného odoslania rámcov do siete bol využitý nástroj Cat Karat Packet Builder [36]. Tento nástroj je využiteľný na windowsových platformách a disponuje grafickým rozhraním, cez ktoré je úprava rámcov/paketov pomerne jednoduchá.



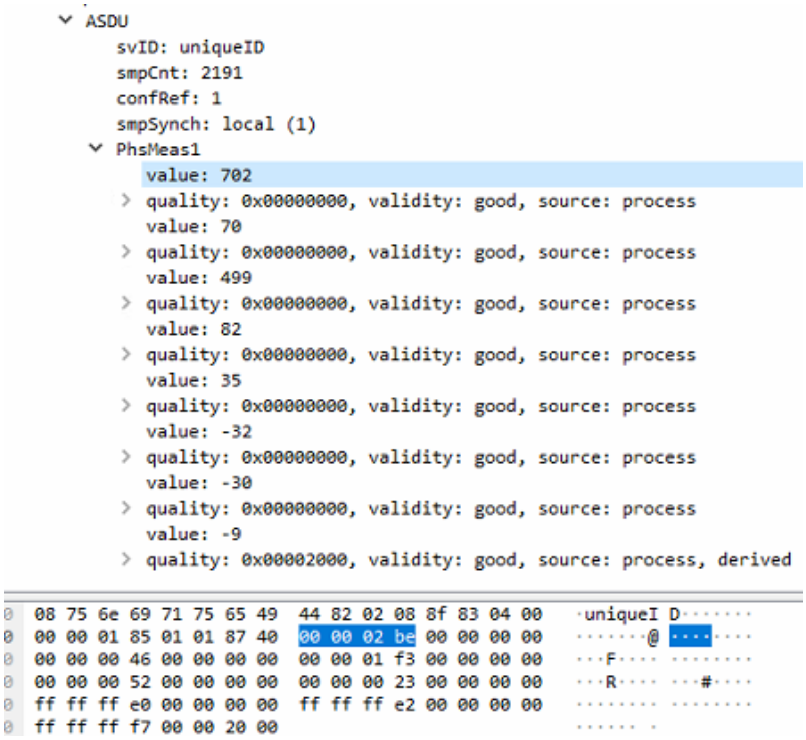

Obrázok 5.11 Ukážka grafického rozhrania využitého nástroja Cat KARAT Packet Builder.

Prvým testovaným kybernetickým útokom je zachytenie GOOSE/SMV komunikácie, jej modifikácia a následné odoslanie do siete tak, aby došlo k podvedeniu odberateľských zariadení. Aby odberateľské zariadenie rámce prijalo musia byť splnené určité podmienky. Prvou podmienku je, že rámce musia byť odoslané s reálnou MAC adresou IED vydavateľského zariadenia v rámci zdroja. Ďalej musia byť zachované základné polia rámcov a pri modifikácii parametrov je potrebné myslieť na úpravu všetkých pridružených polí.

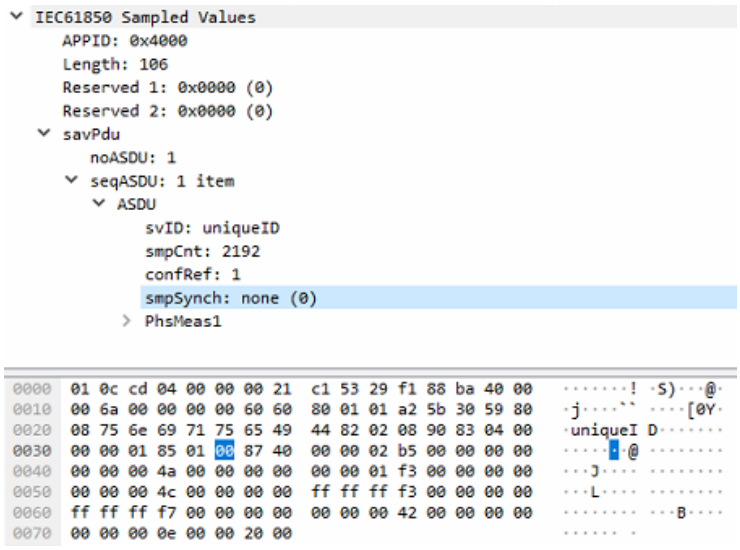
Prvým cieľom je napadnutie časovej synchronizácie SMV rámcov [37]. IEC 61850-9-2 definuje pole v SMV rámci nazvané smpSynch, ktoré prenáša informáciu o zdroji časovej synchronizácie, ktorý využíva zdrojové IED. Pole môže nadobúdať nasledovné hodnoty:

- SmpSynch = Remote (2); SMV sú synchronizované voči globálnym hodinám,
- SmpSynch = Local (1); SMV sú synchronizované voči lokálnym hodinám a
- SmpSynch = None (0); SMV môžu mať synchronizačný problém.

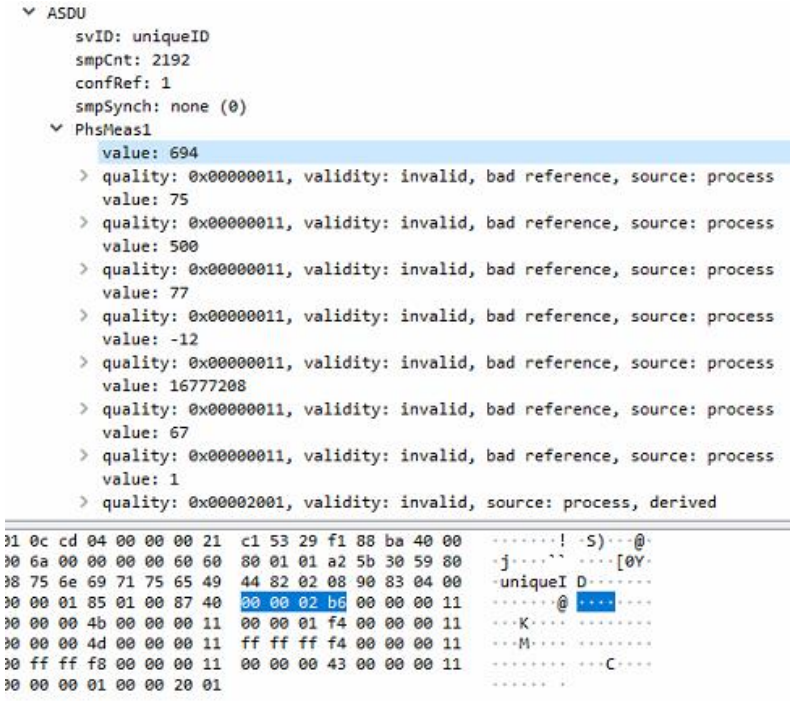
Z analytickej fáze útočník zistí v akom stave sa hodnota nachádza a tú následne vynuluje. V testovacom prostredí pole prenáša hodnotu SmpSynch: local (1), na základe čoho boli príslušné bity vynulované na SmpSynch: none (0). Ukážka originálneho rámcu s hodnotou local (1) a správnymi vzorkovanými hodnotami sa nachádza na obrázku 5.12 a rámec so zmenenou hodnotou smpSynch je ukázaný na obrázku 5.13. Ďalej bola inkrementová hodnota cmpCnt naznačujúca nový odber SMV hodnôt a do PhsMeas1 boli vsadené nové schválne nevalidné hodnoty, ukázané na obrázku 5.14.




Obrázok 5.12 Originálny SMV rámec s hodnotou smpSynch: 1.




Obrázok 5.13 Modifikovaný SMV rámec na falošnú hodnotu smpSynch: 0.




Obrázok 5.14 Ukážka rámcu s pozmenenými prenášanými hodnotami.

Po prijatí takto upraveného rámcu odberateľ reaguje rôznymi spôsobmi. Funkcie, ktoré sú citlivé na rozdiel fázového uhla medzi meraniami sú automaticky zablokované, čo následne môže viesť k celkovej poruche v rámci neštandardného stavu. Pri správnej implementácii protokolu SMV odberateľskej stanice dôjde k chybe "LDS_SmpSynchMismatch = 5", ktorá označí časovú synchronizáciu odoberaných SMV za rozdielnu voči vlastnému nastaveniu a rámec neprijme.

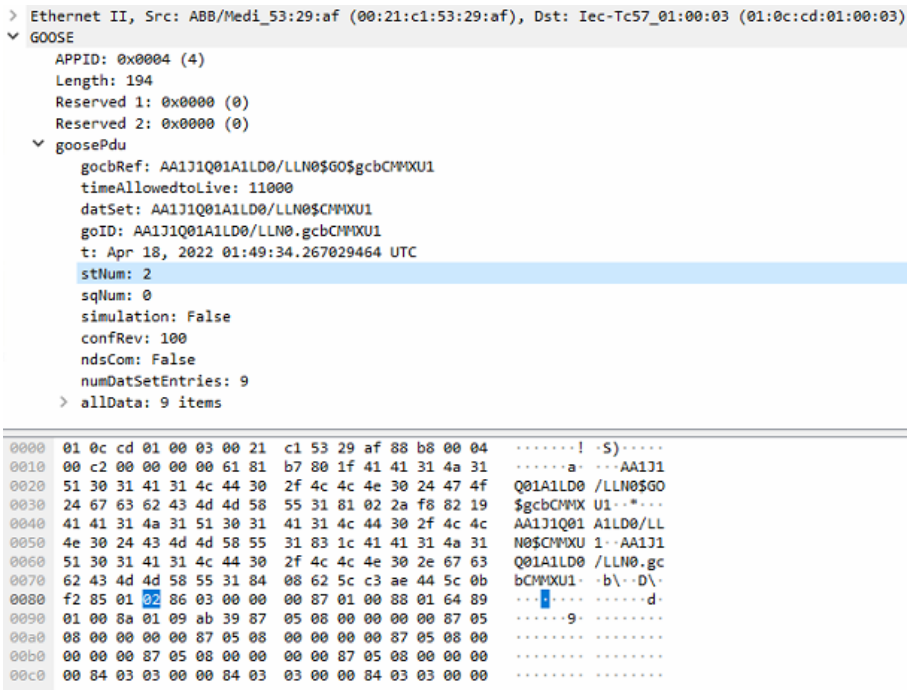
Ďalším cieľom je takzvaný spoofingový útok na GOOSE rámce, v ktorom sa jedná o vkladanie falošných rámcov do prevádzky tak, aby sa prijímacie zariadenia domnievali, že prijímajú správne dáta odoslané od legitímneho vydavateľského IED. Ako počiatočný bod útoku je použité útočnícke prostredie z fáz 1 a 2, ktoré dovoľuje legitímne rámce

fyzicky prijímať, dekódovať a analyzovať. Po rozbalení rámcu sú modifikované určité polia, rámec opäť zabalený a následne odoslaný do siete po L2 vrstve ISO/OSI referenčného modelu pomocou maskovania za legitímne vydavateľské IED. Rámec musí byť z tohto dôvodu odoslaný so zdrojovou MAC adresou legitímneho IED, ktoré je v testovacom prípade 00:21:c1:53:29:af.

V testovacom scenári ochrana REF615 pomocou funkcie kontroly vypínacieho obvodu odhalí reálnu chybu označenú ako TCS, ktorá je zobrazená na obrázku 5.15. Toto hlásenie indikuje poruchu vypínacieho okruhu a automaticky o chybe odosiela GOOSE správu určenú pre svojich odberateľov aby mohli sami spustiť ochranné funkcie a prípadne dať povel k prerušeniu obvodu. Pri detegovanej zmene hodnoty v rámci posielaných dát (DataSet) je v rámci inkrementované počítadlo stNum na vyššiu hodnotu a s ním je zároveň vynulované počítadlo sqNum. Nové hodnoty odosielaného rámcu sú zobrazené na obrázku 5.16.

| Type | Date & Time | Signal name | Status |
|---|---|---|---|
| P | 18.04.2022 1:49:45.272 | SCHLCCH2 CH2LIV | True |
| P | 18.04.2022 1:49:22.567 | TCS(1) ALARM | True |
| P | 18.04.2022 1:49:22.567 | TCS(2) ALARM | True |

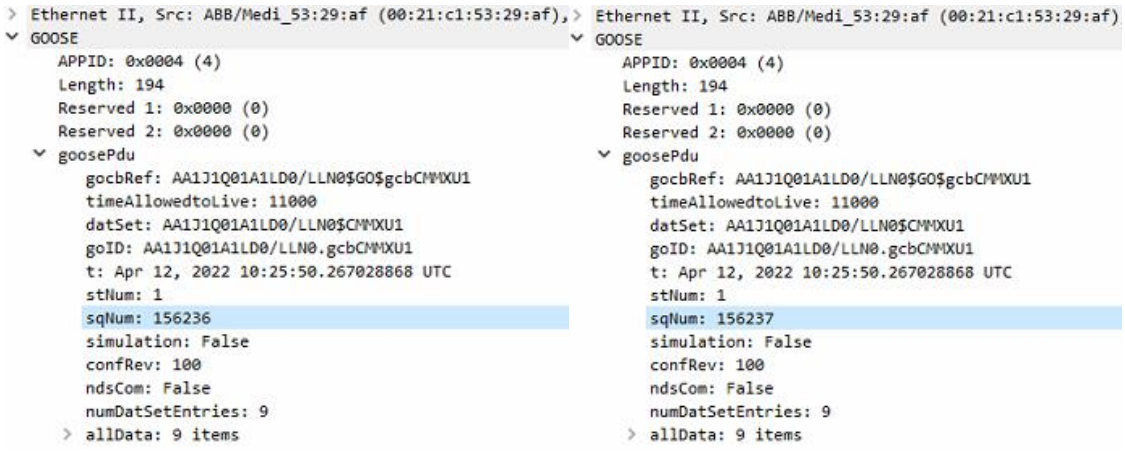
Obrázok 5.15 Alarm poruchy vypínacieho okruhu získaný z nástroja PCM600.




Obrázok 5.16 Ukážka inkrementácie hodnoty stNum pri hlásení chyby.

Útočník snažiaci sa napáchať čo najviac škôd do komunikácie vstúpi vlastnými rámcami, a pokúsi sa zmiasť odberateľské IED aby práve jeho rámce považovalo za legitímne a nové rámce s hodnotou stNum 2 za podvrhnuté a tie odmietlo. Vďaka zachytávaniu prevádzky sa z komunikácie vytiahne posledný rámec odoslaný pred vzniknutou chybou, dekóduje sa, inkrementuje sa hodnota sqNum a zakódovaný sa opäť odošle na lokálnu sieť. Pôvodný legitímny rámec aj novo vytvorený falošný rámec je

ukázaný na obrázku 5.17. U takéhoto typu útoku je veľmi dôležité správne načasovanie. Zo zachyteného pôvodného rámca je vytiahnutá hodnota timeAllowedtoLive: 11000, ktorá predstavuje frekvenciu odosielania GOOSE rámcov v milisekundách. Modifikovaný rámec je odoslaný o niečo skôr ako 11 sekúnd od pôvodného, nakoľko je potrebné aby dorazil pred ďalším legitímnym.

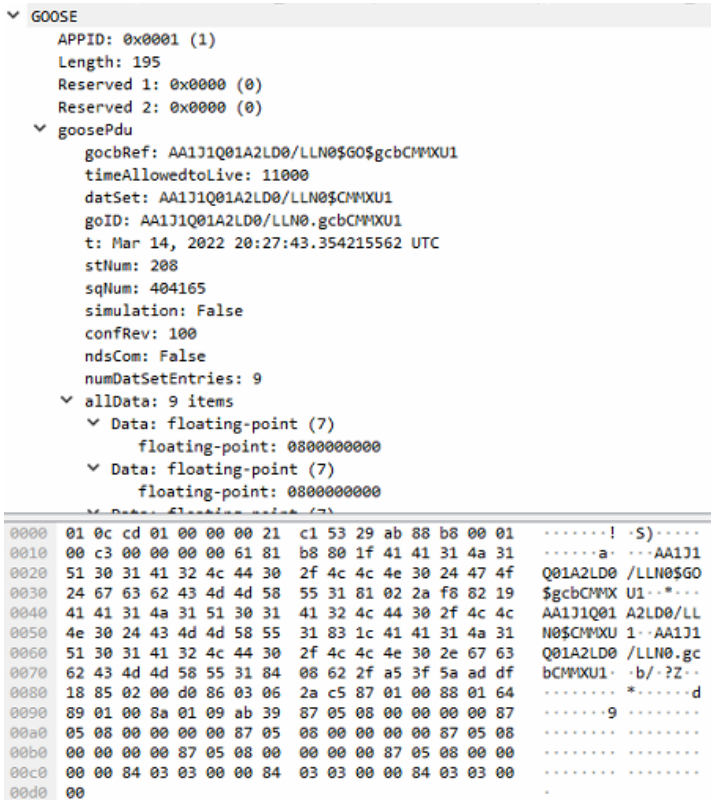



Obrázok 5.17 Posledný zachytený legitímny rámec v stNum: 1 a nový falošný rámec.

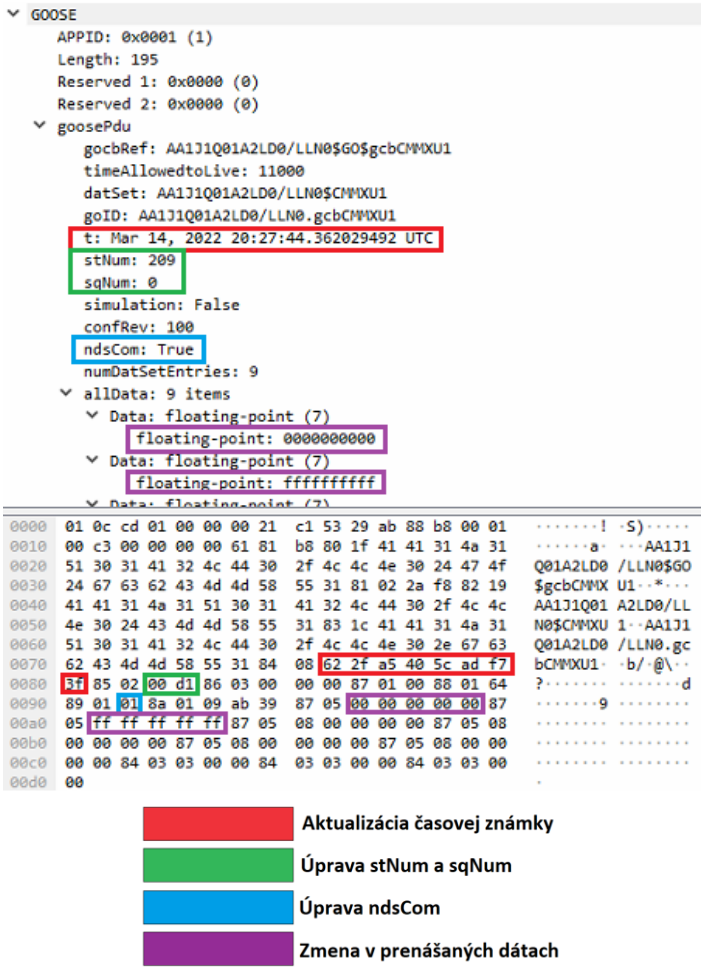
Vďaka pravidelnému odosielaniu ďalších nadväzných rámcov modifikovaných o inkrementáciu sqNum je po určitý čas možné docieliť stavu, kedy odberateľské IED považuje útočnícke rámce za legitímne a ostatné zahadzuje. Vďaka tomu môže dôjsť k šíreniu reálnej chyby s potencionálnymi závažnými následkami.

Opačným scenárom je pokus útočníka o vytvorenie falošnej informácie o chybe. Podobne ako u predošlých útokov je východiskom zachytávanie sieťovej komunikácie a analýza rámcov. Následne opäť dochádza k modifikácii polí, zabalenia dát do Ethernetového rámcu a odoslanie do lokálnej siete v čase packetT + timeAllowedtoLive, kde packetT značí časovú známku odoslania pôvodného rámcu. Obrázok 5.18 znázorňuje pôvodný zachytený rámec odoslaný IED zariadením s MAC adresou 00:21:c1:53:29:ab a obrázok 5.19 následný modifikovaný rámec. Cieľom je informovať odberateľské zariadenia a prípadne aj administrátorov o neštandardnom stave a potrebnom zásahu. Nakoľko sa jedná o falšovanie zmeny dát, je v prvom rade potrebná aktualizácia časovej známky zmeny, teda poľa t na novú hodnotu. Následne je inkrementované pole stNum a vynulované pole sqNum. Tieto úpravy odberateľskému IED naznačia, že vydavateľské zariadenie zaznamenalo problémovú udalosť, o ktorej informuje ďalej. Úprava poľa ndsCom na pravdivú hodnotu zaistí vyžiadanie fyzickej pozornosti administrátorov. Pole ndsCom je totiž častou indikáciou konfiguračnej nezhody v zariadení. Posledným krokom modifikácie je úprava konkrétnych prenášaných hodnôt, ktoré sú priamym vyjadrením vzniknutého neštandardného stavu na monitorovanom úseku. Po vykonanej modifikácii polí je za pomoci nástroju Cat KARAT Packet Builder rámec opätovne poskladaný, maskovaný za adresou 00:21:c1:53:29:ab a multicastovo odoslaný na LAN. Odberateľské zariadenie rámec prijíma, vykonáva patričnú nakonfigurovanú činnosť a administrátorov informuje o nutnosti preverenia zasielateľského zariadenia. Útočníci týmto spôsobom

docielia vytvorenie falošného incidentu, ktorý zároveň odlákal pozornosť administrátorov od skutočného problému alebo chystanej série útokov.




Obrázok 5.18 Pôvodný GOOSE rámec.




Obrázok 5.19 Modifikovaný GOOSE rámec s farebnou legendou.

V rámci série útokov na modifikáciu polí v rámcoch je možné zacieliť napríklad aj na VLAN pole. Niektoré prostredia aktívne pracujú s VLAN informáciami prenášanými v paketoch. Výnimkou tak nemusia byť ani IED, ktoré môžu byť nakonfigurované aby u SMV alebo GOOSE rámcov vyžadovali správne priradenú VLAN značku (tag). Pokiaľ by odberateľ obdržal neoznačkovaný rámec, teda bez informácie o VLAN, mohol by rámec zahodiť a správu neprijať. Útočník sa v tomto prípade môže zacieliť na konkrétnu 4 bajtovú časť v rámci IEEE 802.1Q hlavičky a upraviť v nej hodnotu VID, ktorá prenáša VLAN identifikátor. Pokiaľ vo VID už hodnota nastavená bola, IED s ňou počíta a útočník ju môže buď vynulovať alebo prestaviť na inú. V rámci testovacieho prostredia neboli VLAN využité, preto je tento útok predstavený ako potenciálne rozšírenie testovania.

Ďalším testovaným kybernetickým útokom je muž uprostred (Man in The Middle). Jedná sa o jednu z najčastejšie používaných techník cielených najmä na nešifrované komunikačné toky, kde sa útočník stavia medzi dve komunikujúce strany. Prostredníctvom spoofingových techník falšuje svoju identitu vždy za jednu z komunikujúcich strán. Pôvodné komunikujúce strany tak ostávajú v domnienke, že sa na druhej strane nachádza legitímny komunikátor, ale v realite sa ním stáva útočník.

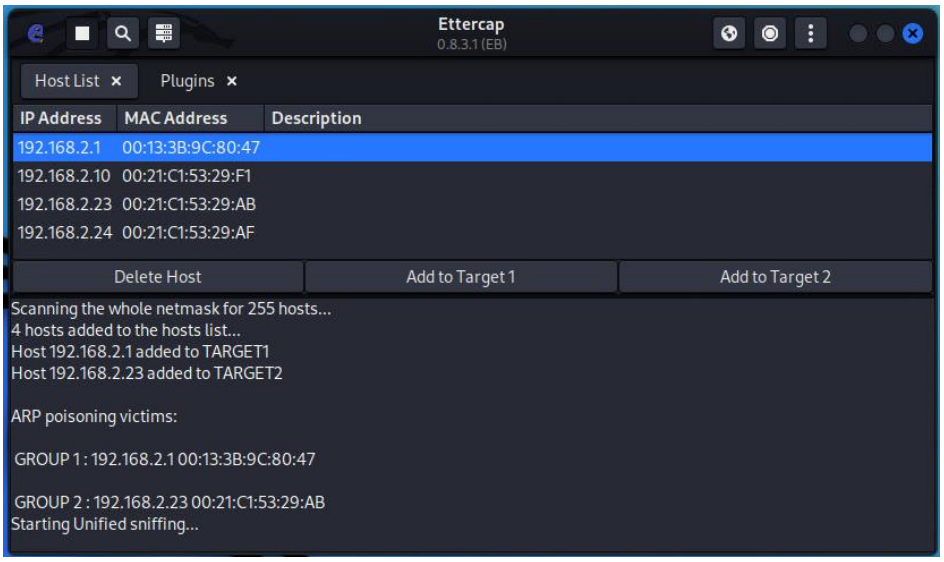
V prvom kroku je vykonaný útok otrávenia ARP protokolu. ARP protokol je využívaný na objavenie MAC adries zariadení nachádzajúcich sa na lokálnej sieti a ich mapovanie na IP adresy do ARP tabuliek nachádzajúcich sa na každom komunikujúcom zariadení. Tento proces je napadnuteľný napríklad prostredníctvom nástroja Ettercap, ktorý na windowsovú stanicu a IED zariadenie odošle vlastnú ARP správu tváriaci sa ako protistrana, čím sú vo výsledku prepísané hodnoty v ARP tabuľke. Pre overenie pôvodných hodnôt je vypísaná ARP tabuľka na windowsovej stanici pomocou príkazu arp -a, zobrazená na obrázku 5.20. Cieľom pre útok sa stáva IED zariadenie s MAC adresou 00-21-c1-53-29-ab a IP adresou 192.168.2.23.

```
Interface: 192.168.2.1 --- 0xf
  Internet Address      Physical Address      Type
  192.168.2.10          00-21-c1-53-29-5f     dynamic
  192.168.2.23          00-21-c1-53-29-ab     dynamic
  192.168.2.24          00-21-c1-53-29-af     dynamic
  192.168.2.100         08-00-27-0e-34-8d     dynamic
  192.168.2.255         ff-ff-ff-ff-ff-ff     static
  224.0.0.22            01-00-5e-00-00-16     static
  224.0.0.251           01-00-5e-00-00-fb     static
  224.0.0.252           01-00-5e-00-00-fc     static
  239.255.255.250       01-00-5e-7f-ff-fa     static
```

Obrázok 5.20 Výpis ARP tabuľky na windowsovej stanici.

Na útočníckej stanici s distribúciou Kali Linux je v prvom kroku upravená sieťová konfigurácia pre povolenie zachytávania a preposielania IP komunikácie prostredníctvom príkazu *echo 1 > /proc/sys/net/ipv4/ip_forward*. Obdobné nastavenie je aj priamo v konfiguračnom súbore nástroja Ettercap, ktorý sa obvykle v adresárovej štruktúre nachádza v /etc/ettercap/etter.conf. Konkrétne sa jedná o príkazy *redir_command_on* a *redir_command_off*, ktoré je potrebné odkomentovať. Výsledný stav prezentuje obrázok. Následne je spustené grafické rozhranie nástroja pomocou príkazu *ettercap -G*.

V grafickom rozhraní sa špecifikuje zachytávanie prevádzky na Unified sniffing a vyberie sa konkrétne sieťové rozhranie, na ktoré sa bude zachytávanie vzťahovať. V ďalšom kroku sa vyberú ciele útoku na základe rýchleho automatického skenu siete. Najprv je z menu vybraná možnosť Host > Scan for hosts, ktorá sken inicializuje a jeho úspešné dokončenie značí výpis, že boli hosty pridané na host list. Z menu sa opäť vyberie možnosť Host a ďalej tento krát Hosts list. Výstupom je prehľadný zoznam zariadení vo formáte IP adresa, MAC adresa a prípadný popis. Zo zoznamu sa pomocou kliknutia priamo na adresu a následne na tlačidlo Add to Target zariadenie označí za cieľ. Z menu Mitm je následne vybraný útok arp poisoning a spustený cez možnosť Start > Start sniffing. Priebeh útoku je zobrazený na obrázku 5.21.



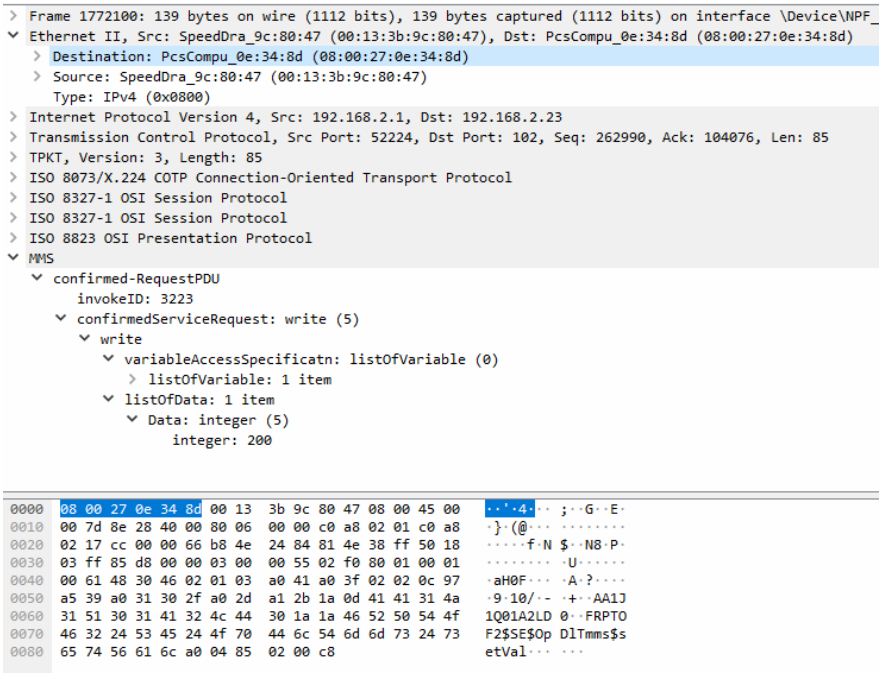

Obrázok 5.21 Grafické rozhranie nástroja Ettercap počas prebiehajúceho MITM útoku.

Úspešné prepísanie je overené opätovným vypísaním ARP tabuľky na windowsovej stanici. Výsledok je zobrazený na obrázku 5.22, na ktorom je už nová asociácia IP adresy 192.168.2.23 s MAC adresou útočníckeho stroja 08-00-27-0e-34-8d.

```
Interface: 192.168.2.1 --- 0xf
  Internet Address      Physical Address      Type
  192.168.2.10          00-21-c1-53-29-5f     dynamic
  192.168.2.23          08-00-27-0e-34-8d     dynamic
  192.168.2.24          00-21-c1-53-29-af     dynamic
  192.168.2.100         08-00-27-0e-34-8d     dynamic
  192.168.2.255         ff-ff-ff-ff-ff-ff     static
  224.0.0.22            01-00-5e-00-00-16     static
  224.0.0.251           01-00-5e-00-00-fb     static
  224.0.0.252           01-00-5e-00-00-fc     static
  239.255.255.250       01-00-5e-7f-ff-fa     static
```

Obrázok 5.22 Výpis ARP tabuľky na windowsovej stanici, zmena MAC adresy.

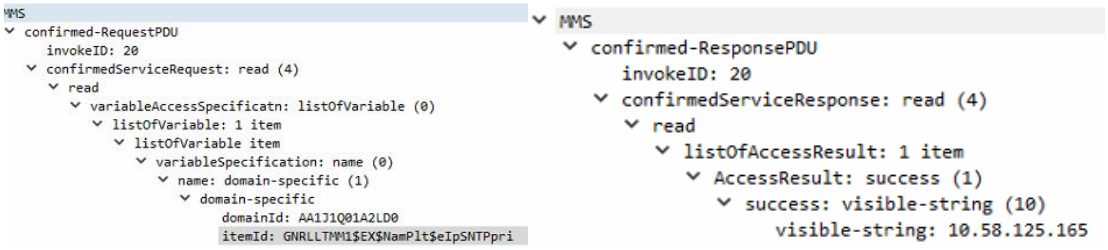
Akákoľvek komunikácia medzi cieľovými zariadeniami prechádza cez prostredníka - útočnícku stanicu. Sieťová prevádzka oboch cieľových staníc s inými systémami je z dôvodu minimalizácie detekcie nepozmenená. Predmetom záujmu útočníka je práve komunikácia protokolu MMS, ktorá prebieha priamo na úrovni cieľových staníc. Obrázok 5.23 predstavuje zachytený MMS paket originálne smerovaný na IED zariadenie, kde je vďaka útoku pozmenená MAC adresa cieľového zariadenia za útočníkovu a reálne je tak paket presmerovaný.



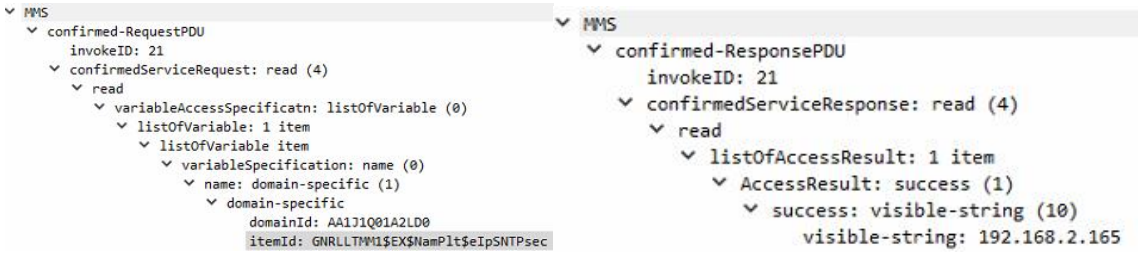

Obrázok 5.23 Ukážka zachyteného paketu smerujúceho na IED, ale s MAC adresou útočníka.

Z tohto bodu ma útočník viacero možností a smerov, ktorými by v útoku mohol pokračovať. Najbezpečnejším variantom je komunikáciu preposielať bez zásahu, vďaka čomu má možnosť do prenášaných informácií priamo nahliadať s nízkym predpokladom odhalenia. Tento smer je založený na taktikách Persistence, Discovery a Collection z ATT&CK rámca, ktoré môžu byť využité ako medzi fáza pri komplexných kybernetických útokoch. Sledovaním komunikácie je možné získať podrobnejšie informácie o komunikujúcich zariadeniach, ale zároveň aj informácie o ďalších potencionálnych cieľoch a zraniteľnostiach. Aktívnejšími smermi je priama interakcia s preposielanými paketmi vo forme modifikácie stávajúcich dotazov a informácií, vkladanie vlastných dát až celých paketov alebo zastavenie preposielania, čím dôjde k úplnej blokácii MMS komunikácie.

Obrázky 5.24 a 5.25 predstavuje príklad zachytenej MMS komunikácie pomocou MitM útoku, v ktorej boli objavené dotazy na premenné GNRLLTMM1$EX$NamPlt$eIpSNTPpri a GNRLLTMM1$EX$NamPlt$eIpSNTPsec, ktoré v odpovedi vracajú informácie o IP adrese primárneho SNTP serveru 10.58.125.165 a záložného SNTP serveru 192.168.2.165. Pri pokračovaní útoku by útočník mohol zneužiť zraniteľnosť na objavených SNTP serveroch alebo prostredníctvom manipulácie s MMS komunikáciou na IED zariadenie poslať príkaz na zmenu IP adresy SNTP, čo by mohlo spôsobiť reboot zariadenia a tým pádom jeho nedostupnosť v rámci sekúnd až minút.




Obrázok 5.24 Zachytený paket s informáciou o primárnom SNTP servery.




Obrázok 5.25 Zachytený paket s informáciou o záložnom SNTP servery.

Ďalším prakticky testovaným útokom voči IED zariadeniam je záplavový útok, ktorý je známy aj ako Denial of Service (DoS). Pri záplavových útokoch útočníci posielajú na cieľový systém veľmi vysoký a frekventovaný objem prevádzky so zámerom zahltiť komunikačný kanál cieľového zariadenia natoľko, aby nedokázalo prijímať legitímnu komunikáciu. Takýto útok je pomerne jednoduchý na vykonanie, ale na druhej strane prináša útočníkovi obrovskú pozornosť. Na vykonanie záplavového útoku sú štandardne zneužívané sieťové protokoly TCP, UDP, HTTP, ICMP a podobné v závislosti od podpory cieľového systému. Pre testovanie odolnosti REF615 voči záplavovým útokom bol zvolený protokol ICMP a verejne prístupný nástroj hping3. Jedná sa o sieťový testovací nástroj dostupný pre linuxové platformy ovládateľný cez terminál. Nástroj umožňuje kontrolovať veľkosť, množstvo a fragmentáciu odoslaných paketov s cieľom zahltiť cieľový systém. Obrázok 5.26 v prvej časti predstavuje spustenie inštancie záplavy s parametrami:

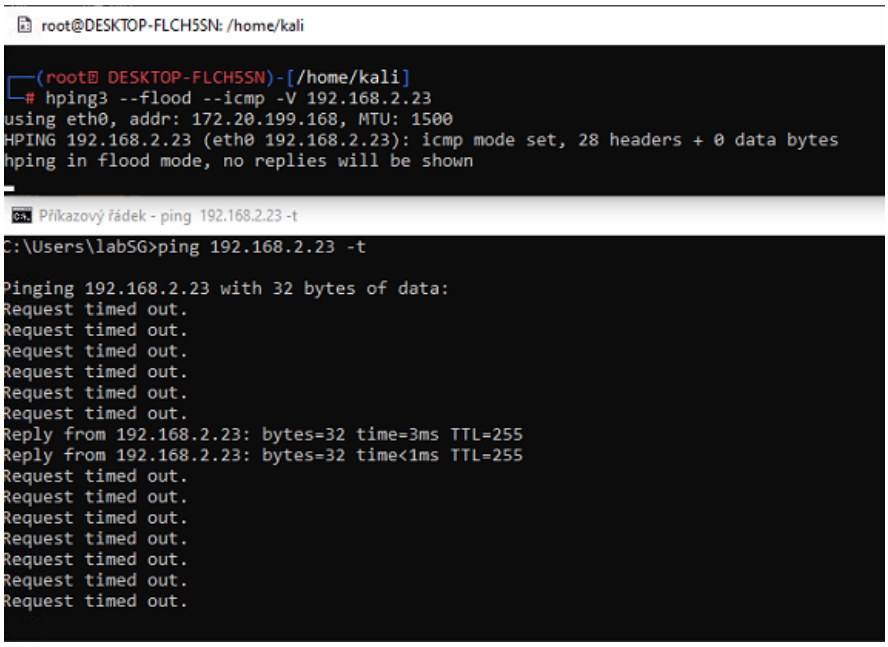
--flood, definujúci využitie čo najväčšieho možného objemu odoslaných paketov a neočakávanie odpovedí,

--icmp, definujúci využitie protokolu ICMP echo request,

-V, definujúci verbositu,

192.168.2.23, definujúci cieľový systém.

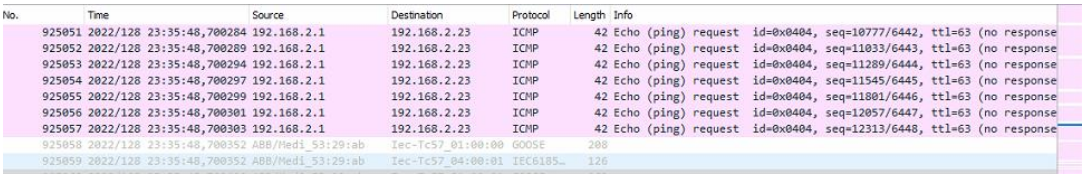
V druhej časti obrázku 5.26 je na windowsovej stanici paralelne spustený príkaz ping, ktorý kontroluje odozvu cieľového systému. Hneď je pozorovaná stratovosť.




Obrázok 5.26 Spustenie záplavového útoku cez nástroj hping3 a legitímne testovanie dostupnosti z windowsovej stanice.

Útok prebiehal po dobu 3 minút, počas ktorých bolo odoslaných 14 143 347 paketov. Útočiaca stanica po celú dobu od zariadenia neobdržala žiadnu odozvu, čo zobrazuje obrázok. Windowsová stanica obdržala minimálny počet paketov s celkovou stratovosťou 93% a maximálnou latenciou 3ms.

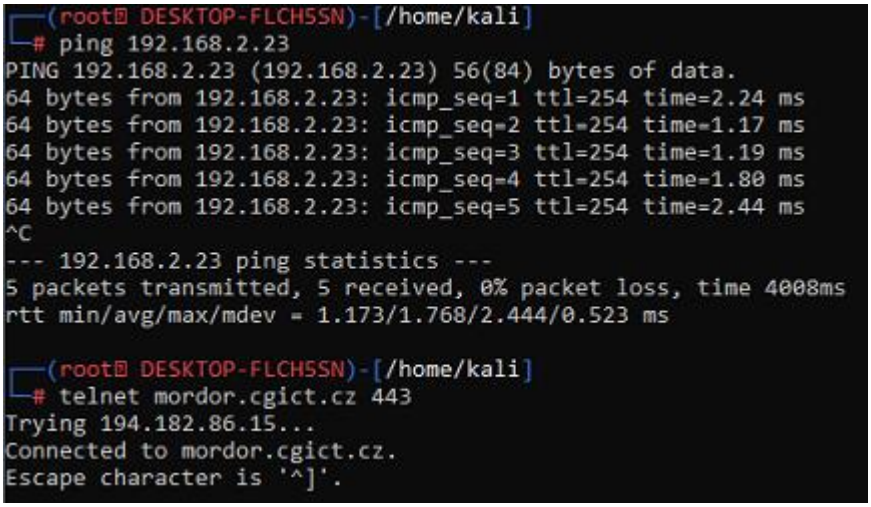
Výsledok útoku je prezentovaný na obrázku 5.27 zo sledovania komunikácie nástrojom Wireshark. Počas doby trvania útoku úspešne došlo k zahlteniu komunikačného kanálu, ktorý nedokázal spracovávať všetky prijímané správy a vo výsledku na ne nereagoval. Po dobu zahltenia zariadenie nereagovalo ani na legitímne správy, kvôli čomu by v prípade reálnej chyby nespracovalo GOOSE správu od odosielateľa. Vďaka ušetreným zdrojom nereagovaním na prichádzajúce správy zariadenie dokázalo posielať svoje vlastné GOOSE a SMV správy aj počas zahltenia kanálu.




Obrázok 5.27 Výstup z analýzy komunikácie nástrojom WireShark počas útoku.

Pre útočníka zaujímavým cieľom je v rámci testovacieho prostredia aj windowsová stanica a to z dôvodu, že jej kompromitácia by mohla otvoriť dvere do celého OT prostredia. V praxi sú taktiež stanice nachádzajúce sa na prelome IT/OT často označované za rizikové, nakoľko je vďaka ich príslušnosti do IT možná kompromitácia prostredníctvom väčšieho spektra taktík a vektorov a vďaka presahu do OT ponúkajú priestor pre laterálny pohyb útočníka. Presah windowsovej stanice medzi IT/OT je zobrazený na obrázku 5.28, ktorý vyjadruje sieťový dosah na IED zariadenie s IP adresou

192.168.2.23 overený programom ping a zároveň dosah na internetové služby overené programom telnet smerovaným na štandardne používaný TCP port 443. V reálnych prostrediach často býva povolená odchádzajúca komunikácia z týchto staníc cez štandardné porty ako TCP 80 alebo TCP 443, ktoré môžu byť zneužívané pre maskovanie škodlivej komunikácie alebo pre komunikáciu škodlivého softvéru s riadiacim centrom. Technikám komunikácie s riadiacim centrom v rámci priemyselných prostredí sa venuje taktika Command and Control z ATT&CK rámcu.




Obrázok 5.28 Ukážka možnosti zneužitia štandardných portov pre laterálny pohyb.

V rámci zacielenia a zneužitia windowsovej stanice v testovacom prostredí je z ATT&CK rámca možné použiť hneď niekoľko techník. Príkladom je technika zvýšenia oprávnení, kde po prvotnom preniknutí do systému môže útočník operovať iba s určitou úrovňou oprávnení a často sa jedná o nižšie úrovne procesov, ktoré mu bránia v prístupe k určitým zdrojom. Na systéme ale môžu existovať zraniteľnosti, ktorých zneužitím získa vyššie úrovne a napríklad prejde z neprivilegovaných alebo užívateľských oprávnení priamo na SYSTEM alebo root v závislosti od zraniteľného komponentu. Ďalším spôsobom ako dosiahnuť zvýšenia privilégií môže byť aj využitie techniky Brute-Force či sociálneho inžinierstva pre získanie prístupových údajov k už existujúcemu vysoko privilegovanému účtu. Vo vytvorenom testovacom prostredí je k dispozícii najvyššie možné oprávnenie na úrovni systému. Z dôvodu udržania konzistentnosti boli testované útoky zamerané na IED zariadenia a OT časť.

### 5.3.5 Zhodnotenie predpokladov využiteľnosti a rizika útokov

Na základe stanovenej metódy analýzy rizík v priemyselných prostrediach z kapitoly 5.2 je zostavená tabuľka 5.6 predstavujúca predpoklad využiteľnosti testovaných útokov a riziko na základe ich dopadu a aktuálne nasadených mitigačných opatrení. Jednotlivé výpočty s odôvodnením hodnôt sa nachádzajú v prílohe B tejto práce.

Tabuľka 5.6 Výpočet rizikovosti pre testované útoky

| **Útok** | $\mathbf{P_U}$ | $\mathbf{P_E}$ | **D** | **R** |
|---|---|---|---|---|
| Analýza sieťovej komunikácie/Odpočúvanie | 1 | 0 | 0.3 | **0.3** |
| Časová synchronizácia SMV | 0.4 | 0.19 | 1 | **0.33** |
| GOOSE Spoofing | 0.4 | 0.32 | 1 | **0.27** |
| MMS MitM pasívny | 0.85 | 0.04 | 0.3 | **0.24** |
| MMS MitM aktívny | 0.85 | 0.49 | 1 | **0.43** |
| DoS ICMP Flood | 1 | 0.54 | 1 | **0.54** |

Výsledky analýzy rizík testovaných útokov ukazujú, že najrizikovejším útokom pre testovacie prostredie je DoS a v tesnom závese aktívna verzia útoku MitM. Aj napriek tomu, že sú útoky ľahko detekovateľné, čo značia vyššie hodnoty $P_E$ , je ich rizikovosť najvyššia vďaka pôsobeniu vysokého oneskorenia na cieľových systémoch. Dostupnosť a nízke oneskorenie sú najdôležitejšou ale zároveň najťažšie ochraniteľnou bezpečnostnou požiadavkou priemyselných energetických systémov. Útoky, ktorým sa podarí túto požiadavku narušiť sú považované za závažné a je dôležité predchádzať ich úspechu nasadením správnych mitigačných mechanizmov.

# 6. MITIGÁCIA ÚTOKOV

V tak dynamickom odvetví akým je kybernetická bezpečnosť je dôležité dbať na zabezpečenie z komplexného hľadiska. Denne je objavené množstvo nových systémových zraniteľností, bezpečnostných dier ale aj prevádzkových vlastností, ktoré je možné zneužiť na kompromitáciu cieľového systému alebo jeho časti. Bezpečnostní pracovníci síce pohotovo reagujú na objavené nedostatky implementáciou záplat a bezpečnostných mechanizmov, ale útočníci paralelne nachádzajú spôsoby ako tieto mechanizmy obchádzať. V priemyselnom odvetví sa navyše často jedná o zastaranejšie a výpočtovo limitované systémy. Nasadenie bezpečnostných aktualizácií a mechanizmov na takéto systémy vyžaduje časovo náročné testovanie a ladenie, čo v produkčnom prostredí môže znamenať oneskorenie reálneho nasadenia. Z tohto dôvodu je často jednovrstvová bezpečnosť nedostatočná a preto by implementácia mitigačných mechanizmov mala prebiehať vo viacerých vrstvách. Hlavnou výhodou je dosiahnutie komplexného bezpečnostného riešenia pre detekciu, ohlásenie, kontrolu a blokovanie a tým zaistenie základných bezpečnostných požiadaviek dôvernosti, integrity a dostupnosti. Navrhovanými vrstvami sú:

1. Úroveň operačných technológií (OT)
2. Úroveň informačných technológií (IT)
3. Úroveň perimetru
4. Fyzická úroveň

## 6.1 Mitigácia na úrovni operačných technológií (OT)

Primárnym dokumentom, ktorý sa zaoberá zabezpečením priemyselných protokolov a z ktorého je odporúčané vychádzať pri nasadzovaní mitigačných opatrení je súbor noriem IEC 62351. Ako ale bolo naznačené v kapitole 2, latencia je hlavnou prekážkou pri priamej implementácii stanovených bezpečnostných opatrení. Napríklad protokol GOOSE preto so svojou požiadavkou 3 ms maximálnej odozvy nie je predisponovaný prijať šifrovacie opatrenia alebo akékoľvek iné opatrenia, ktoré by zvýšili komunikačné oneskorenie alebo latenciu. Nasledujúca tabuľka 6.1 sumarizuje dostupné mitigačné mechanizmy aplikovateľné priamo na IED zariadenia a príslušné využívané komunikačné protokoly.

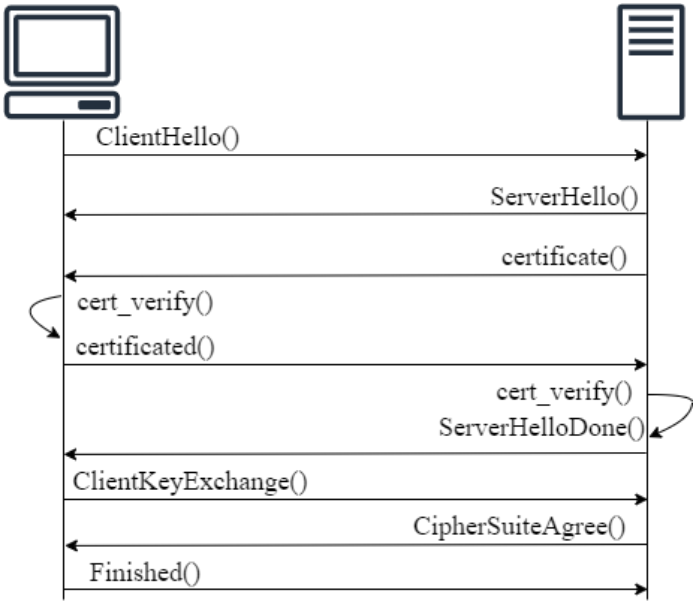
Tabuľka 6.1 Prehľad mitigačných opatrení na úrovni OT

| **Mitigácia** | **Popis** | **Bezpečnostná požiadavka** | **GOOSE** | **SMV** | **MMS/-104** |
|---|---|---|---|---|---|
| Autentickosť správ | Pridanie HMAC hodnoty do poľa Extension pre GOOSE/SMV a autentizačné mechanizmy na úrovni MMS. | Integrita | Áno | Áno | Áno |
| Riadenie kľúčov | Nasadenie mechanizmu distribúcie a správy kľúčov. | Integrita, Dôvernosť | Áno | Áno | Áno |
| Šifrovanie správ | Využitie symetrických kryptografických šifier, TLS. | Dôvernosť | Nie | Nie | Áno |
| Zoznam povolených IED | Prijímanie rámcov na odberateľskej stanici iba od povolených zariadení | Dôvernosť | Áno | Áno | Nie |
| IEC (R)61850 Gateway | Využitie brány na prechod L2 protokolov na smerovateľné a šifrované toky. | Integrita, Dôvernosť | Áno | Áno | Nie |
| Vysoká Dostupnosť | Nasadenie viacerých IED zariadení na rovnaký segment. | Dostupnosť | Áno | Áno | Áno |
| IEEE 802.1Q | Priradenie rámcom/paketom VLAN príslušnosť. | Dôvernosť | Áno | Áno | Áno |

### 6.1.1 Autentickosť správ

Na úrovni GOOSE/SMV rámcov je možné docieliť dôvernosti správ a zároveň aj požadovanej časovej odozve prostredníctvom kryptografického autentizačného mechanizmu HMAC, ktorý je zároveň bezpečnostným odporúčaním podľa IEC 62351. Pôvodným odporúčaním IEC 62351 na zaistenie dôvernosti a integrity odosielaných SMV/GOOSE rámcov je využitie digitálnych podpisov generovaných pomocou SHA256 hashovacej funkcie a kybernetického algoritmu RSA. Výsledná hodnota by bola pripojená do poľa Extensions. Nakoľko bolo viacerými výskumníkmi pozorované prekročenie vyžadovanej 3ms odozvy kvôli výpočtovým zaťaženiam, je odporúčané využitie ľahšieho mechanizmu – HMAC. Rezervované polia v odosielaných rámcoch podľa IEC 62850-8-1 môžu byť využité aj na prenášanie hodnoty HMAC a potrebných informácií na jej interpretáciu. Konfigurácia IED na využívanie bezpečnostných rozšírení v rámcoch sa vykoná pomocou SCL. Následne je pre generovanie a overovanie hodnoty HMAC na úrovni IED potrebná distribúcia pred zdieľaných kľúčov a tým pádom aj zavedený kľúčový management definovaný podľa IEC 62351-9. Konkrétne odporúčané kryptografické algoritmy sú vyhodnotené v tabuľke 2-1 tejto práce.

Dosiahnutie autentickosti správ protokolu MMS môže byť zaistené nasadením autentizačného mechanizmu založeného na certifikátoch, ktorý je priamym bezpečnostným odporúčaním podľa IEC 62351-4. IEC 62351-4 ďalej stanovuje minimálne a odporúčané šifrovacie sady pre zostavenie bezpečného TLS spojenia, ktoré sú vyhodnotené v tabuľke 2-2 tejto práce. Zostavenie bezpečného spojenia využíva port 3782 sieťovej vrstvy a začína zriadením a vyjednaním TLS relácie, kedy sú vymenené a voči certifikačnej autorite overené X.509 certifikáty klienta a následne serveru. Po úspešnej autentizácii pokračuje zostavovanie bezpečného spojenia výmenou tajného kľúču využitím kryptografického algoritmu výmeny verejných kľúčov ako napríklad Diffie-Hellman (DH) alebo RSA. Použitím tajného kľúču dôjde k dohodnutiu celej šifrovacej sady. Po vyjednaní a založení bezpečného spojenia dochádza k prenosu samotných dát. Priebeh vyjednania TLS spojenia je zobrazený na obrázku 6.1, kde na ľavej strane je predstavený klient komunikujúci na server na pravej strane. Na obrázku sú ďalej znázornené jednotlivé kroky s funkčnými názvami.




Obrázok 6.1 Výmena správ medzi klientom a serverom pre zostavenie TLS spojenia.

### 6.1.2 Distribúcia a riadenie kľúčov

IEC 62351-9 zahŕňa aspekty riadenia kľúčov požadovaného všetkými protokolmi a systémami definovanými v skupine noriem IEC 62351 a preto sa stáva primárnym dokumentom pri implementácii kľúčového riadenia. V závislosti od využívaných komunikačných protokolov a na nich nasadených bezpečnostných mechanizmov je potrebné v rámci kľúčového riadenia implementácia rôznych mechanizmov. Pre zaistenie správnej HMAC funkčnosti je potrebné distribuovať na komunikujúce IED stanice pred zdieľané kľúče. Pre funkčnosť TLS u protokolu MMS je potrebné zaistenie vydávania, overovania a distribúcie bezpečnostných certifikátov X.509 (prostredníctvom vlastnej certifikačnej autority alebo využitím dôveryhodných verejných autorít).

Dôležitú úlohu zohráva prijatie skupinovej domény interpretácie (GDOI) definovanej v RFC 6407. Táto interpretácia zaisťuje, že vydavateľské a odberateľské stanice

využívajúce GOOSE môžu generovať a používať platné kľúče relácie efektívnym a bezpečným spôsobom.

### 6.1.3 Šifrovanie správ

Z dôvodu kombinácie časovej kritickosti a všeobecne nízkeho výpočtového výkonu IED zariadení, nie je použitie šifrovacích algoritmov pre GOOSE a SMV správy v praxi odporúčané. Nutnosťou by bolo zvýšenie výkonu samotných IED zariadení, čo je vzhľadom na požadovanú interoperabilitu príliš nákladové. Šifrovanie komunikácie je preto odporúčané až pre aplikácie využívajúce 3. a vyššiu vrstvu referenčného modelu ISO/OSI ako napríklad MMS alebo IEC 60870-5-104. Odporúčaním je taktiež využívať šifrované protokoly HTTPS (namiesto HTTP), SFTP (namiesto FTP) a SSH.

### 6.1.4 Zoznam povolených IED

Operátor môže definovať a vytvoriť zoznam povolených vydavateľských IED s informáciou o príslušných dátach v PDU na základe kontroly svID a goID . Použitie nedefinovaného ID by sa dalo ľahko zistiť. Sledovať by bolo možné aj neštandardné opakovania rámcov alebo GOOSE/SMV počítadlá obsahujúce číslo mimo očakávaného poradia (stNum, sqNum a smpCnt). Limitom takejto mitigácie je nízka účinnosť voči útočníkom maskujúcim sa za legitímnych IED vydavateľov.

### 6.1.5 IEC (R)61850 Gateway

Jednou z najjednoduchších implementácií prechodu L2 GOOSE/SMV na smerovateľné GOOSE/SMV je použitie brány, ktorá je na jednej strane odberateľom „tradičných“ správ L2 GOOSE/SMV vydávaných IED pripojenými k lokálnej sieti, ale na druhej strane zverejňuje prijaté správy ako UDP/IP multicast premávku. Využitie prechodových brán v internej infraštruktúre môže poskytnúť IED zariadeniam externé prostriedky využiteľné pre zostavenie šifrovaného komunikačného média. Komunikácia medzi vydavateľským a odberateľským IED by tak bola šifrovaná aspoň na úrovni medzi dvoma bránami, čím by došlo k čiastočnému plneniu požiadaviek dôvernosti a integrity a zachovaniu nízkej časovej odozvy. V praxi je využitie brány cielené na komunikáciu mimo lokálnych sietí alebo cez WAN.

### 6.1.6 Vysoká dostupnosť

IEC 62351 nedisponuje bezpečnostnými odporúčaniami, ktoré by dokázali naplniť požiadavku dostupnosti. V priemyselných systémoch je požiadavka dostupnosti najdôležitejšia, ale zároveň najnáročnejšia na zaistenie. Príkladom mitigačného mechanizmu pre zaistenie dostupnosti je nasadenie IED zariadení v režime vysokej dostupnosti. Prakticky by boli na kritické segmenty a obvody nasadené duplicitné vydavateľské IED zariadenia, ktoré by slúžili pre potvrdenie a overenie prípadnej nedostupnosti. V testovacom prostredí by sa jednalo o ďalšie REF615 zariadenia vykonávajúce rovnakú kontrolnú, ochrannú činnosť a publikujúce rovnaké datasety ako originálne IED. V prípade úspešného cieleného útoku na primárne zariadenie by tak

dopad na chránený segment mohol byť vďaka duplicitnému zariadeniu úspešne mitigovaný.

### 6.1.7 IEEE 802.1Q

IEC 61850 rámce disponujú priestorom pre pridanie VLAN značky do IEEE 802.1Q hlavičky. Pridanie VLAN označenia do komunikácie zhoršuje útočníkovi bez hlbšej znalosti infraštruktúry podmienky na vykonanie útokov niektorých útokov (napríklad modifikácie a vkladanie vlastných správ). V prípade nesprávneho nasadenia protokolu 802.1Q ale môže dôjsť k vytvoreniu úplne nových vektorov útoku, ak napríklad cieľové IED zariadenie nebude schopné zahodiť prijatý rámec bez očakávanej VLAN ID hodnoty alebo obsahujúci inú ako známu hodnotu.

V testovacom prostredí bolo praktické testovanie mitigačných mechanizmov limitované na reálne využívané IED zariadenia a dostupné prvky. Z pohľadu vysokej dostupnosti boli v prostredí nasadené identické REF615 zariadenia publikujúce GOOSE a SMV správy. Ďalej bolo na oboch zariadeniach vynútené využitie SFTP protokolu namiesto zraniteľného FTP pomocou konfiguračného nástroja PCM600.

Na druhej strane, využité IED REF615 nepodporovali TLS pre MMS, v aktuálnom prostredí sa nenachádzal prepínač umožňujúci VLAN značkovanie ani implementácia kľúčového riadenia, kvôli čomu nebolo možné nasadiť ďalšie odporúčania podľa IEC 62351-6.

Ďalšími obrannými technikami, už na prelomovej úrovni OT/IT, by mohlo byť pridanie prepínačov a smerovačov špecifických pre štandard IEC 61850 s hĺbkovou kontrolou správ GOOSE/SMV, hoci toto riešenie má nevýhodu v predĺžení času odoslania správy.

## 6.2 Mitigácia na úrovni informačných technológií (IT)

Po prekročení hranice medzi OT a IT technológiami sú mitigačné odporúčania cielené na dve dôležité oblasti: 1) bezpečnosť koncových staníc (napríklad inžinierske a operačné zariadenia) a 2) sieťová bezpečnosť.

Koncovou stanicou je myslené zariadenie pripojené a komunikujúce po počítačovej sieti. Môže sa jednať o inžinierske stanice, užívateľské stanice alebo napríklad servery, ktoré sú kvôli svojej komunikačnej povahe častým terčom kybernetických útokov. Konkrétne sa môže jednať o infikovanie zariadenia malwarom, sledovanie aktivity užívateľa na zariadení, zneprístupnenie zariadenia kvôli výkupnému, využívanie zariadenia ako súčasť botnetu, na ťažbu kryptomien alebo ako východiskový bod na laterálny pohyb po sieti. Z dôvodu vysokej početnosti možných útokov je odporúčané nasadenie hneď niekoľkých mitigačných opatrení, ktoré sú predstavené v tabuľke:

Tabuľka 6.2 Prehľad mitigačných opatrení na úrovni IT

| **Mitigácia** | **Stručný popis** | **Odporúčanie k nasadeniu** |
|---|---|---|

| | | |
|---|---|---|
| Pravidelné aktualizácie | Väčšina vendorov operačných systémov a aplikácií aktívne reaguje na objavené zraniteľnosti v produktoch pravidelným vydávaním opravných záplat a aktualizácií. | Vyhľadávanie a následné aplikovanie bezpečnostných aktualizácií na pravidelnej báze a vždy po odhalení významnej alebo kritickej zraniteľnosti. Príkladovým odporúčaním je sledovanie Patch Tuesday a následné nasadenie aktualizácií v druhej polovici každého mesiaca. |
| Kontrola prístupu | Nasadenie Identity and Access Management (IAM) rámcu pre efektívnu identifikáciu, autentizáciu a kontrolu prístupu užívateľov. | Priradenie konkrétnych a iba nevyhnutných povolení prístupu užívateľom ku kritickým informáciam a neznámym aplikáciam. Prakticky by mali byť nasadené viacfaktorové autentizačné mechanizmy pre ochranu minimálne kritických informácií a privilegované účty pre správu koncových zariadení. |
| Anti-Malware | Nasadenie dedikovaného anti-malware riešenia na všetky koncové stanice. | Nasadenie aktuálnych ochranných systémov presahujúcich tradičné antivirus riešenia založené na signatúrach. Novodobé anti-malware produkty dokážu efektívne využívať princípy strojového učenia, reputačné kontroly, anti-ransomware techniky, webovú alebo aplikačnú kontrolu priamo v rámci jedného riešenia. Odporúčaním je zamerať sa pri výbere na dostupné produkty a porovnať škálu funkcionalít. Následne software rozdistribuovať na koncové stanice. |
| Host IPS/Firewall | Hosťovský firewall reguluje premávku na základe definovaných pravidiel. Hosťovský Intrusion Prevention System (HIPS) reguluje významné dianie na zariadení na základe definovaných škodlivých udalostí, procesov a podobností. | HIPS funkcionality sú často obsiahnuté v novodobých anti-malware riešeniach. Pokiaľ ale funkciou disponuje, stojí za zváženie nasadenie dedikovaného HIPS riešenia, ktoré ochraňuje cieľový systém na základe širších kontextov diania ako napríklad proces snažiaci sa spustiť iný proces, snaha o zmenu kľúčov registra alebo sťahovanie inštalácia súborov a ovládačov. |
| DLP | Data Loss Prevention systém dokáže efektívne detekovať a predísť únikom citlivých údajov z organizácie. | Informácie sú čoraz silnejšou zbraňou a preto je odporúčané aktívne zabraňovať ich nedovolenému šíreniu. Spôsobom ako úniku predísť je nasadenie DLP systému najčastejšie na úrovni koncového zariadenia alebo emailovej brány. Na úrovni koncového zariadenia dokáže DLP systém monitorovať plné spektrum interných informácií a zabrániť rôznym pokusom o ich exfiltráciu. Na druhej strane ale často za cenu zvýšeného využitia výpočtových zdrojov systému, na ktorom je nasadený. Emailová komunikácia patrí stále medzi dominantu vo väčšine organizácií a preto nasadenie DLP na tejto úrovni môže byť taktiež veľmi účinné. V porovnaní s nasadením na koncový bod nebude zachytené rovnaké množstvo pokusov, bude ale ušetrený výkon staníc. |

| | | |
|---|---|---|
| XDR | Extended Detection and Response (XDR) je technológia rozšírenej jednotnej telemetrie pri hodnotený rizík koncovej stanice, ktorá poskytuje viditeľnosť o dianí na stanici spolu s možnosťou priamej reakcie. | Prvým krokom je nasadenie agentov na koncové stanice, ktoré získavajú telemetriu a prehľad o cieľovom systéme, napríklad o bežiacich procesoch, pristupujúcich užívateľoch alebo sieťovej prevádzke. Tieto informácie sú následne korelované s typickými škodlivými udalosťami, vďaka čomu môžu byť zachytené škodlivé udalosti na ich počiatku. XDR je navyše možné využiť aj pre aktívne vyhľadávanie hrozieb práve vďaka poskytnutej viditeľnosti. |

Na úrovni sieťovej bezpečnosti je základnou a najdôležitejšou mitigačnou požiadavkou segmentácia siete. V priemyselných infraštruktúrach je táto požiadavka ešte dôležitejšia ako v tradičných IT sieťach, nakoľko je veľmi dôležité oddeliť technologické/priemyselné segmenty od zvyšku infraštruktúry. Segmentáciu je možné vynútiť na úrovni aktívnych sieťových prvkoch, akým sú smerovačov a prepínače. Po prvotnom prieniku do infraštruktúry sú aktívne sieťové prvky častým nasledovným terčom útokov, nakoľko predstavujú rýchly prístup ku mnohým relevantných sieťovým informáciám a tým pádom aj informáciám o komunikujúcich systémoch. Okrem všeobecnej segmentácie je preto odporúčané na úrovni aktívnych sieťových prvkov taktiež nasadiť príslušné mitigačné mechanizmy, medzi ktoré patrí napríklad bezpečnosť portov, zakázanie nepoužívaných portov alebo vynútenie bezpečnej autentizácie do správy zariadení.

Ďalším významným mitigačným mechanizmom na sieťovej úrovni sú interné firewally, ktoré zaisťujú reguláciu prevádzky prechádzajúcej medzi jednotlivými segmentmi a interné IPS systémy, zabezpečujúce zachytenie útoku preniknutého do infraštruktúry. IPS systémy štandardne detegujú a zachytávajú útoky na základe preddefinovaných signatúr alebo aplikovaním princípov strojového učenia a umelej inteligencie pre vyhľadávanie prevádzkových anomálií. Čoraz častejšie sú vyvíjané a testované signatúry pre zachytávanie škodlivých dátových tokov protokolov definovaných v súboroch noriem IEC 61850 a IEC 60870-5. Jednym z vendorov bezpečnostných riešení, ktorý dokáže na úrovni IPS implementovať ochranu energetických protokolov je napríklad Fortinet. Okrem verejne známych vendorov sa vývoju energetických signatúr venuje aj množstvo akademických prací, vďaka čomu je možné očakávať vyššiu dostupnosť relevantných riešení pre priemyselné prostredia.

## 6.3 Mitigácia na úrovni perimetru

Jedným zo všeobecne najdôležitejších mitigačných opatrení je silné zabezpečenie perimetru infraštruktúry. Jedná sa o časť infraštruktúry, ktorá je vystavená širokej verejnosti a je preto najdostupnejším počiatočným vektorom prieniku. Hlavným stavebným prvkom perimetru by mal byť firewall s dôkladne špecifickou politikou, ktorá povoľuje iba nevyhnutné dátové toky. Odporúčaním je nad nasadenou politikou vykonávať pravidelné audity a revízie. V praxi sa občas stáva, že administrátori na

firewalle ponechajú testovacie povolenia, ktoré bývajú útočníkmi pohotovo zneužité. Vhodným riešením je postaviť pred firewall IPS systém, ktorý by slúžil na filtrovanie prichádzajúcich škodlivých a útočných komunikácií, ktoré by zahodil už v počiatku komunikácie a ušetril by tak firewallu výkon využiteľný pre legitímnu komunikáciu.

Okrem fyzického perimetru je dôležité upriet' pozornosť aj na dostatočné zabezpečenie vzdialených užívateľov a dodávateľov. Vhodným riešením je sprístupniť vzdialeným používateľom a dodávateľom iba nevyhnutné aplikácie a bezpečným spôsobom. Príkladom je využitie virtuálnej privátnej siete (VPN) postavenej voči perimetrovému firewallu alebo dedikovanému VPN koncentrátoru nachádzajúcemu sa vo vnútornej sieti. U vzdialených používateľov je navyše taktiež odporúčané aplikovať mitigačné opatrenia z kapitoly 6.2, podobne ako u interných používateľov.

## 6.4 Fyzická úroveň

Nakoľko niektoré z testovaných komunikačných protokolov pracujú na druhej vrstve ISO/OSI referenčného modelu, ich napadnutie je limitované fyzickým dosahom útočníka. Z tohto dôvodu je na príslušné systémy nutné aplikovať aj základné princípy fyzickej bezpečnosti ako kontrola fyzického prístupu, dohľad a pravidelné testovanie. Medzi odporúčané mitigačné opatrenia na úrovni fyzickej bezpečnosti patrí nasadenie CCTV kamerových systémov, ochranné zámky a bariéry, detekcie narušenia, odstrašujúce alarmy a iné systémy určené na ochranu osôb a majetku.

Mimo technické ciele sa útočníci radi zameriavajú aj na ľudskú nepozornosť a nevedomosť. V súčasnosti patrí medzi najčastejšie útočnícke techniky sociálne inžinierstvo vykonávané prostredníctvom rôznych foriem phishingu. Jedná sa o podvodné techniky snažiace sa zmanipulovať užívateľa a donútiť ho za nevedomosti vykonať útočníkom chcenú škodlivú akciu. Typicky sa napríklad jedná o poskytnutie citlivých a prístupových údajov alebo stiahnutie škodlivého kódu. Mitigačným odporúčaním voči sociálnemu inžinierstvu je pravidelné školenie zamestnancov a užívateľov o aktuálnych útočníckych technikách, obranných mechanizmoch a všeobecných základoch a princípoch kybernetickej bezpečnosti. Vhodnou mitigáciou môžu byť aj zakúpené testovacie simulácie sociálneho inžinierstva, kedy je objednaná phishingová kampaň od etických hackerov. Vďaka čomu je získaný aktuálny prehľad o informovanosti zamestnancov nasledovaný poučením na reálnej chybe.

Finálnou navrhnutou mitigáciou je nasadenie a aktívne využívanie Security Information and Event Management (SIEM) riešenia, pretože čo nie je možné ochrániť, je možné aspoň sledovať. Jedná sa o robustný systém využívaný pre získavanie a centralizáciu logov z udalostí rôznych integrovaných systémov. Následná normalizácia, korelácia a analýza získaných informácií umožňuje SIEMu vykonanie detekcie škodlivých činností a ich ohlásenie prostredníctvom rôznych foriem notifikácií. Okrem detekčnej činnosti disponujú SIEM riešenia základom pre aktívne vyhľadávanie hrozieb, forenznej činnosti a vybudovanie bezpečnostného operačného centra (SOC).

# 7. VYHODNOTENIE

Vďaka nedostatočnosti bezpečnostných mechanizmov využívaných v testovacom prostredí a vhodne zvolenej metodike prebehli testované kybernetické útoky úspešne. Bezpečnostné mechanizmy neboli v testovacom prostredí nasadené za účelom demonštrácie zraniteľností a zároveň z dôvodu nedostatočnej podpory zo strany využitých reálnych IED zariadení. Základ metodiky tvoril rámec taktík a techník MITRE ATT&CK špecificky zameraný na priemyselné systémy. Konkrétne techniky a postupy boli zvolené na základe zámeru otestovať širšie spektrum útočných vektorov a taktiež cieľových protokolov. Okrem testovaných útokov existuje množstvo ďalších možných útokov a zneužiteľných zraniteľností, ako boli predstavené v tretej kapitole tejto práce. Väčšina možných útokov zneužíva nešifrovanú a ľahko čitateľnú a narušiteľnú formu nasadených komunikačných protokolov a fakt, že u niektorých protokolov nemusí nikdy dôjsť k ich šifrovaniu (napr. GOOSE a SMV). Protokol MMS je navyše mapovaný priamo na TCP/IP štruktúru, vďaka čomu je možné naň smerovať aj tradičné taktiky a techniky využívané v IT prostrediach.

## 7.1 Zhrnutie metodiky, výsledkov a odporúčaní

Z dôvodu lepšej uchopiteľnosti výstupov práce je vypracovaná súhrnná tabuľka metodiky obsahujúca mapovanie MITRE ATT&CK taktík a techník na konkrétne testované kybernetické útoky, stručný postup testovania, výstupy a odporúčania autorky.

Tabuľka 7.1 Metodika testovania

| **MITRE ATT&CK** | | **Útok - Popis, postup, vyhodnotenie, odporúčanie** |
|---|---|---|
| **Taktika** | **Technika** | |
| **Automatizovaný sken portov a zraniteľností** | | |
| Collection | Automated Collection | **Popis:**<br>Zber informácií o prostredí pomocou automatizovaných nástrojov alebo skriptov.<br><br>**Postup:**<br>1. Nasadenie skeneru alebo skriptu v sieťovom dosahu cieľových zariadení. Vytvorenie sieťových prestupov a pridanie skeneru na potrebné výnimky.<br>2. Konfigurácia inštancie skenu s ohľadom na krehkosť cieľových zariadení.<br>3. Spustenie inštancie skenu na cieľový rozsah a monitorovanie dostupnosti zariadení. V prípade výskytu nedostupnosti produkčného zariadenia je nutné sken manuálne zastaviť.<br>4. Sumarizácia výsledkov a ich vyhodnotenie. |

<table>
<tr><td></td><td></td><td>Vyhodnotenie:<br>Skenery zraniteľností Nessus a Nexpose objavili na cieľových zariadeniach reálne bežiace služby a relevantné závažné zraniteľnosti k manuálnemu prevereniu.<br><br>Odporúčanie:<br>Vykonávať skeny zraniteľností na pravidelnej báze a dbať na dôkladne nastavenie bezpečných parametrov získavania informácií o službách (stav TCP/UDP portov). A na druhej strane nasadenie prísnych politík na úrovni perimetru, ktoré filtrujú pokusy o externé nelegitímne skeny.</td></tr>
<tr><td colspan="3">Zachytávanie sieťovej prevádzky</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Discovery</td><td>Network Connection Enumeration</td><td rowspan="4">Popis:<br>Monitorovanie a zachytávanie informácií o komunikačných vzoroch a o cieli prostredníctvom sieťového rozhrania.<br><br>Postup:<br>1. Implementácia knižnice libpcap (Unixové systémy) alebo npcap (Windowsové systémy).<br>2. Inštalácia nástroju pre zachytávanie a analýzu sieťovej prevádzky (napríklad Wireshark a TCPdump) alebo vytvorenie vlastného nástroju využitím dostupných knižníc.<br>3. Spustenie zachytávania dátových tokov na fyzickom sieťovom rozhraní zariadenia.<br>4. Analýza obsahu zachytených rámcov/paketov a ich export.<br><br>Vyhodnotenie:<br>Vďaka analýze zachytenej sieťovej prevádzke boli rozpoznané vydavateľské IED zariadenia a datasety, ktoré prostredníctvom IEC 61850 zasielajú. Zachytená bola ďalej komunikácia cez protokol MMS a FTPS.<br><br>Odporúčanie:<br>Zabrániť dosahu útočníka na komunikáciu operačných technológií (najmä na 2. vrstve ISO/OSI) nasadením sieťovej segmentácie a bezpečnostných politík na aktívnych sieťových prvkoch. Nasadenie šifrovania komunikácií prebiehajúcich na 3. a vyššej vrstve ISO/OSI, napríklad využitím protokolu TLS.</td></tr>
<tr><td>Network Sniffing</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Collection</td><td>Detect Operating Mode</td></tr>
<tr><td>Monitor Process State</td></tr>
<tr><td>Point & Tag Identification</td></tr>
<tr><td colspan="3">Napadnutie časovej synchronizácie SMV</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Evasion</td><td rowspan="2">Spoof Reporting Message</td><td rowspan="3">Popis:<br>Modifikácia poľa časovej synchronizácie v zachytených SMV rámcoch a ich následné odoslanie na cieľové IED zariadenie pre spôsobenie neštandardného stavu.<br><br>Postup:<br>1. Odchyt legitímnych SMV rámcov pomocou útoku zachytávania sieťovej prevádzky.<br>2. Rozbalenie rámcu a analýza polí.<br>3. Modifikácia poľa smpSynch na hodnotu None (0).<br>4. Inkrementácia hodnoty cmpCnt.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Impair Process Control</td></tr>
<tr><td>Modify Parameter</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td></td><td></td><td>5. Modifikácia obsahu PhsMeas1.<br>6. Zabalenie polí naspäť do Ethernet rámcu.<br>7. Zmena MAC adresy zariadenia na MAC adresu vydavateľského IED a odoslanie rámcu multicastovo naspäť do siete.<br><br>Vyhodnotenie:<br>Pri správnej implementácii SMV dôjde pri prijímaní rámcu k označeniu chyby SmpSynchMismatch a neprijatiu rámcu. Pri nesprávnej konfigurácii odberateľského IED dôjde k prijatiu falošného rámcu, zablokovaniu časovo kritických funkcií a neštandardnému stavu zariadenia.<br><br>Odporúčanie:<br>Vynútenie kontroly poľa smpSynch u prijímaných rámcov na úrovni odberateľského IED voči vlastnému nastaveniu časovej synchronizácie. A nasadenie kryptografickej autentizačnej techniky HMAC podľa IEC 62351-6 do rozšíreného poľa Extension za použitia pred zdieľaného kľúča pre zaistenie integrity.</td></tr>
<tr><td colspan="3">GOOSE Spoofing</td></tr>
<tr><td>Evasion<br><br>Impair Process Control</td><td>Spoof Reporting Message<br><br>Modify Parameter<br><br>Unauthorized Command Message</td><td>Popis:<br>Modifikácia parametrov v zachytených GOOSE rámcoch a ich následné odoslanie na cieľové IED zariadenie pre zakrytie reálne vzniknutej chyby. A v opačnom prípade simulácia chybného stavu pre manipuláciu funkcií cieľového zariadenia.<br><br>Postup:<br>1. Odchyt legitímnych GOOSE rámcov pomocou útoku zachytávania sieťovej prevádzky.<br>2. Rozbalenie rámcu a analýza polí.<br>3. Modifikácia polí v závislosti od zámeru:<br>a. Inkrementácia sqNum pre potlačenie/neprijatie legitímnych rámcov o novo vzniknutej chybe.<br>b. Inkrementácia stNum, vynulovanie sqNum a úprava časovej známky t pre vytvorenie falošných informácií o chybe.<br>c. Úprava poľa ndsCom na pravdivú hodnotu pre upútanie pozornosti administrátorov.<br>d. Úprava konkrétnych prenášaných dát v allData.<br>4. Zabalenie polí do Ethernet rámcu, zmena MAC adresy zariadenia na MAC adresu vydavateľského IED a odoslanie na základe hodnoty timeAllowedtoLive tak, aby rámec na cieľové zariadenie dorazil pred legitímnym.<br><br>Vyhodnotenie:<br>Pri správnom načasovaní odoslaných rámcov dochádza k prijatiu falošných rámcov odberateľským zariadením a zahodeniu legitímnych rámcov. V prípade zahadzovania legitímnych rámcov môže dôjsť k nechcenému šíreniu vzniknutej chyby a v najhoršom</td></tr>
<tr><td>Inhibit Response Function</td><td>Alarm Supression</td><td></td></tr>
</table>

<table>
<tr><td></td><td></td><td>prípade aj k stavu odoprenia služby. Pri prijatí falošných rámcov môže dôjsť k vynúteniu spustenia ochranných funkcií.<br><br>Odporúčanie:<br>Útok je možné mitigovať nasadením mechanizmov ochrany integrity, akým je technika HMAC podľa IEC 62351-6.</td></tr>
<tr><td colspan="3">Man-in-the-Middle</td></tr>
<tr><td>Collection</td><td>Man-in-the-Middle</td><td rowspan="5">Popis:<br>Podvrhnutie útočníkovej MAC adresy na prepísanie ARP tabuliek a následné preposielanie a blokovanie komunikácií z pozície prostredníka.<br><br>Postup:<br>1. Zapojenie útočníckej stanice v sieťovom dosahu cieľových zariadení na úrovni 2. vrstvy ISO/OSI.<br>2. Úprava sieťovej konfigurácie na útočníckej stanici (povolenie zachytávania a preposielania IP komunikácie).<br>3. Vyhľadanie cieľových zariadení (napr. pomocou nástroja Ettercap).<br>4. Zaslanie falošných odpovedí na ARP dotazy prostredníctvom špecializovaného nástroja alebo vlastného skriptu/programu.<br>5. Preposielanie komunikácie medzi cieľovými zariadeniami pre udržanie zdanlivo štandardného stavu.<br>6. Pasívne pokračovanie útoku:<br>a. Analýza informácií v komunikácii pre následné zneužitie. (napr. vynútenie zmeny pozorovaných SNTP serverov)<br>7. Aktívne pokračovanie útoku:<br>a. DoS - Zastavenie preposielania prijatých správ pre aktívne blokovanie komunikácie.<br>b. Pri modifikačnom útoku a útoku vkladania vlastných správ do komunikácie je nutné pred odoslaním prepočítanie checksum v TCP hlavičke a poľa length. Ďalej je nevyhnutné udržiavať v odoslaných paketoch sequences (pre predídenie ukončeniu/resetu) a dropnutie/odmietnutie odpovedí zariadenia.<br><br>Vyhodnotenie:<br>Útokom došlo k úspešnému prepísaniu ARP tabuliek, zachyteniu, analýze a preposielaniu správ vymieňaných medzi komunikujúcimi uzlami.<br><br>Odporúčanie:<br>Zabrániť dosahu útočníka na komunikáciu 2. vrstvy ISO/OSI nasadením sieťovej segmentácie a bezpečnostných politík na aktívnych sieťových prvkoch. Nasadenie a vynútenie TLSv1.2 alebo TLSv1.3 kryptografického protokolu u komunikácií protokolu MMS.</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Inhibit Response Function</td><td>Block Command Message</td></tr>
<tr><td>Block Reporting Message</td></tr>
<tr><td>Device Restart/Shutdown</td></tr>
<tr><td>Denial of Service</td></tr>
</table>

<table>
<tr><th colspan="3">ICMP Flood</th></tr>
<tr><td rowspan="4">Impact</td><td>Loss of Control</td><td rowspan="4">Popis:<br>Zasielanie vysoko frekventovaných správ s cieľom zahltenia komunikačného kanálu a spôsobenie stavu odoprenia služby.<br><br>Postup:<br>1. Zaistenie sieťového dosahu útočníka na cieľovú stanicu na úrovni 2.-7. vrstvy ISO/OSI v závislosti od zneužívaného protokolu. U ICMP sa jedná o dostupnosť 3. vrstvy.<br>2. Spustenie odosielania ICMP echo request paketov vo vysokej frekvencii na cieľové zariadenie prostredníctvom špecifického nástroja alebo vlastného skriptu.<br><br>Vyhodnotenie:<br>Cieľové IED zariadenie po dobu útoku nebolo schopné prijímať legitímnu komunikáciu, ktorú zahadzovalo. Vďaka ušetreniu zdrojov bolo schopné pokračovať v generovaní a odosielaní GOOSE/SMV správ.<br><br>Odporúčanie:<br>Neustále sledovanie dostupnosti OT zariadení prostredníctvom monitorovacích nástrojov a využívanie mechanizmu upozornení pri nedostupnosti (napríklad prostredníctvom emailu alebo SMS). Nasadenie sieťovej segmentácie a IPS bezpečnostných sond.</td></tr>
<tr><td>Loss of View</td></tr>
<tr><td>Denial of View</td></tr>
<tr><td>Denial of Control</td></tr>
</table>

# 8. ZÁVER

V rámci záverečnej práce boli identifikované, otestované a zdokumentované bezpečnostné hrozby, ktoré vyplývajú priamo zo špecifickosti priemyselných systémov alebo z konvergencie OT/IT sietí. Na základe vykonaných testov boli stanovené mitigačné opatrenia a výstup práce tvorí metodický súhrn podstúpených testov s výsledkami a odporúčaniami.

V úvodných kapitolách boli predstavené priemyselné komunikačné protokoly podľa súborov noriem IEC 61850, IEC 60870-5 a ich bezpečnostné nadstavby podľa IEC 62351. Z analýzy bezpečnostných odporúčaní možno pozorovať nedostatočnú dynamiku prezentovaných kryptografických algoritmov, ktorá je spôsobená nutnosťou udržiavania spätnej kompatibility starších systémov. U vybraných časovo kritických protokolov, menovite GOOSE a SMV, je podľa IEC 62351 vyslovene neodporúčané šifrovanie komunikácie z dôvodu nedostatočných výkonov a tým potenciálne spôsobenie nárastu odozvy. Protokoly GOOSE a SMV tým pádom zostávajú náchylné na útoky zneužívajúce dôvernosť a je dôležité pojať ich bezpečnosť a najmä mitigáciu rizík zo širšieho kontextu.

Pre kategorizáciu bezpečnostných hrozieb bol v práci použitý koncept CIA triády, ktorá hrozby hodnotí na základe narušenia dôvernosti, integrity a dostupnosti, čo sú zároveň tri všeobecne najdôležitejšie bezpečnostné požiadavky. Koncept CIA triády bol následne aplikovaný na existujúcu metodológiu analýzy rizík, z čoho vznikla nová odroda metodológie pre zhodnotenie predpokladov využiteľnosti testovaných útokov a stanovenie ich rizika.

Následne bol prácou predstavený metodický základ testovania postavený na matici ATT&CK pre ICS a selekcii vhodných techník pre vytvorené testovacie prostredie. V testovacom prostredí sa nachádzali 3 IED zariadenia plniace funkciu zraniteľných cieľov, windowsová stanica simulujúca prevádzkovú/inžiniersku stanicu a DELL laptop využitý ako útočnícka stanica. Na základe selekcie vhodných techník boli prakticky otestované kybernetické útoky v troch fázach. V prieskumnej fáze boli porovnávané dva nástroje automatizovaného testovania zraniteľností (Nexpose a Nessus) a v analytickej fáze došlo k podrobnému rozboru zachytených rámcov. V poslednej útočnej fáze boli prostredníctvom dostupných nástrojov vykonané útoky na časovú synchronizáciu SMV protokolu, útok podvrhovania GOOSE rámcov v dvoch scenároch, útok muža uprostred na protokol MMS a nakoniec záplavový útok zneužitím protokolu ICMP. Testované útoky bolo pomocou zvolenej metódy analýzy rizík hodnotené na predpoklad zneužiteľnosti s výsledným najrizikovejším záplavovým útokom nakoľko dokáže spôsobiť stav odoprenia služby, prístupu alebo kontroly.

Posledné časti práce sú venované vytvoreniu komplexného rámca mitigačných opatrení postaveného na 4 úrovniach: OT, IT, perimeter a fyzická bezpečnosť zahrňujúca ľudský faktor. Navrhnuté mitigácie vychádzajú z normy IEC 62351 a z praktických skúseností autorky, ktoré nadobudla štúdiom a prácou ako bezpečnostný konzultant.

# LITERATÚRA


[1] SHABANZADEH, MORTEZA, MOGHADDAM a MOHSEN. *What is the Smart Grid? Definitions, Perspectives, and Ultimate Goals.* [online]. 2013, Power System Conference(13-E-SMG-2046), 1-5 [cit. 2020-10-25]. Dostupné z: doi:10.13140/2.1.2826.7525

[2] KHURANA, HIMANSHU, HADLEY, MARK, LU, NING, FRINCKE a DEBORAH. *Smart-Grid Security Issues*. Security & Privacy: IEEE [online]. 2010, (8), 81 - 85 [cit. 2020-12-08]. Dostupné z: doi:10.1109/MSP.2010.49

[3] P. VLADYKA. *IEC 61850: soubor norem pro komunikaci v energetice s velkým potenciálem výhod*. AUTOMA – časopis pre automatizační techniku [online]. 2010, 16(3–2010), 8 [cit. 2020-10-20]. Dostupné z: https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/40771.pdf

[4] R. E. MACKIEWICZ. *Overview of IEC 61850 and benefits*. 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting: IEEE [online]. 2006, 8 [cit. 2020-10-24]. Dostupné z: doi:10.1109/PES.2006.1709546

[5] C. BRUNNER. *IEC 61850 for power system communication.* IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition [online]. 2008, 1-6 [cit. 2020-10-24]. Dostupné z: doi: 10.1109/TDC.2008.4517287.

[6] ABB. *615 series, Cyber Security Deployment Guideline.* [online]. [cit. 2021-03-17]. Dostupné z: https://library.e.abb.com/public/312f8a33d7944236b68561932441f737/RE_615_csdepl_758280_ENc.pdf

[7] *ČSN EN 61850-5 ed. 2. Komunikační sítě a systémy v podřízených stanicích – Část 5: Požadavky na komunikaci pro funkce a modely zařízení.* Praha. 2013

[8] *ČSN EN 61850-7-1 ed. 2+A1. Komunikační sítě a systémy pro automatizaci v energetických společnostech – Část 7-1: Základní komunikační struktura – Zásady a modely*. Praha. 2021

[9] BAIGENT a DREW. *IEC 61850 communication networks and systems in substations: An overview for users.* SISCO Systems [online]. 2004, 1-15 [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: https://store.gegridsolutions.com/faq/Documents/General/iec61850.pdf

[10] HORALEK, J., J. MATYSKA a V. SOBESLAV. *Communication protocols in substation automation and IEC 61850 based proposal.* 2013 IEEE 14th International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI) [online]. 2013, 321-326 [cit. 2020-11-20]. Dostupné z: doi: 10.1109/CINTI.2013.6705214

[11] GEORG, H., N. DORSCH, M. PUTZKE a C. WIETFELD. *Performance evaluation of time-critical communication networks for smart grids based on IEC 61850.* 2013 Proceedings IEEE INFOCOM, Turin [online]. 2013, , 3417-3422 [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: doi: 10.1109/INFCOM.2013.6567174

[12] PHAM a T. GIANG. *Integration of IEC 61850 MMS and LTE to support smart metering communications.* MS thesis. University of Twente [online]. 2013 [cit. 2020-11-22]. Dostupné z:

http://essay.utwente.nl/64424/1/MSc.%20Report%20Giang%20v4%20-%20Final.pdf

[13] LOPES, Y., D. C. MUCHALUAT-SAADE, N. C. FERNANDES a M. Z. FORTES. *Geese: A traffic generator for performance and security evaluation of IEC 61850 networks.* 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Buzios [online]. 2015, 687-692 [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: doi:10.1109/ISIE.2015.7281552

[14] YOUSSEF a A. TAREK. *IEC 61850: Technology standards and cyber-threats.* 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering *(EEEIC).* [online]. 2016 [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7555647

[15] MATOUŠEK, Petr. *Description and analysis of IEC 104 Protocol.* Faculty of Information Technology, Brno University o Technology, Tech. Rep, [online] 2017. [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: https://www.fit.vut.cz/research/publication-file/11570/TR-IEC104.pdf

[16] MEDINA, Veronica, *IEC-60870-5 application layer over TCP/IP for an open and flexible remote unit.* 2009 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. IEEE, [online] 2009, 420-425. [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5217929 \

[17] RUDZINSKI, Y., VLADYKA, P. *Komunikační protokoly pro dálkové ovládání IEC/ISO 60870-5*. Automa [online]. 2010. [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: http://automa.cz/cz/casopis-clanky/komunikacni-protokoly-pro-dalkove-ovladani-iec/iso-60870-5-2010_02_40552_5799/

[18] SCHLEGEL, Roman, OBERMEIER, Sebastian, SCHNEIDER, Johannes. *A security evaluation of IEC 62351*. Journal of Information Security and Applications, [online]. 2017, 197-204. [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214212616300771

[19] HUSSAIN, SUHAIL, USTUN, TAHA SELIM, KALAM a AKHTAR. *A Review of IEC 62351 Security Mechanisms for IEC 61850 Message Exchanges.* IEEE Transactions on Industrial Informatics [online]. 2020, (16), 5643-5654 [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: doi:10.1109/TII.2019.2956734

[20] NÚKIB. *Minimální požadavky na kryptografické algoritmy: doporučení v oblasti kryptografických prostředků* [online]. 2018, 1-8 [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: www.nukib.cz/download/uredni_deska/Kryptograficke_prostredky_doporuceni_v1.0.pdf

[21] ENISA. *Algorithms, Key Sizes and Parameters Report* [online]. 2013, 1-94 [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: https://www.enisa.europa.eu/publications/algorithms-key-sizes-and-parameters-report

[22] MARRON, J. A., A. M. GOPSTEIN, N. BARTOL a L. FELDMAN. *Cybersecurity Framework Smart Grid Profile.* Technical Note (NIST TN) – 2051. [online]. 2019, 1-137 [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/TechnicalNotes/NIST.TN.2051.pdf

[23] CLEMENTS, S. L., H. KIRKHAM, M. ELIZONDA a S. LU. *Protecting the smart grid: a risk-based approach.* IEEE Power and Energy Society General

Meeting [online]. 2011, (16), 1-7 [cit. 2020-11-20]. Dostupné z: https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6039120

[24] LAMBERT, E. *State of the Art -TSO-DSO Interoperability*. TDX-ASSIST. Project ID – 774500. Ref. Ares(2018)6183847 - 03/12/2018. [online]. 2017, 1-146 [cit. 2020-12-02]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5bfb18002&appId=PPGMS

[25] SAMONAS, *Spyridon a David COSS. The CIA strikes back: redefining confidentiality,integrity and availability in security*. Journal of Information System Security [online]. 2014, 21-45 [cit. 2020-12-02]. ISSN 1551-0123. Dostupné z: http://www.proso.com/dl/Samonas.pdf

[26] TAHA SELIM USTUN a S. M. SUHAIL HUSSAIN. *IEC 62351-4 Security Implementations for IEC 61850 MMS Messages.* Fukushima Renewable Energy Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology [online]. 2020, 123979-123985 [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: doi:1109/ACCESS.2020.3001926

[27] ABB. *IED pro chránění a ovládání vývodu REF615.* Popis a technická data výrobku: 1MRS756379 [online]. 2014, 1-83 [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: https://library.e.abb.com/public/fbceacb37aa648f886f789fccb497144/REF615_pg_756625_CZd.pdf

[28] ABB.*IED rady 615, Návod pro instalaci*. [cit. 2021-03-17]. Dostupné z: https://new.abb.com/medium-voltage/cs/ochranne-terminaly/numericka-rele/ochrana-a-kontrola-podavace/relion-pro-vysoke-napeti/ochrana-a-ovladani-podavace-ref615

[29] ABB. *IED rady 615, Návod pro obsluhu*. [cit. 2021-03-17]. Dostupné z: https://new.abb.com/medium-voltage/cs/ochranne-terminaly/numericka-rele/ochrana-a-kontrola-podavace/relion-pro-vysoke-napeti/ochrana-a-ovladani-podavace-ref615

[30] ABB. *REF615 5.0 IEC, Popis a technická data výrobku*. [cit. 2021-03-17]. Dostupné z: https://new.abb.com/medium-voltage/cs/ochranne-terminaly/numericka-rele/ochrana-a-kontrola-podavace/relion-pro-vysoke-napeti/ochrana-a-ovladani-podavace-ref615

[31] ABB. *Feeder Protecion and Control REF615, IEC 60870-5-103 Point List Manual*. [cit. 2021-03-17]. Dostupné z: https://library.e.abb.com/public/99fdd6b510bab1d9c1257b2f0041c9fd/REF615_iec103point_756712_ENe.pdf

[32] MATOUŠEK, Petr. *Description of IEC 61850 Communication.* Faculty of Information Technology, Brno University o Technology, Tech. Rep, [online] 2018. [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: https://www.fit.vut.cz/research/publication-file/11832/TR-61850.pdf

[33] *ČSN EN 61850-8-1 ed. 2+A1. Komunikační sítě a systémy pro automatizaci v energetických společnostech – Část 8-1: Mapování specifických komunikačních služeb (SCSM) – Mapování na MMS (ISO 9506-1 a ISO 9506-2) a na ISO/IEC 8802-3*. Praha. 2020

*[34]* ALEXANDER, BELISE, STEELE a MITRE. *MITRE ATT&CK® for Industrial Control Systems: Design and Philosophy*. Mitre att&ck. [online] 2020. [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: https://collaborate.mitre.org/attackics/img_auth.php/3/37/ATT&CK_for_ICS_-_Philosophy_Paper.pdf.

[35] VALERY a YAKOV. *Cat Karat Packet Builder*. [online] 2010. [cit. 2022-05-05]. Dostupné z https://sites.google.com/site/catkaratpacketbuilder/.

[36] OZANSOY, ZAYEGH a KALAM. *Time synchronisation in a IEC 61850 based substation automation system.* Power Engineering Conference, 2008. AUPEC '08. Australasian Universities. 1 - 7. [online] 2009. [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/224400747_Time_synchronisation_in_a_IEC_61850_based_substation_automation_system

[37] MOCANU, Stéphane a Jean-Marc THIRIET. *Experimental study of performance and vulnerabilities of IEC 61850 process bus communications on HSR networks.* EuroS&PW 2020 - IEEE European Symposium on Security and Privacy Workshops [online]. 2020, (10.1109/EuroSPW51379.2020.00085), 584-593 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02921495/document

[38] SCHLEGEL, Roman; OBERMEIER, Sebastian; SCHNEIDER, Johannes. *A security evaluation of IEC 62351*. Journal of Information Security and Applications, 2017, 34: 197-204. [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214212616300771?via%3Dihub#fn0015

[39] ZAHRADNÍK, Jiří. *Testování zranitelností v průmyslových sítích.* Brno, 2020, 81 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. Petr Blažek. [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=209361

# ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

Skratky:

| | |
|---|---|
| ACSI | Abstraktné rozhranie komunikačných služieb |
| AES | Pokročilý štandard šifrovania |
| APDU | Application Protocol Data Unit |
| APPID | Aplikačný identifikátor |
| ARP | Protokol rozlišovania adries |
| ASDU | Dátová jednotka aplikačnej služby |
| CBC | Režim činnosti blokovej šifry |
| CC | Riadiaca stanica |
| CIA | Dôvernosť, integrita, dostupnosť |
| CLI | Rozhranie príkazového riadku |
| ČSN | Česká technická norma |
| DCE | Zariadenie na ukončenie dátových obvodov |
| DH | Diffie-Hellman |
| DoS/DDoS | Odmietnutie služby/Distribuované odmietnutie služby |
| DTE | Dátové koncové zariadenie |
| ENISA | Agentúra Európskej únie pre kybernetickú bezpečnost |
| EPA | Vylepšená výkonná architektúra |
| GCM | Galois/Opačný mód |
| GOOSE | Generická objektovo orientovaná udalosť rozvodne |
| GSSE | Generická udalosť stavu rozvodne |
| GUI | Grafické užívateľské rozhranie |
| HMAC | Hashovaný autentifikačný kód správy |
| ICMP | Internet Control Message Protocol |
| ICS | Priemyselné riadiace systémy |
| IDPS | Systémy detekcie a prevencie narušenia |
| IEC | Medzinárodná elektrotechnická komisia |
| IED | Inteligentné elektronické zariadenie |
| IEEE | Inštitút elektrických a elektrotechnických inžinierov |
| IP | Internetový protokol |
| ISO | Medzinárodná organizácia pre štandardizáciu |
| LPCI | Informácie o riadení protokolu spojenia |
| LPDU | Dátová jednotka linkového protokolu |
| MAC | Overovací kód správy |
| MMS | Špecifikácia výrobnej správy |
| MU | Spojovacia jednotka |
| NIST | Národný inštitút pre štandard a technológiu |
| NÚKIB | Národní úřad pro kybernetickou a informační bezpečnost |
| OSI | Prepojenie otvorených systémov |

| | |
|---|---|
| OT | Prevádzková technológia |
| PCM | Správca ochrany a kontroly |
| PDU | Protokolová dátová jednotka |
| PDU | Protokolová dátová jednotka |
| PFS | Perfektné budúce tajomstvo |
| PLC | Programovateľný logický ovládač |
| PoC | Proof-of-Concept |
| POU | Organizačná jednotka programu |
| PSS | Pravdepodobnostná podpisová schéma |
| RDP | Protokol vzdialenej pracovnej plochy |
| RFC | Žiadosť o pripomienky |
| RSA | Rivest, Shamir, Adleman – kryptografický algoritmus |
| RTU | Vzdialená koncová jednotka |
| SCADA | Systémy pre dohľad, riadenie a zber dát |
| SCL | Jazyk konfigurácie rozvodne |
| SCSM | Mapovanie špecifických komunikačných služieb |
| SHA | Zabezpečený hašovací algoritmus |
| SNMP | Jednoduchý riadiaci protokol siete |
| SSH | Secure Shell |
| SV | Vzorkované hodnoty |
| TCP | Protokol na kontrolu prenosu |
| TCS | Trip Circuit Supervision |
| TLS | Zabezpečenie transportnej vrstvy |
| VMD | Virtuálne výrobné zariadenie |
| VPN | Virtuálna privátna sieť |
| XML | Rozšíriteľný značkovací jazyk |

Symboly:

| | |
|---|---|
| $C/D$ | dôsledok |
| $C_A$ | dôsledok geografického vplyvu |
| $C_C$ | finančný dôsledok |
| $C_T$ | časový dôsledok |
| $D_D$ | dopad na požiadavku dôvernosti |
| $D_I$ | dopad na požiadavku integrity |
| $D_O$ | dopad na požiadavku dostupnosti |
| $P_A/P_U$ | pravdepodobnosť útoku |
| $P_E$ | pravdepodobnosť účinnosti bezpečnostného mechanizmu |
| $P_I$ | pravdepodobnosti prerušenia útoku |
| $P_N$ | pravdepodobnosť neutralizácie hrozby |
| $P_Z$ | pravdepodobnosť zásahu |
| $R$ | riziko |

# ZOZNAM PRÍLOH

# Příloha A - Tabuľky hodnôt pre atribút D

## A.1 Tabuľka hodnôt $D_d$ reprezentujúcich dopad na požiadavku dôvernosti*

| Rozsah narušenia dôvernosti | $D_D$ |
|---|---|
| Všetky informácie v systéme | 1.0 |
| Prevažná časť informácií v systéme | 0.7 |
| Polovica informácií v systéme | 0.5 |
| Niektoré informácie (s presahom konkrétnej komunikácie) | 0.3 |
| Informácie v rámci 1 komunikácie | 0.1 |

* Dôvernosť je hodnotená na základe rozsahu neautorizovaného prístupu.

## A.2 Tabuľka hodnôt $D_I$ reprezentujúcich dopad na požiadavku integrity*

| Rozsah narušenia integrity (trieda dátovej integrity) | $D_I$ |
|---|---|
| Narušenie I1 ($10^{-6}$) | 1.0 |
| Narušenie I2 ($10^{-10}$) | 0.5 |
| Narušenie I3 ($10^{-14}$) | 0.1 |

*Integrita je hodnotená ako pravdepodobnosť dátovej chyby na základe tried dátovej integrity v IEC 61850-5 Kapitola 11.3.2, pomerovo upravená.

## A.3 Tabuľka hodnôt $D_O$ reprezentujúcich dopad na požiadavku dostupnosti.*

| Trvanie nedostupnosti systému podľa typu komunikácie | | | $D_o$ |
|---|---|---|---|
| Client-server (MMS/-104) | IED-IED (MMS) | Kritické komunikácie (GOOSE/SMV) | |
| 800 ms | 12 ms | >3 ms | 1.0 |
| 400 ms | 8 ms | Jednotky vynechaných vzoriek | 0.5 |
| 100 ms | 4 ms | 3 ms | 0.1 |

*Dostupnosť je hodnotená ako celkový čas oneskorenia potrebný pri zotavení komunikácie, na základe stanov v IEC 61850-5 Kapitola 11.4.4, pomerovo upravené.

# Příloha B - Výpočet analýzy rizík testovaných útokov

**Analýza sieťovej komunikácie/Odpočúvanie**

- $P_U$ = Pokiaľ útočník prenikol do siete, je pomerne jednoduché komunikáciu odchytávať/odpočúvať nakoľko nie je šifrovaná. Z tohto dôvodu je stanovená pravdepodobnosť využitia útoku na 100%. **$P_U$ = 1**
- $P_E = P_Z \times P_N$ = Jedná sa o pasívny útok, ktorý sám o sebe nie je možné detegovať nakoľko prebiehal z útočníckej stanice (0) x Pokiaľ útok nie je detegovaný, je minimálna pravdepodobnosť jeho neutralizácie (10%). **$P_E$ = 0 x 0.1 = 0**
- $D = 1 - (1 - D_D) \times (1 - D_I) \times (1 - D_O)$ = Dopad na dôvernosť sa týka iba prenášaných informácií po sieti (0.3), integrita a dostupnosť nie je narušená. **D = 0.3**

- Výsledok: Predpoklad využiteľnosti útoku je 100%, ale jeho riziko iba 30%.

**Časová synchronizácia SMV**

- $P_U$ = Náročnosť útoku na základe nutnej znalosti polí SMV rámcu a dosah na vkladanie vlastných hodnôt -60% **$P_U$ = 0.4**
- $P_E = P_Z \times P_N$ = Nakoľko dochádza k oneskoreniu služby a následnému neštandardnému stavu je porucha pomerne ľahko detekovateľná (75%) x Pre neutralizáciu útoku po odhalení je nutný zásah administrátora a navrátenie hodnôt. (-75 %). **$P_E$ = 0.75 x 0.2 = 0.1875**
- $D = 1 - (1 - D_D) \times (1 - D_I) \times (1 - D_O) = 1 - (1 - 0.3) \times (1 - 0.5) \times (1 - 1)$ = **1**

- Výsledok: Predpoklad využiteľnosti útoku je 40%, ale jeho riziko 33%.

**GOOSE spoofing**

- $P_U$ = Zvýšená náročnosť útoku, nakoľko je nutná znalosť princípu GOOSE a možnosť modifikácie rámcu -60%. **$P_U$ = 0.4**
- $P_E = P_Z \times P_N$ = Nakoľko môže dochádzať k častému vypínaniu/zmeny vo funkčnosti systému je porucha ľahko detekovateľná (80%) x časovo náročnejší troubleshooting a rozpoznanie problematických rámcov (-60%) **$P_E$ = 0.4 x 0.4 = 0.32**
- $D = 1 - (1 - D_D) \times (1 - D_I) \times (1 - D_O) = 1 - (1 - 0.3) \times (1 - 0.5) \times (1 - 1)$ = **1**

- Predpoklad využiteľnosti útoku je 40%, ale jeho riziko 27%.

**MMS Man in the Middle - pasívny**

- $P_U$ = Vysoký predpoklad odchytenia ARP správy a zneužitie ARP na MitM nakoľko nie je komunikácia šifrovaná= 85% **$P_U$ = 0.85**
- $P_E = P_Z \times P_N$ = Nakoľko sa jedná o pasívny útok, je nízky predpoklad odhalenia (20%), a odhalenie je očakávané jedine v prípade ak by operátor sledoval ARP tabuľku x Pokiaľ útok nie je detegovaný, je zároveň náročne ho neutralizovať (20%) **$P_E$ = 0.2 x 0.2 = 0.04**
- $D = 1 - (1 - D_D) \times (1 - D_I) \times (1 - D_O) = 1 - (1 - 0.3) \times (1 - 0) \times (1 - 0)$ = **0.3**

- Výsledok: Predpoklad využiteľnosti útoku je 85%, ale jeho riziko iba 30%, nakoľko nenarúša požiadavku dostupnosti.

**MMS Man in the Middle – aktívny**

- $P_U$ = Vysoký predpoklad odchytenia ARP správy a zneužitie ARP na MitM nakoľko nie je komunikácia šifrovaná= 85%. **$P_U$ = 0.85**
- $P_E = P_Z \times P_N$ = Nakoľko sa už jedná o aktívny útok, je očakávaný výpadok/neštandardný stav a tým pádom rýchlejšie odhalenie(70%) x neutralizáciou je navrátenie ARP tabuliek a lokalizácia útočníka, čo je náročné na zdroje (ľudské aj časové) (70%) **$P_E$ = 0.7 x 0.7 = 0.49**
- $D = 1 – (1 – D_D) \times (1 – D_I) \times (1 – D_O) = 1 – (1 – 0.3) \times (1 – 0.5) \times (1 - 1) =$ **1**
- Výsledok: Predpoklad využiteľnosti útoku je 85% a jeho riziko 43%, nakoľko narúša bezpečnostnú požiadavku dostupnosti, ale je zároveň jednoducho detekovateľný.

**DoS ICMP Flood**

- $P_U$ = Veľmi jednoducho vykonateľný útok pomocou dostupných nástrojov **$P_U$ = 1**
- $P_E = P_Z \times P_N$ = Nakoľko dochádza k častej nedostupnosti/zmene vo funkčnosti systému je porucha ľahko detekovateľná (90%), najmä keď sa jedná o ICMP protokol x Nutnosť zásahu administrátora a v prípade nedostupnosti cieľového systému aj fyzický zásah (60 %). **$P_E$ = 0.9 x 0.6 = 0.54**
- $D = 1 – (1 – D_D) \times (1 – D_I) \times (1 – D_O) = 1 – (1 – 0) \times (1 – 0) \times (1 - 1) =$ **1**
- Výsledok: Predpoklad využiteľnosti útoku je 100% a jeho riziko je taktiež vyššie 54%. Využiteľnosť je vysoká z dôvodu jednoduchosti vykonania a riziko je vyššie z dôvodu výpadku dostupnosti a spôsobenie vysokého oneskorenia.