VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Rytis RAINYS

REGIONŲ INTERNETO TINKLO INFRASTRUKTŪROS PATIKIMUMO TYRIMAI

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS INŽINERIJA (01T)

LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2011

Disertacija rengta 2007–2011 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Algimantas KAJACKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

VGTU leidyklos TECHNIKA 1926-M mokslo literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-457-014-8

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2011

© Rytis, Rainys, 2011

rytis.rainys@el.vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Rytis RAINYS

INVESTIGATION OF THE REGIONAL INTERNET NETWORK INFRASTRUCTURE DEPENDABILITY

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING (01T)

LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2011

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2007–2011.

Scientific Supervisor

Prof Dr Habil Algimantas KAJACKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjama interneto tinklo infrastruktūros patikimumo problematika, analizei naudojant tinklo topologijos tyrimus, grafų teorijos taikymą ir tinklo modeliavimą. Tyrimų objektas, interneto tinklo infrastruktūra, kurios pagrindą sudaro autonominės sistemos ir tarptinklinių sujungimų linijos. Nuo stabilios interneto tinklo veiklos priklauso informacijos pasiekiamumas, elektroninė komercija, nutolusių objektų valdymas ir t. t. Pagrindinis disertacijos tikslas – sukurti metodikas ir algoritmus, skirtus interneto tinklo infrastruktūros analizei bei veiklos patikimumo kontrolei. Tyrimų taikymo sritis – interneto tinklo veiklos tęstinumo priežiūra ir reguliavimas.

Darbe sprendžiami šie pagrindiniai uždaviniai: interneto tinklo topologijos analizės modelio ir priemonių sudarymas; interneto junglumo tyrimas siekiant identifikuoti kritinius elementus, kurių pažeidimai susiję su tinklo funkcionalumo praradimu; kritinių interneto tinklo elementų stebėsenos modelio sudarymas; eksperimentiniai kibernetinių atakų simuliacijos bandymai; bei interneto tinklo infrastruktūros patikimo stiprinimo parinkimas.

Disertaciją sudaro įvadas, 5 skyriai, rezultatų apibendrinimas, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai bei priedai.

Įvadiniamе skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatomos disertacijos tema autoriaus paskelbtos publikacijos ir pranešimai konferencijose bei disertacijos struktūra.

Pirmasis skyrius skirtas literatūroje aprašytų metodų, susijusių su tinklų ir informacijos saugumo incidentų valdymu apžvalgai bei CERT modelio optimizavimui. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai. Antrajame skyriuje analizuojama interneto tinklo topologija taikant grafų teoriją, pasiūlytas autonominių sistemų ir jų sujungimo linijų klasifikavimas. Trečiasis skyrius skirtas kritinių interneto tinklo infrastruktūros elementų paieškos metodikos sudarymui ir taikymui. Pasiūlyta metodika bei algoritmas tokių elementų stebėsenai. Ketvirtajame skyriuose modeliuojama ir tiriama kibernetinių atakų įtaka interneto tinklo infrastruktūros funkcionalumui. Penktajame skyriuose tyrimais gauti rezultatai sudaro prielaidas formuluoti priemones interneto tinklo infrastruktūros patikimui stiprinti bei formuoja regiono interneto ateities reguliavimo ir vystymo gaires.

Disertacijos tema paskelbti 6 straipsniai: du – tarptautinių konferencijų medžiagoje, keturi – recenzuojamame moksliniame žurnale (*Thomson ISI Web of Science*). Disertacijos tema perskaityti 9 pranešimai Lietuvos bei tarptautinėse konferencijose.

Abstract

The dissertation investigates the issues of dependability of the Internet network infrastructure that were studied by using the network topology analysis, graph theory and network modelling. The object of the study is the Internet network infrastructure, based on autonomous systems and interconnecting lines. Stable functioning of the Internet network determines the availability of information, electronic commerce, control of remote objects, etc. The main objective is to develop the methodologies and algorithms for analysing the Internet network infrastructure and controlling the reliability of functioning. The scope of application of the study is the supervision and regulation of continuity of the Internet.

The following main tasks are solved: development of the topological scheme of the Internet network, selection of models and tools for analysis; the Internet network connectivity analysis for the purpose of identification of the critical network elements, whose violations would result in loss of connectivity of the network; as well as development of the model for monitoring of the critical elements of the Internet network and cyber-attacks simulation experiments.

The scientific work consists of the general characteristic of the dissertation, 5 chapters, conclusions, list of literature, list of publications and annexes.

The introduction reveals the investigated problem, importance of the thesis and the object of research and describes the purpose and tasks of the paper, research methodology, scientific novelty, the practical significance of results examined in the paper and defended statements. The introduction ends in presenting the author's publications on the subject of the defended dissertation.

The first chapter is dedicated to the scientific researches of the networks and information security incidents management model (CERT) overview and its optimization. The second chapter analyzes the topology of the Internet network by applying the columns theory and suggests a classification of autonomous systems and their connecting lines. The third chapter is dedicated to the development and application of the methodology for searching for the critical elements of the Internet network infrastructure. A methodology and algorithm for elements monitoring is suggested. In the fourth chapter the impact of cyber-attacks on the functioning of the Internet network infrastructure is modeled and examined. Fifth chapters covers the measures for the improvements of Internet network dependability and forms future internet regulation perspective.

6 articles focusing on the subject of the discussed dissertation are published: 4 articles – in scientific papers in the Thomson ISI register, 2 articles – in conference materials. 9 presentations on the subject have been given in conferences at national and international level.

Žymėjimai

Simboliai

A – tinklo vartotojų skaičius;

Bw – bendra i -osios AS pralaida visiems sujungimams, Gb/s;

C_i – grupavimo koeficientas;

$\deg(V_i^k)$ – k -osios viršūnės V_i^k laipsnis;

$\deg_{in}(V_i^k)$ – mazgų laipsnių pasiskirstymą vidiniams Transit tipo sujungimams;

$\deg_{out}(V_i^k)$ – mazgų laipsnių pasiskirstymą išoriniams Transit tipo sujungimams;

E_c – kritinė linija;

G_{net} – multigrafas;

M_i – briaunų skaičius;

N_i – mazgų skaičius;

$N(h)$ – kaimynystės funkcija;

η_i – mazgo svarbos indeksas;

η_{AS} – linijos svarbos indeksas;

$A_{\max}$ – ribinė linijos pralaida, Gb/s;

A_{traffic} – n -osios linijos duomenų srautas, Gb/s;

λ_n – linijos apkrovos koeficientas;

p – tikimybė, kad kiekvienos briaunos galas per viršūnę gali turėti sujungimą su kita briauna;

$P_{\text{ka}}(t)$ – klaidingo aliarmo tikimybė;

$P_{\text{na}}(t)$ – netikro aliarmo tikimybė;

$P(k)$ – mazgo laipsnio skirstinys;

V_c – kritinis mazgas;

V – grafo viršūnė;

U – grafo briauna;

$u(k)$ – Laplaso faktorius.

Santrumpos

AS – autonominė sistema;

BGP – tinklų maršrutizacijos protokolas, telekomunikacinis terminas pagal angl. *Border Gateway Protocol*;

CERT – kompiuterinių incidentų reagavimo tarnyba, telekomunikacinis terminas pagal angl. *Computer Emergency Responce Team*;

DPS – dinaminio priartėjimo sistema;

GSM – globalus mobilaus ryšio standartas, telekomunikacinis terminas pagal angl. *Global Standart for Mobile Communications*;

HTTPS – saugus protokolas aprašantis informaciją pasiekiamumą tinkle, telekomunikacinis terminas pagal angl. *HyperText Transfer Protocol Secure*;

ICMP – interneto kontrolės žinučių protokolas, telekomunikacinis terminas pagal angl. *Internet Control Message Protocol*;

IIS – išankstinio įspėjimo sistema;

IP – interneto protokolas;

IT – informacinės technologijos;

IPT – interneto prieigos teikėjas;

IRT – informacijos ir ryšių technologijos;

IDS – įsiskverbimo detektavimo sistema;

LMMM – lygiaverčių mainų maršrutizavimo mazgas;

VIB – valdymo informacijos bazė;

OS – operacinė sistema;

PAAA – paskirstyta atsisakymo aptarnauti ataka;

PHP –dinaminė interpretuojama programavimo kalba, kompiuterijos terminas pagal angl. *Hypertext Preprocessor*;

PSTN – viešas komutacinis telefoninio ryšio tinklas, telekomunikacinis terminas pagal angl. *Public Switched Telephone Network*;

SCADA – nuotolinės skaitmeninės objektų ir procesų kontrolės sistemos, telekomunikacinis terminas pagal angl. *Supervisory Control And Data Acquisition*;

SMS – trumpųjų žinučių paslaugos standartas, telekomunikacinis terminas pagal angl. *Short Message Service*;

SNMP – paprastasis tinklų valdymo protokolas, telekomunikacinis terminas pagal angl. *Simple Network Management Protocol*;

SQL – struktūrizuotų užklausų programavimo kalba, kompiuterijos terminas pagal angl. *Structured Query Language*;

TCP – transporto kontrolės protokolas, telekomunikacinis terminas pagal angl. *Transmission Control Protocol*;

WDM – bangos ilgių sutankinimo tinklai, telekomunikacinis terminas pagal angl. *Wavelength-division multiplexing*;

WEP – privatumo bevieliam ryšiui ekvivalentas, telekomunikacinis terminas pagal angl. *Wired Equivalent Privacy*;

WPA – apsaugota bevielio ryšio prieiga, telekomunikacinis terminas pagal angl. *Wireless Protected Access*.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas	1
Darbo aktualumas	2
Tyrimų objektas	2
Darbo tikslas	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas.....	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai	4
Darbo rezultatų aprobavima.....	5
Disertacijos struktūra	5
1. SAUGUMO INCIDENTŲ VALDYMO MODELIO APŽVALGA	7
1.1. Grėsmės interneto tinklo saugumui	7
1.2. Incidentų valdymo modelių literatūros apžvalga ir praktikos analizė	10
1.3. Apibendrintasis incidentų valdymo modelis	16
1.4. Tyrimai Lietuvoje	20
1.5. Incidentų valdymo modelio trūkumai	21
1.6. Interneto patikimumo prigimtis	21
1.7. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas	21

2. INTERNETO TINKLO INFRASTRUKTŪROS TOPOLOGIJOS TYRIMAI	25
2.1. Interneto tinklo specifika	25
2.2. Interneto tinklo modelis	26
2.2.1. Topologija kaip multigrafas	28
2.2.2. Topologijos analizės principai	30
2.2.3. Autonominių sistemų metrikos	31
2.3. Lietuvos interneto tinklo analizė	33
2.4. Antrojo skyriaus išvados	37
3. KRITINIŲ INTERNETO INFRASTRUKTŪROS KOMPONENTŲ NUSTATYMAS.....	39
3.1. Problemos formulavimas	39
3.2. Metrika ir kriterijai	41
3.3. Taikymas	43
3.4. Stebėsena	44
3.5. Trečiojo skyriaus išvados	48
4. KIBERNETINIŲ ATAKŲ ĮTAKA INTERNETO FUNKCIONALUMUI.....	51
4.1. Kibernetinių atakų analizė	51
4.2. Kibernetinių atakų simuliacijos internetui modelis.....	55
4.3. Eksperimentiniai rezultatai	55
4.3.1. Srauto generavimo kibernetinė ataka	55
4.3.2. Tranzitinio mazgo kibernetinė ataka.....	57
4.3.3. Lygiaverčių mainų mazgo kibernetinė ataka	58
4.4. Ketvirtąjo skyriaus išvados	59
5. REGIONO INTERNETO TINKLO PATIKIMUMO STIPRINIMAS	61
5.1. Prielaidos	61
5.2. Išankstinio įspėjimo sistema	64
5.2.1. Išankstinio įspėjimo sistemos analizė	65
5.2.2. Išankstinio įspėjimo sistemos sprendimas.....	67
5.2.3. Išankstinio įspėjimo sistemos taikymas	68
5.3. Organizacinės priemonės	69
5.3.1. Incidentų valdymo efektyvumas	69
5.3.2. Topologijos balansavimas	70
5.3.3. Interneto protokolų saugumo plėtiniai	71
5.5. Penktojo skyriaus išvados	73
BENDROSIOS IŠVADOS	75
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI	77
AUTORIAUS PUBLIKACIJOS DISERTACIJOS TEMA	83

PRIEDAI	85
A priedas. Pilna realios Lietuvos interneto tinklo topologijos schema	85
B priedas. Virtualus Lietuvos interneto tinklo modelis kibernetinių atakų eksperimentams	86

Contents

INTRODUCTION	1
The Investigated Problem	1
Importance of the Dissertation	2
The Object of Research	2
Objective of the Work	3
Tasks	3
Methodology of Research	3
Scientific Novelty	4
Practical Significance of the Results.....	4
Defended Propositions	4
Approbation of the Results	5
Structure of the Dissertation	5
 1. OVERVIEW OF SECURITY INCIDENTS MANAGEMENT MODEL	7
1.1. Threats to Internet network security	7
1.2. Incidents management model researches overview	10
1.3. Consolidated incidents management model	16
1.4. Researches in Lithuania	20
1.5. Limitations of incidents management model	21
1.6. Nature of Internet dependability	21
1.7. Conclusions of Chapter 1 and tasks formulation.....	21

2. INTERNET INFRASTRUCTURES TOPOLOGY ASSESSMENTS	25
2.1. Characteristics of internet	25
2.2. Internet network model	26
2.2.1. Topology as multigraph.	28
2.2.2. Principles of topology assesment.	30
2.2.3. AS metrics.	31
2.3. Assesment of Lithuanian network topology.....	26
2.4. Conclusions of Chapter 2.....	38
3. ESTIMATION OF CRITICAL COMPONENTS OF THE INTERNET INFRASTRUCTURE.....	39
3.1. Formulation of the problem	39
3.2. Metrics and criterias.....	41
3.3. Employment	43
3.4. Monitoring	46
3.5. Conclusions of Chapter 3.....	48
4. CYBER ATTACKS INFLUENCE TO THE INTERNET FUNCTIONALITY	51
4.1. Analyse of cyber attacks	51
4.2. Cyber attacks simulation for network topology	53
4.3. Experimantal results	54
4.3.1. Traffic generation cyber attack.....	55
4.3.2. Transit node cyber attack.	57
4.3.3. Peering node cyber attack.	59
4.4. Conclusions of Chapter 4.....	59
5. DEPENDABILITY CONSOLIDATION FOR REGIONAL INTERNET NETWORK.....	61
5.1. Preconditions.....	61
5.2. Early warning system.....	64
5.2.1. Analyse of Early warning system.	65
5.2.2. Early warning system implementation.....	67
5.2.2. Early warning system practice.	68
5.3. Organisational measures	69
5.2.1. Efektivenes of incidents management.....	69
5.2.2. Balancing the topology.	70
5.2.3. Domane name system security.....	71
5.4. Conclusions of Chapter 5.....	73
GENERAL CONCLUSIONS	75
REFERENCES	77

LIST OF THE AUTHOR’S SCIENTIFIC PUBLICATIONS ON THE TOPIC OF DISSERTATION	83
ANNEXES	85
Annex A. Real Lithuanian internet topology map	85
Annex B. Virtual Lithuanian internet topology map for cyber attacks simulation	86

Įvadas

Problemos formulavimas

Informacijos ir ryšių technologijos (IRT) yra reikšmingas įrankis kuriant inovacijas, socialinę ir ekonominę šalies gerovę. IRT ir konkrečiai interneto technologijos visapusiškai integruotos e. versle, e. bankininkystėje, e. valdžios paslaugose. Interneto tinklas yra ypatingos svarbos nacionalinė infrastruktūra, todėl didėjantis kibernetinių atakų intensyvumas bei technologinių tinklo grandžių sutrikimai kelia poreikį ištirti interneto saugumą ir jo veiklos patikimumą. Šiuo darbu siekiama spręsti elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo krypties problematiką, susijusią su interneto tinklo patikimumu.

Esama interneto tinklo infrastruktūra susiformavo ir toliau vystosi stochastiškai, be sistemingos duomenų srautų bei pralaidumų analizės, be sistemingo tinklo projekto. Regionų interneto tinklus sudaro atsitiktinai sujungti potinkliai, kurie formuoja komplikotą tarptinklinių ryšių topologiją su dideliu skaičiumi mazgų ir jungčių tarp jų. Nėra žinoma ar pakankami tinklo mazgų bei jungiamųjų kanalų pralaidumai, ar tie pralaidumai pakankami esant atskirų mazgų bei kanalų gedimams, ar jie pakankami atsitiktinai padidėjus duomenų srautams ir kibernetinių atakų atvejais. Siekiant valstybės mastu įvertinanti interneto tinklo galimybes, jo patikimumą, būtina atlikti išsamius viso tinklo infrastruktūros tyrimus.

Interneto tinklas veikia didėjančioje kibernetinių atakų ir saugumo pažeidimų aplinkoje. Kartu su pirmomis rimtomis grėsmėmis interneto saugumui, sukurtas reagavimo į saugumo incidentus kompiuterių tinkluose CERT modelis, kuris tobulinamas iki šiol. Tačiau pastebėta, kad CERT modelis, būdamas efektyvus sprendžiant atskirus saugumo incidentus, nėra tinkamas metodas spręsti sisteminius interneto tinklo saugumo ir patikimumo klausimus. Kyla poreikis pasirinkti ir vystyti naujas, pro-aktyvias (prevencines) priemones, kurios sudarytų sąlygas mažinti interneto pažeidžiamumą ar neutralizuoti kibernetinių incidentų įtaką internetui.

Darbo aktualumas

Globalaus interneto moksliniai tyrimai vykdomi nuo tinklo sukūrimo pradžios. Šie tyrimai apima tinklo dedamųjų – autonominių sistemų analizę, tarptinklinių sujungimų topologijos optimizavimo metodus. Tačiau nėra sistemingų tyrimų kaip tirti ir analizuoti iš stochastiškai sujungtų potinklų susiformavusį regiono ar valstybės interneto tinklą kaip bendrą vientisą sistemą. Pristatomoje disertacijoje sprendžiama įvardinta problema ir tuo sukuriamą naują interneto tyrimų kryptis. Darbe atlikti tyrimai ir sukurtos metodikos papildė interneto tyrimų metodikas bei priemones.

Šiuo darbu ieškoma būdų, kaip galima objektyviai vertinti regiono interneto tinklo patikimumą, kuriama metodika, skirta nustatyti interneto veiklos nenutrūkstamumo bei kokybės palaikymo rodiklius. Šios problemos sprendimo rezultatai turi didelę reikšmę kuriant interneto tinklo veiklos patikimumo vertinimo praktiką.

Disertacijoje atlikti interneto tinklo infrastruktūros pažeidžiamumo tyrimai ir sudaryta metrika interneto tinklo patikimui vertinti. Metodai, paremti grafų teorija, tinklo modeliavimu, statistine analize bei eksperimentiniais bandymais, leidžia spręsti tinklo analizės uždavinius tais atvejais, kai objekto modelis yra sudėtingas arba jo potinkliai sujungti atsitiktinai, kai nėra pilnai žinomos tinklo statistinės charakteristikos.

Darbo rezultatai yra aktualūs šalies ir tarptautinėms telekomunikacijų priežiūros ir reguliavimo institucijoms, nes padeda įvertinti esantį interneto tinklo infrastruktūros pažeidžiamumą. Taip pat sudaro prielaidas telekomunikacijų reguliavimo institucijoms pritaikyti mokslinius metodus interneto tinklo infrastruktūros patikimumo kontrolei bei ateities interneto patikimumo stiprinimui.

Darbas taip pat aktualus krašto apsaugos tarnyboms. Telekomunikacijos ir internetas yra nacionalinis resursas. Kadangi auga kibernetinių atakų įtaka interneto tinklo funkcionalumui, o NATO elektroninę erdvę paskelbė penktąja gynybos dimensija, interneto saugumo užtikrinimas yra ir šalies gynybos plano dalis.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – iš anksto apibrėžto (geografiškai išreiškiamo grafo briaunų ir viršūnių visuma) regiono interneto tinklo infrastruktūra, sudaryta iš tarpusaviu sujungtų autonominių sistemų (AS) ir lokaliųjų tinklų. Praktiškai ištirtas Lietuvos interneto tinklas sudarytas iš 40 AS, 27 lokaliųjų potinklų, 490 tarptinklinių jungčių (tarp jų 373 lygiaverčių mainų tipo ir 117 tranzitinės jungtys).

Darbo tikslas

Ištirti ir išanalizuoti iš stochastiškai sujungtų potinklų susiformavusį regiono ar valstybės interneto tinklą kaip bendrą sistemą ir pasiūlyti būdus kaip nustatyti ir stebėti tokios sistemos patikimumo bei veiklos nenutrūkstamumo rodiklius.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti siekiama išspręsti sekančius uždavinius:

1. Sudaryti interneto tinklo topologijos analizės modelį bei priemones.
2. Sukurti metodus interneto tinklo infrastruktūros kritiniams elementams, kurių pažeidimai būtų susiję su ženkliai tinklo funkcionalumo praradimu, nustatyti.
3. Sudaryti kritinių interneto tinklo infrastruktūros elementų stebėsenos modelį ir jo veiklos algoritmą.
4. Sumodeliuoti virtualų regiono interneto tinklą bei išbandyti jo pažeidžiamumą simuliuojant kibernetines atakas.
5. Suformuluoti priemones interneto tinklo infrastruktūros patikimumui stiprinti.

Tyrimų metodika

Darbe taikomi sistemų modeliavimo, grafų teorijos ir statistinės analizės metodai. Hipotezės tikrinamos sudarant modelius ir atliekant simuliacijas, vykdant eksperimentinius tyrimus.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie telekomunikacijų inžinerijos mokslui reikšmingi rezultatai:

1. Sukurta metodika regiono interneto tinklo infrastruktūros patikimumui tirti, kuri naudojant ryšių grafų teoriją geriau įvertina tinklo topologijos pažeidžiamumus. Aprašyta Lietuvos interneto tinklo topologija, įvertinti patikimumo rodikliai.
2. Sudaryta metrika kritinių Interneto tinklo infrastruktūros elementų identifikavimui. Taikant šią metriką gauti rezultatai regiono Interneto tinklui.
3. Atlikta Interneto tinklo infrastruktūros topologijos modelio analizė taikant kibernetinių atakų simuliacijos eksperimentus.
4. Pasiūlytas kritinių Interneto tinklo infrastruktūros elementų stebėsenos modelis ir jo veiklos algoritmas.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Darbe sukurta universali tyrimų metodika ir metrika gali būti naudojamos įvairių interneto tinklo sričių (regionų) infrastruktūros patikimumo tyrimams, kritinių interneto tinklo infrastruktūrų elementams identifikuoti ir jų tolesnei stebėsenai atlikti. Nacionalinės elektroninių ryšių reguliavimo ir priežiūros institucijos, remiantis darbe aprašytais metodais, praktiškai vertina interneto tinklo patikimumo bei saugumo rodiklius.

Tyrimų rezultatai įvertinti Lietuvos Respublikos ryšių reguliavimo tarnyboje ir naudojami vykdant nacionalinę elektroninių ryšių reguliavimą. Išbandytas darbe pasiūlytas kritinių interneto tinklo infrastruktūros elementų stebėsenos modelis laboratorijos sąlygomis.

Darbo rezultatai ir vaizdiniai pristatymai demonstruoti Tarptautinei Telekomunikacijų Sąjungai (ITU), Europos tinklų ir informacijos saugumo agentūrai (ENISA), Europos šalių reguliavimo institucijoms bei Lietuvos Respublikos krašto apsaugos ministerijai.

Ginamieji teiginiai

1. Realūs interneto regionų tinklai susidaro stochastiškai sujungiant autonomines sistemas, todėl jų linijų bei mazgų pralaidumai ne visada atitinka informacinių srautų intensyvumus.
2. Interneto tinklo infrastruktūros grandžių pažeidžiamumą gerai atspindi kritiniai elementai: kritinis ir η -kritinis mazgas, kritinė ir κ -kritinė linija.

3. Interneto infrastruktūra nuolat kinta, todėl jos stebėsenai ir patikimumui vertinti reikalingas nuolat atnaujinamas analizuojamo regiono tinklo struktūrinis modelis.
4. Regioninio interneto tinklo būsenai stebėti bei kibernetinių atakų įtakai analizuoti geriausiai tinka kritinių tinklo elementų stebėsenos realiuoju laiku metodas bei kibernetinių atakų simuliacijos eksperimentai.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema yra spausdinti 6 moksliniai straipsniai: keturi – mokslo recenzuojamuose žurnaluose *Thomson ISI Web of Science* (Rainys 2006, 2010, 2011), du – recenzuojamuose tarptautinių konferencijų medžiagoje (Rainys 2006, 2007).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti devyniose mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „*Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities*“ 2009 m. Vilniuje;
- Tarptautinėje konferencijoje „*Elektronika*“ 2007, 2008, 2010 m. Vilniuje. 2010 m. *IEEE Lithuanian Section SP/CIS/COM Joint Chapter skirta I-sios vietos pažyma geriausio jaunojo mokslininko pranešimo konkurse*;
- Tarptautinėje konferencijoje „*Informacinės technologijos*“ 2007 m. Kaune;
- Tarptautinėje konferencijoje „*Information Security Solutions Europe*“ 2006 m. Romoje;
- Tarptautinėje IEEE/IST konferencijoje „*Monitoring, Attack Detection and Mitigation*“ 2006 m. Tubingene;
- Tarptautinėje konferencijoje „*Future of Broadband*“ 2010 m., Stambule;
- Tarptautinėje konferencijoje „*Cyber Conflict*“ 2010 m., Taline.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, penki skyriai ir rezultatų apibendrinimas. Taip pat yra du priedai.

Darbo apimtis yra 84 puslapiai, neskaitant priedų, tekste panaudotos 9 numeruotos formulės, 21 paveikslas ir 7 lentelės. Rašant disertaciją buvo panaudoti 91 literatūros šaltiniai.

Padėka

Išreiškiama autoriaus padėka moksliniam vadovui prof. habil. dr. Algimantui Kajackui, kurio mokslinės įžvalgos, rekomendacijos ir sistemingas vadovavimas reikšmingai prisidėjo kuriant ir realizuojant mokslinius tyrimus šios disertacijos kontekste.

Taip pat dėkoju Lietuvos Respublikos ryšių reguliavimo tarnybai už mokslo darbų įvertinimą ir panaudojimą praktikoje vykdant elektroninių ryšių tinklą ir informacijos saugumo priežiūrą Lietuvos Respublikoje.

Saugumo incidentų valdymo modelio apžvalga

Skyriuje analizuojami aktualūs interneto tinklo saugumo aspektai: nepritaikytas aukštiems saugumo reikalavimams interneto protokolai, augantis informacinių sistemų kompleksiskumas, saugumo pažeidžiamumai programinėje įrangoje, *botnet* tinklai, debesų technologijų naudojimas ir pan. Apžvelgiamas CERT modelis, skirtas saugumo incidentų tyrimams ir reagavimui, ypač kai yra potenciali rizika tinklo funkcionalumui ar duomenų saugumui. Sudarytas optimizuotas CERT modelis regiono interneto tinklo saugumo priežiūrai.

Skyriaus tematika paskelbti du autoriaus straipsniai (Rainys 2006, Rainys 2007).

1.1. Grėsmės interneto tinklo saugumui

Augantis informacinių technologijų (IT) naudojimas lemia ir didesnių grėsmių joms atsiradimą. Besiplečiančių IT galimybių spektras veiksmingai išnaudojamas naudojant interneto tinklo platforma. Tačiau negalima nepaisyti vienos iš pagrindinių šios srities problemų – saugumo užtikrinimo. interneto tinklas ir jo pagrindu veikiančios IT susiduria su augančiu incidentų virtualioje erdvėje skai-

čiumi ir kibernetinių atakų mastu bei profesionalumu (Hanley 2011, Libicki 2009).

Saugumo incidentų įtaka elektroninių ryšių tinklams nuolat auga ir prognozuojama, kad ateityje incidentų tik daugės. Susidariusias grėsmes saugumui lemia kelios esminės priežastys:

1. Interneto tinklo kūrimo pradžioje, nebuvo tikslo tinklą adaptuoti aukštiesiems saugumo reikalavimams. Tačiau dabar interneto saugumas tapo aktuali problema. Projektavimo metu buvo siekiama paprasto ir universalaus tinklo standarto, sujungiančio skirtingų tipų skaitmenines skaičiavimo mašinas į bendrą duomenų perdavimo tinklą. Vėliau tinklas pradėtas naudoti jau atskirų duomenų perdavimo tinklų sujungimui, ką ir realizavo TCP/IP protokolas (Kozierok 2005). Interneto tinklas per salyginai trumpą laikotarpį ženkliai išsiplėtė, tad dabar, atsiradus svarbioms saugumo problemoms, jį pakeisti kitu, saugesniu tinklu praktiškai neįmanoma. Informacinių sistemų, prijungtų prie interneto tinklo, yra milijonai, o tinklo įrenginių, kurie pagaminti darbui TCP/IP standarto tinkluose, yra dar daugiau. Technologiškai labai sudėtinga pakeisti šį techninį ūkį, todėl išlieka poreikis ieškoti kitų tinklų ir informacijos saugumo kontrolės mechanizmų tiesiogiai nekeičiant techninės įrangos.

2. Belaidžių tinklų, ypač veikiančių Wi-Fi technologijos pagrindu, plėtrą nelicencijuojamuose 2,4 GHz ir 5 GHz dažnių juostose kelia naujus saugumo iššūkius tinklų saugumui (Lehembre 2005). Duomenų perdavimas belaidžiu tinklu vyksta signalus skleidžiant radijo bangomis, o tai potencialiems įsibrovėliams suteikia daugiau galimybių nei įprastiniuose laidiniuose tinkluose nuotoliniu būdu perimti duomenis iš belaidžių tinklų ir juos valdyti. Belaidžių tinklų įrangos gamykliniai nustatymai dažnu atveju nėra pritaikyti aukštiesiems saugumo reikalavimams (pavyzdžiui, naudojami standartiniai prisijungimo prie tinklo slaptažodžiai). Dėl šifravimo algoritme aptiktos saugumo spragos, WEP technologija neapsaugo tinklo vartotojo duomenų konfidencialumo. Esant tam tikroms sąlygoms (kai srauto duomenyse yra pakartotinai panaudojamas RC4 šifro raktas), WPA šifravimo raktas gali būti atskleistas atlikus vadinamąją „ataką pagal žodyną“. WPA (angl. *Wireless Protected Access*) 802.11i standarto versijos realizacija, pagrįsta TKIP (angl. *Temporal Key Integrity Protocol*) šifravimo algoritmu, kuri buvo sukurta tam, kad pakeistų WEP (Lehembre 2005). Tačiau WPA ir WPA2 naudojama dar ne visose Wi-Fi tinklų įrenginiuose. Statistiškai Lietuvoje belaidžių tinklų 57 % visai nenaudoja duomenų perdavimo šifravimo arba naudoja pažeidžiamą duomenų kodavimo algoritmą WEP 16 % (Vindašius 2006).

3. Augantis IT kompleksiskumas: internete organizuojamos atskiros verslo sistemos (vadinamasis e. verslas); bankinės operacijos perkeliama į internetą (e. bankininkystė); valstybinės institucijos paslaugas piliečiams taip pat perkelia į elektroninę erdvę (e. vyriausybė); nuotolinės skaitmeninės objektų ir procesų

kontrolės sistemos (literatūroje dažniausiai apibrėžiama kaip SCADA sistemos) veikia interneto tinkle taip pat. SCADA sistemos ypatingos, nes kontroliuoja gyvybiškai svarbių infrastruktūrų (kaip vandens, energijos tiekimas) darbą (Hentea 2008). Dėl įvairialypio informacinių sistemų kompleksiško ir integralumo su interneto tinklu sistemos tampa sudėtingesnės ir tai didina riziką, kad tokiose sistemose atsirastų daugiau saugumo spragų. Pavyzdžiui, 2010 m. aptiktas „Stuxnet“ virusas orientuotas į SCADA komponentų pažeidimus. Jis pakeičia procesų valdiklių parametrus taip neautorizuotai falsifikuojant komandas ar sugadinant SCADA technologinius įrenginius (Falliere 2011).

Interneto tarptinklinių ryšių sistema yra dinamiška ir nuolat kintanti. Ji keičiasi atsirandant naujoms jungtims ir pašalinant kitas. Interneto tinklas yra labai decentralizuotas. Sprendimas dėl tarptinklinių jungčių organizavimo priimamas pačių AS operatorių. Jungimasis priklauso nuo AS galimybių pasiekti internetą ir nuo noro būti pasiekiamam iš išorės, kai tuo tarpu techninės galimybės nėra pirmailės. Tuo tarpu kai duomenų srautai keičiasi, *media* turinio apimtys ženkiai padidėjo lyginant su 2000 metais dominavusiu duomenų tipu tarp galinių taškų (Hall 2011). Atsitiktinė tarptinklinių jungčių infrastruktūros veikla ne visada gali adekvačiai akumuliuoti duomenų srautus.

4. Šiuolaikinėms kompiuterinėms sistemoms aptarnauti kuriamos didelių apimčių programos, sudarytos iš daugybės programinio kodo eilučių. Vertinama, kad 1000 programinio kodo eilučių paprastai yra nuo 5 iki 20 klaidų. Populiarias tinklo valdymo operacines sistemas sudaro apie 40 mln. programinio kodo eilučių (Lohr 2006), tai reiškia, kad jos gali turėti nuo 175 000 iki 700 000 potencialių programavimo klaidų (pažeidžiamumų). Šie pažeidžiamumai programinėje įrangoje yra išnaudojami kenksmingam programiniam kodui (virusams) įterpti į IT sistemas.

5. Dėl programų pažeidžiamumų, laikas saugumo atakoms įvykdyti trumpėja. Pavyzdžiui, 2000 metais kompiuterinis virusas „Nimba“ pasinaudojo pažeidžiamumu *Microsoft* operacinėje sistemoje, atrasta beveik prieš metus, o 2004 metų virusui „Sasser“ sukurti prireikė vos 17 dienų (Ferrie 2004). Virusas „Witty“ buvo sukurtas per 1 parą po pranešimo apie programinės įrangos pažeidžiamumą. Dėl to, organizuoti reagavimo į saugumo incidentus veiksmus lieka nedaug laiko.

6. Botnet tinklai, t. y. pažeistų ir nuotoliniu būdu valdomų per vieną ar kelis kontrolierius kompiuterių tinklas (Provos 2007, Juknius 2011). Tai didelė tinklų ir informacijos saugumo problema, nes tokie tinklai savyje apjungia iki kelių šimtų tūkstančių pažeistų kompiuterių. Juos nukreipus į pasirinktą taikinį, galima padaryti didesnių nuostolių, negu pavienėmis atakomis.

7. Pastebima tendencija – saugumo incidentų mobilumas, atakos nukreipiamos į mobiliuosius telefonus ir planšetinius kompiuterius. Pasaulyje mobiliųjų telefonų yra daugiau kaip milijardas (daugiau, negu kompiuterių), tad pastaruoju

metu atakos yra nukreipiamos būtent į juos, taip padarant žalos dar didesnei tikslinei vartotojų grupei. Tyrimų duomenimis 2011 m. kenksmingo programinio kodo apimtys išaugo 400 proc. *Android* išmaniųjų telefonų sistemoms. 17 proc. atvejų apie aptiktus mobilius virusus sudarė trumpųjų žinučių SMS *Trojanai* kurie inicijuoja SMS žinučių automatinį siuntimą padidinto tarifo numeriais. Tik 15 proc. išmaniųjų telefonų vartotojų naudoja antivirusines ar ugniasienių programas (Juniper 2011). Tokia situacija sąlygota išaugusiu išmaniųjų telefonų vartojimu, atviro kodo operacinių sistemų (OS) tokiems įrenginiams ir didelė gausa papildomų programų (aplikacijų) turinčių saugumo pažeidžiamumus.

8. Iki šiol įmonės ir organizacijos IT įrenginius ir jų programas įsigydavo ir juos administruodavo pačios. Dabar yra perkamos IT paslaugos iš IT paslaugų teikėjų. Informacijos ir IT savininkai išsiskiria, informacija saugoma ir prieinama savininkui nuotoliniu būdu, o ši technologinė tendencija vadinama debesų technologijomis. Debesų technologijos ekonomiškai pasiteisina, todėl jų naudojimas sparčiai auga (Goodger 2011). Kadangi savininkas perkelia informacijos ir IT valdymą kitam subjektui, jis nebevaldo ir rizikų. Debesų technologijos saugumo aspektai: duomenų centrų saugumo užtikrinimas, perduodamų tinklais duomenų šifravimas, duomenų pasiekiamumas (t. y. ryšio nenutrūkstamumo užtikrinimas) ir visos sistemos veiklos patikimumas. Pavyzdžiui, jeigu būtų pažeistas ar sugadintas duomenų centras arba organizuota kibernetinė ataka ryšio kanalų pralaidos užblokavimui, tai atsilieptų visiems duomenų centrų vartotojams. Atsižvelgiant į tai, debesų technologijų saugumas yra ypatingas.

1.2. Incidentų valdymo modelių literatūros apžvalga ir praktikos analizė

Absoliutaus saugumo bendrąja prasme kompiuteryje, informacinėje sistemoje ar tinkle pasiekti praktiškai neįmanoma. Saugumas – tai tikslas, kurio turi būti siekiama visą laiką. Tvirtinama, kad šiam tikslui įgyvendinti sukurta kompiuterinių incidentų reagavimo tarnyba CERT (West-Brown 2003, Killcrece 2003, Alberts 2004).

CERT, dar kitaip CSIRT (Alberts 2004) – tai tinklų ir informacijos saugumo incidentų reagavimo tarnyba, kurios pagrindinis tikslas yra operatyviai reaguoti į saugumo incidentus elektroninių ryšių tinkle, vykdyti jų tyrimus ir koordinuoti veiksmus juos šalinant, ypač kai yra potenciali rizika tinklo funkcionalumui ar duomenų saugumui (West-Brown 2003). Elektroninėje erdvėje CERT atlieka savotišką gaisrų gesinimo komandos vaidmenį.

CERT veiklos istorija prasideda nuo 1988 m., kai vienas pirmųjų interneto kirminų (pati save tinkle platinanti kompiuterinio viruso atmaina) apkeliavo visą pasaulinį interneto tinklą ir sutrikdė daugelio IT veiklą. Tais pačiais metais buvo sukurtas pirmasis CERT (IT saugumo incidentų tyrimo grupės) modelis, kuris

buvo užregistruotas JAV Patentų biure ir iki šiol veikia Carnegie Mellon universitete. Akademiniuose sluoksniuose sukurtas CERT veiklos modelis buvo sėkminga idėja ir tapo svarbiausiu įrankiu vykdant IT saugumo incidentų valdymą elektroninių ryšių tinkluose. Šiuo metu pasaulyje egzistuoja keli šimtai įvairaus dydžio valstybinių, komercinių bei akademinių CERT.

Autorių (West-Brown 2003, Killcrece 2003, Alberts 2004) darbuose apibendrinamos pagrindinės CERT modelio funkcijos, kurių santrauka išdėstyta 1.1 lentelėje. Didžiąją dalį šių funkcijų sudaro organizacinės priemonės, kurias galima suskirstyti į reagavimo ir prevencijos.

1.1 lentelė. CERT modelio saugumo incidentų tyrimo funkcijos

Table 1.1. Functions of security incidents assesment for CERT model

Tiesioginės funkcijos	Netiesioginės funkcijos	Saugumo kokybės valdymo funkcijos
<p>Įspėjimas apie grėsmes.</p> <p>Incidento valdymas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - incidento analizė; - reagavimas į incidentą vietoje; - pagalba reagavimui į incidentą; - reagavimo į incidentą koordinavimas. <p>Pažeidžiamumų valdymas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - pažeidžiamumo analizė; - reagavimas į pažeidžiamumą; - reagavimo į pažeidžiamumą koordinavimas. <p>Artefaktų valdymas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - artefakto analizė; - reagavimas į artefaktą; - reagavimo į artefakto koordinavimas. 	<p>Pranešimai apie pažeidžiamumus.</p> <p>Technologijų stebėjimas.</p> <p>Saugumo auditas ir įvertinimas.</p> <p>Saugumo priemonių konfigūravimas ir priežiūra.</p> <p>Saugumo priemonių kūrimas.</p> <p>Įsilaužimų detektavimas.</p> <p>Informavimas apie saugumą.</p>	<p>Rizikų analizė.</p> <p>Verslo tęstinumo ir krizių likvidavimo planavimas.</p> <p>Saugumo konsultacijos.</p> <p>Mokymai.</p> <p>Produktų įvertinimas ir sertifikavimas.</p>

Darbe (Killcrece 2003) apžvelgiant CERT organizacinius modelius, nagrinėti saugumo incidentų tyrimų būdai. Nagrinėjama iš esmės organizaciniai veiksmai, skirti valdyti saugumo incidentų tyrimo procesus. Medžiaga naudinga organizacijoms, kurios priima sprendimą kurti CERT, tačiau dar nėra apsisprendusios kokią CERT modelį pritaikyti.

Šaltinis detalčiai analizuoja ir aprašo praktiškai visus galimus CERT modelių variantus, jų stipriąsias ir silpnąsias savybes. Aptariami tokie saugumo incidentų

tyrimų realizavimo variantai:

1. Saugumo komandos modelis. Iš esmės tai nėra pilna apimtimi veikiantis CERT modelis, nes jame nenumatyta dedikuoto resurso įmonėje ar organizacijoje vykdyti saugumo incidentų tyrimus. Reagavimas į saugumo incidentus nėra apibrėžtas ir nekoordinuojamas, t. y. tyrimas vyksta pagal buvusį saugumo incidento faktą.
2. Vidinis paskirstytasis CERT modelis. Įgyvendinamos būdingos CERT tarnybai funkcijos per struktūras, kurios gali vykdyti ir kitus, nepriskirtus CERT, uždavinius.
3. Vidinis centralizuotas CERT modelis. Sukurta specialiai CERT funkcijoms vykdyti struktūra, kurios veiklos prioritetas – reagavimas į saugumo incidentus.
4. Vidinis apjungtas paskirstyto ir centralizuoto CERT modelis. Derinamos dviejų ankstesnių CERT modelių savybės.
5. Koordinacinis CERT modelis. Toks modelis užtikrina incidentų tyrimus tarp keleto įmonių ar organizacijų ir gali apimti didelį regioną, kuriame gali būti ir kitų veikiančių CERT tarnybų.

Darbe (Wiik 2005) pateikiamas naujas metodas kaip pagerinti tradicinio incidentų tyrimų CERT modelio efektyvumą pasinaudojant dinaminio priartėjimo sistema. Daroma prielaida, kad praktikoje stebimas nuolat didėjantis incidentų kiekis, ko pasekoje CERT tarnybos, negalinčios adekvačiai padidinti turimų resursų, negali apdoroti visų incidentų laiku, nukenčia tyrimų kokybė. Ši CERT problema sprendžiama dinaminio priartėjimo sistemos (DPS) pagalba, kuri turi pagerinti CERT efektyvumą. DPS plačiai naudojama ekonomikos, psichologijos bei inžinerijos moksluose ir yra paremta teorija, kad sistemoje su įėjimo ir išėjimo svoriais galima organizuoti grįžtamąjį ryšį, kurį visada galima keisti taip, kad prie kintančio įėjimo sistema visada liktų subalansuota. Tokiu būdu sistemos elgesys priklausys nuo grįžtamųjų ryšių. Atsižvelgiant į tai, autoriai išskaitė CERT į atskirus funkcinis mazgus, sudarė jiems įėjimų ir išėjimų sistemą ir ėmėsi sumodeliuoti ryšius tarp jų. Sudėtingų ryšių sistema sudaryta taip, kad sistema galėtų funkcionuoti optimaliai, t. y. incidentų tyrimas visada galėtų vykti optimaliai. Aptartą modelį iliustruoja 1.1 paveikslas.

Darbe (Killcrece 2003) teigiama, kad didėjančių veikiančių CERT tarnybų skaičių lemia augantis saugumo incidentų mastas ir neišvengiamas poreikis į tai reaguoti, teisiniai reikalavimai bei vyraujanti nuomonė, jog saugumas IT sistemose turi būti siekiamas aktyviais veiksmais. Taip akcentuojama, kad saugumo incidentų valdymas tampa ženkliai efektyvesnis, kai be reagavimo į incidentus, atliekamos ir prevencinės priemonės, tokios kaip savalaikiai įspėjimai apie grėsmes, informavimas, incidentų detektavimo priemonės, sensoriai tinklo mazguose ir pan. Be to, šaltinis identifikuoja ir tam tikras spragas CERT srities dokumentuose: ženklus trūkumas saugumo incidentų

tyrimų standartų; neviseškai aiškus duomenų valdymo (saugojimo, archyvavimo, pasiekiamumo) klausimas.

1.1 pav. DPS modelio schemas fragmentas (Wiik 2005)

Fig. 1.1. Fragment of DPS model scheme

Bandymų rezultatais tvirtinama, kad reikšmingiausias (turintis didžiausią svorį) grįžtamasis ryšys sistemoje yra automatizuoto reagavimo galimybės. Praktikoje autoriai siūlo, esant padidėjusiai incidentų tyrimo apimčiai, CERT tarnyboms laikinai riboti žemo prioriteto incidentų tyrimus, o atsilaisvinusius resursus nukreipti automatizuotoms reagavimo funkcijoms kurti. Autoriai taip pat akcentuoja prevencinių metodų naudojimą, kaip vieną efektyviausių incidentų mažinimo priemonių. Kalbama apie vartotojų mokymus, rekomendacijų leidimą, pažeidžiamumų testus ir pan.

Darbe (Karun 2006) ieškoma incidentų apdorojimo efektyvumo gerinimo būdų. Šio tikslo siekiama pasinaudojant *Ford-Fulkerson* grafų teorijos algoritmu. Nagrinėjamas grafas, paprastai susidedantis iš ištakos ir santakos tarp kurių yra eilė mazgų sujungtų ryšiais kryptimi nuo ištakos į santaką. Ford-

Fulkerson algoritmas paremtas teorija, kad maksimalus kelių skaičius atitiks minimalų mazgų kirtimų skaičių. Mazgai yra CERT specialistai, vykdantys incidentų tyrimus, o ryšiai žymi informaciją apie incidentų srautus. Išskirti du vyraujantys CERT organizacinius modelius: hierarchinį ir matricos tipo. Vėliau, pasinaudodamas minėtais grafų teorijos metodais, pritaiko juos CERT organizacijai ir incidentų tyrimo procesui modeliuoti bei jiems optimizuoti. Programiškai sukuriamas šiais algoritmais paremtas prototipas. Testų rezultatai parodė, kad matricos tipo organizacinis CERT modelis efektyvesnis nei hierarchinis. Kadangi incidentai kinta ir nėra vienodi, tokiu metodu metodo veikimo efektyvumas mažėja.

Saugumo incidentų ir pažeidžiamumų kompiuterinėse programose sąryšis nagrinėjamas darbe (Condon 2007). Egzistuoja tiesioginė priklausomybė tarp saugumo spragų (pažeidžiamumų) programose ir saugumo incidentų (virusų, įsilaužimų ir pan.), t. y. pastarieji daugumoje plinta išnaudodami pažeidžiamumus. Daroma prielaida, kad įmanoma sumažinti saugumo incidentų skaičių užtikrinant programų patikimumą. Įrodinėjant šią prielaidą, buvo paimta didelis skaičius incidentų iš akademinio tinklo CERT tarnybos ir atliktas jų stebėjimas laikotarpiais informacinėse sistemose su saugumo spragomis programose ir vėliau sistemose su pašalintais pažeidžiamais. Pokyčiams įvertinti autoriai panaudojo Laplaso faktorių, skaičiuojamą pagal formulę:

$$u(k) = \frac{\sum_{i=1}^k (i-1)n(i) - \frac{(k-1)}{2} \sum_{i=1}^k n(i)}{\sqrt{\frac{k^2-1}{12} \sum_{i=1}^k n(i)}}. \quad (1.1)$$

kurioje k yra stebėjimų laikotarpiai (dienos), o i – incidentai. Laplaso faktoriaus kitimas parodė priklausomybę tarp incidentų ir saugumo spragų. Toliau siūloma taikyti įvairius programų patikimumo gerinimo metodus. Pritaikius praktikoje, tai gali turėti teigiamos įtakos incidentų prevencijai, bet tik kaip pagalbinė priemonė CERT sistemose, kadangi neįvertina daugelio incidentų tyrimų aspektų. Programų gamintojai ištaiso tik žinomas iš anksčiau saugumo spragas, be to visada egzistuoja „langas“ tarp saugumo incidento įvykio ir momento kai gamintojas išleidžia saugumo pataisymus.

Kadangi privačiame sektoriuje dėl saugumo incidentų IS, elektroninėse paslaugose patiriami finansiniai nuostoliai incidentų tyrimai aktualūs įmonėms ir organizacijoms. Šioje srityje darbas (Masurkar 2003) yra nagrinėja incidentų tyrimų reikšmę bei įvairius organizacinius CERT modelius. Išskiriami dedikuoti CERT, kurių incidentų tyrimai yra pagrindinė veikla ir nededikuotus CERT, kurie suformuojami tik tam momentui kai incidentų tyrimas yra būtinas. Nagrinėjami abiejų tipų galimos struktūros ir sudėtis, kad pasiekti efektyvų

CERT funkcionalumą bei didelis dėmesys skiriamas saugumo politikos organizacijoje nustatymui ir jos suderinimui su incidentų tyrimų procesu. Originali autorių siūloma CERT struktūra pavaizduota 1.2 paveiksle.

1.2 pav. Organizacinė CERT struktūra (Masurkar 2003)

Fig. 1.2. Structure of organisational CERT

Darbe (Hadjkiss 2006) apie CERT galimybių plėtrą, nagrinėjama kaip incidentų tyrimus įtakoja CERT mokymo procesą. Tai yra akcentuojama, kad incidentų tyrimų rezultatai turėtų būti peržiūrimi, analizuojami ir vėliau turi įtakoti viso CERT proceso tobulėjimą (mokymą). Autorius pažymi, kad egzistavo trūkumas medžiagos, tiesiogiai susijusios su tinklų ir informacijos saugumo incidentų tyrimais ir CERT savęs mokymo proceso ypatumais, todėl buvo pasinaudota informacija apie metodus, naudojamus medicinos ir gynybos srityse. Kad patvirtinti savo hipotezes, autorius atliko tyrimą, kurio metu apklausė eilę ekspertų iš CERT tarnybų. Apibendrinant darbo rezultatus pateiktus šaltinyje (Hadjkiss 2006), 1.3 paveiksle pavaizduota autoriaus incidentų tyrimų schema, kurioje atvaizduojamas ir mokymas iš incidentų kaip atskira modelio dalis.

Kitas metodas saugumo incidentams tirti susijęs su kombinuotomis saugumo incidentų aptikimo programinėmis priemonėmis (Ando 2007). Metodas paremtas dviejų tipų įsibrovimo aptikimo sistemų (IAS): anomalijų aptikimo IAS ir nesuderintų veiksmų detektavimo IAS lygiagretaus veikimo principu. Abi sistemos yra IAS atmainos, kuriose skiriasi veikimo principas

aptinkant saugumo incidentą. Nesuderintų veiksmų detektavimo IAS veikimas paremtas žinomų informacinių sistemų pažeidžiamumų išnaudojimo scenarijaus duomenų baze, kai tuo tarpu anomalijų aptikimo IAS remiasi nenumatyto (neatitinkančio aprašyto scenarijaus) informacinės sistemos elgesio detektavimu. Pastebėta, kad nesuderintų veiksmų detektavimo IAS nesugeba aptikti incidentų kai panaudojamas naujai nustatytas saugumo pažeidžiamumas, nesantis IAS duomenų bazės įrašuose, o anomalijų aptikimo IAS praktikoje išduoda didelį skaičių neteisingų pavojaus signalų. Autoriai daro prielaidą, kad lygiagrečiai veikiančios nesuderintų veiksmų detektavimo IAS ir anomalijų aptikimo IAS gali efektyviau identifikuoti įspėjimus apie būsimus saugumo incidentus. Metodus ženkliai padeda korektiškam saugumo incidentų identifikavimui ir gali būti panaudotas, pavyzdžiui, kaip dalis CERT modelio, tačiau praktiškai neįtakoja incidentų tyrimo.

1.3 pav. Mokymo proceso incidentų tyrimo procese schema

Fig. 1.3. Education process influence to incidents management

1.3. Apibendrintasis CERT modelis

Pagal CERT modelį, saugumo incidentų valdymas vyksta trimis pagrindiniais etapais:

- pranešimų apie incidentus priėmimas, įvertinimas ir pradinis prioriteto priskyrimas (rūšiavimas);

- incidentų tyrimas ir techninis apdorojimas bei tikslinių vartotojų grupių informavimas apie grėsmes;
- reagavimas į incidentus, statistinis registravimas, incidentų plitimo užkardymas, tinklo ar IT veiklos atstatymas.

Veikiančiame CERT tarp šių trijų darbinių etapų (funkcinių objektų) egzistuoja tarpusavio ryšiai (1.2 pav.). Raudonai pažymėtos kryptys yra bazinės, šiuo keliu vyksta pagrindinis darbas su informacija apie incidentą. Svarbų vaidmenį vaidina išankstinio įspėjimo sistema, t.y. prevencinė priemonė, skirta informuoti tikslines grupes (vartotojus, tinklų administratorius, kitus CERT), siekiant užkirsti kelią tolesniam incidento plitimui.

1.4 pav. Funkcinė CERT veiklos schema

Fig. 1.4. CERT model functional scheme

CERT veikimo modelyje pagrindinis apdorojamas objektas yra pats saugumo incidentas. Dėl CERT modelio specifikos, egzistuoja didelis skaičius variantų koku keliu vyksta incidento tyrimas. Toliau siekiama, pritaikant klasikinio CERT modelio pagrindus (West-Brown 2003), sukurti individualų, priimtina situacijai Lietuvos interneto tinkluose, incidentų valdymo metodą.

Informacija apie incidentą, patekusi į CERT, pereina apdorojimo CERT sistemoje ciklą (1.3 pav.):

1. Visų pirma priimamas pranešimas apie saugumo incidentą. Tai gali būti padaryta elektroniniu paštu, telefonu, per specialią internetinės svetainės formą. Toks veiksmas paprastai atliekamas interneto vartotojo, kuris turi informacijos apie konkretų saugumo incidentą. Ilgą laiką CERT modelyje tai buvo pagrindinis pranešimo apie incidentą šaltinis. Laike kibernetinės atakos ir kenksmingas

programinis kodas keitėsi. Dabar virusų veikla dažniausiai užslėpta kompiuterio operacijų procesuose (Ferrie 2004), o kompiuteriai pakankamai našūs, kad dėl viruso veiklos procesai vizualiai nesulėtėtų. Kibernetinės atakos, kuriomis nesiekama pažeisti tinklo infrastruktūros, atliekamos informacijos vagystės tikslu, todėl paprastai jos yra maskuojamos. Dėl šių priežasčių, kyla poreikis pranešimus apie incidentus generuoti automatinėmis programinėmis priemonėmis. Tai atliekama per įsibrovimų aptikimo sistemos (IDS) signalus ar naudojant tinklo sensorius. Konfidenciali informacija siunčiama naudojant elektroninio parašo (asimetrinės kriptografijos) technologiją. Priimtas pranešimas užregistruojamas su incidentų valdymo programa, suteikiančia incidentui individualų identifikacinį numerį, lydinį jį per visą procesą iki incidento uždarymo.

2. Įvertinamas incidento pavojaus saugumui lygis, t.y. priskiriama saugumo kategorija. Įvertinant atsižvelgiama į:

a) atakos daromą destruktinį poveikį (ar tai tik komercinis *spam*, ar tai virusas, keičiantis bylų struktūras.);

b) pažeistos kompiuterinės sistemos svarbą (ar atakuojama tarnybinė stotis, kuri teikia paslaugą daugeliui klientų, ar periferinis tinklo įrenginys);

c) incidento plitimo mastą (kaip sparčiai incidentas plinta, ar incidentas vis dar tęsiasi). Nuo priskirtos kategorijos priklauso CERT reagavimo laikas. Aukščiausios kategorijos incidentas turėtų būti sprendžiamas ne eilės tvarka.

3. Toliau atliekami prevenciniai veiksmai. Jeigu incidentas vyksta tyrimo metu, nėra galimybės jo sustabdyti lokaliai ir yra pavojus kitiems vartotojams – blokuojamas incidento šaltinio IP adresas arba stengiamasi išardyti *botnet* tinklą ir pan. Jeigu incidentas pavojingas ir yra tolesnių pažeidimų rizika, rengiamas įspėjimas tinklo naudotojams ir kitoms CERT grupėms.

4. Po šių veiksmų CERT tarnybos personalas su specializuota technine bei programine įranga atlieka incidento turinio ir incidentą lydėjusios aplinkos analizę, statistinių duomenų rinkimą bei apsaugos priemonių kūrimą. Tai yra veiksmų (1.5 pav.) vykdymo ciklas:

a) Incidento analizė – pagrindinis ir daugiausiai laiko užimantis CERT veiksmas. Analizuojami po incidento likę artefaktai (angl. *log file*), patys incidentai (pavyzdžiui, kenksmingas programinis kodas), techninė ir (arba) programinė įranga, kurios aplinkoje įvyko incidentas. Kiekviena operacinė sistema (o ypač ta, kuri yra/veikia tarnybinėse stotyse) turi priemones, fiksuojančias sistemos darbo klaidas ir saugančias jas specialiuose (*log*) archyvuose. *Log file* nagrinėjimas dažniausiai tampa pagrindiniu analizės objektu, nes gali pasakyti, kokios konfigūracijos sistemoje ir kada įvykis buvo užfiksuotas, kokių procesų veikimas sistemoje sutriko ir kt. Tuo atveju, kai incidentas pats plinta kaip atskiras procesas tinkle (pavyzdžiui, kompiuterinis virusas), reikia jį tirti atskirai. Čia padeda virtualios, izoliuotos kompiuterio aplinkos sukūrimas, kurioje paleidus veikti virusą specialios programos stebi ir fiksuoja viruso sistemoje padarytus

pakeitimus. Kontrolinė suma gali parodyti buvusių pasikeitimus. Iš to sprendžiama apie padaromą žalą bei numatomi apsisaugojimo variantai.

1.5 pav. Saugumo incidento gyvavimo ciklas
Fig. 1.5. security incidents life cycle

b) Atlikus visapusišką incidento analizę, pereinama prie atsakingų už incidentą asmenų paieškos. Todėl nagrinėjamas incidento šaltinio IP adresas. Per vidines ir išorines (pavyzdžiui, tarptautinę „whois“ sistemą) duomenų bazes surandama, kas atsakingas už incidentą, jeigu reikia, incidento iniciatorius įspėjamas stabdyti incidentą arba, jeigu incidentas yra iš kitos šalies, informuojamas tame tinkle veikiantis CERT. Kita vertus, būtina aiškiai žinoti pranešėjo apie incidentą koordinatas, kad būtų galima gauti papildomai informacijos, jei analizei jos pritrūktų.

c) Jeigu incidentas toliau plinta į kitus tinklo įrenginius, reikia kuo greičiau sukurti apsaugos priemonės ir jas įdiegti, kad galima žala būtų minimali. Jeigu incidentas neplinta, tačiau yra padarytas destruktinis poveikis sistemoms, CERT tarnyba imasi veiksmų, kurdama atitinkamas rekomendacijas ar techninius įrankius, kurie galėtų atstatyti sistemą į pirminę būseną.

d) Toliau surinkta informacija gali būti perduota teisėsaugos institucijoms, jeigu pagal įstatymus už incidento sukėlimą yra numatyta administracinė ar baudžiamoji atsakomybė. Bet kuriuo atveju, incidentas yra statistiškai fiksuojamas, kad būtų nuolat stebimos bendrosios vienu ar kitu incidentų raidos tendencijos.

5. Jeigu iki šio momento atlikti veiksmai nedavė rezultatų – incidento priežastys neišaiškintos, plitimas nesustabdytas, neatstatyti sugriauti tinklo ar sistemos segmentai – incidento nagrinėjimas grąžinamas į analizės stadiją. Kitu atveju incidentas laikomas išspręstu ir yra atliekamas įrašas incidentų valdymo sistemoje apie tyrimų pabaigą.

Išdėstyti incidento apdorojimo ir tyrimo pagal CERT modelį etapai iš esmės yra reakcinio pobūdžio. Teigiama, kad CERT modelis turi neapsiriboti aktyviais incidentų tyrimų veiksmiais (West-Brown 2003). CERT modelyje siūloma įvedama incidentų prevencija, kuri įgyvendinama išankstinio perspėjimo sistemos (IPS) pagalba (1.4 ir 1.5 pav.). IPS tampa reikšminga priemone, nes yra skirta veiksams mažinantiems arba neutralizuojantiems incidento poveikį IT.

IPS pagrindą sudaro informacijos apie incidentą surinkimo sensoriai. Tai gali būti įsiskverbimo detektavimo sistemos (IDS), kurios pagal tipines programinio kodo signatūras atpažįsta veiksmus, būdingus įsibrovimui į IT. Arba „medaus puodynės“ (*honeypot*) pagrindu veikiantys agentai (programinio kodo intarpai) tinklo mazguose sekantys kompiuterinių virusų aktyvumą ir registruojantys iš kontrolierių jiems siunčiamas komandas (Provos 2007). Analizuojant IDS ir *honeypot* informaciją įvertinama rizika įvykti incidentui ir atitinkamai formuojamas perspėjimas IT valdytojams.

1.4. Tyrimai Lietuvoje

Lietuvos universitetuose formuojama praktika vykdant tyrimus kibernetinio saugumo srityje. Vilniaus Gedimino Technikos Universitete (VGTU) veikia Informacinių technologijų saugos mokslo laboratorija. Vadovaujant prof. A. Čeniui tyrimai apima kibernetinių atakų (kenksmingo kodo propagavimo, *botnet*, PAAA) detektavimą ir analizę. Taip pat atliekami apsaugos priemonių (IDS, *honeypot*) analizės ir jų tobulinimo darbai. Kauno technologijos universitetas tiesiogiai dirba su CERT modeliu, kuris yra praktiškai pritaikytas akademinio tinklo saugumo incidentų tyrimuose, o CERT modelis tobulinamas. Prof. A. Kackas (VGTU) vadovauja interneto tinklo patikimumo ir paslaugų kokybės ty-

rimams, prof. J. Skudutis (VGTU) darbo veikla susijusi su apsaugos nuo kibernetinių atakų priemonių analize ir IT sistemų išliekamumo tyrimais.

1.5. CERT modelio trūkumai

CERT modelio, kuris trumpai gali būti apibūdinamas kaip aptikimo-pašalinimo-atstatymo organizacinė sistema, naudojimas yra grynai reaktyvus, t. y. vyksta veiksmas pagal faktą. Iš to darytina išvada, kad CERT efektas yra trumpalaikis – sprendžiamas konkretus incidentas ir reaguojama į jo pasekmes. Dažnai incidento šaltinis nėra nustatomas, nes pagrindiniu CERT tikslu yra sustabdyti incidento plitimą ir atstatyti pažeistas IT ar teikiamas paslaugas. CERT išsprendus incidentą, kibernetinių atakų šaltinis(iai) gali atlikti pakartotinas atakas išnaudodamas kitus tinklo ar IT pažeidžiamumus. Pastebėtina, kad CERT nėra veiksmi priemonė sistemiškai spręsti interneto saugumo ir patikimumo uždavinio. Interneto patikimumo uždavinys yra labiau susijęs su tinklo sistemų ir procesų įvertinimu.

1.6. Interneto patikimumo prigimtis

Inžinerijoje patikimumo klausimas plačiai nagrinėjamas ir taikomas, kai sistemos bei mechanizmai projektuojami išlikti funkcionaliais nepalankių sąlygų aplinkoje (Smith 2005). Patikimumas susijęs su mechanizmo rezervo projektavimu, kurį siekiama sudaryti didesnę nei yra reikalinga veikti normaliomis sąlygomis. Tradicinėje inžinerijoje patikimumas yra medžiagos gebėjimas absorbuoti energiją esant spaudimui (arba įtempimui) ir vėliau ją atiduoti.

Modernioms sistemoms patikimumas reiškia gebėjimą atlaikyti gedimus ir pajėgumą pilnai atstatyti funkcionalumą. Bendrąja prasme (pavyzdžiui, biologijos moksle) tai yra sistemos gebėjimas išgyventi grėsmių akivaizdoje. Arba sistemos gebėjimas adaptuotis besikeičiančioms aplinkos sąlygoms (Wagner 2008). Įvykiai gali turėti įtakos sistemos darbui, bet patikima sistema turi sugebėti išlikti pajėgia veikti tam tikru priimtiniu lygiu ir gebėti laiko bėgyje pilnai atstatyti savo veiklą.

Interneto atveju, patikimumas vertintinas makro ir mikro lygiais (Hall 2011). Didelio junglumo tinkle vieno maršrutizatoriaus gedimas paprastai susijęs su ryšio netekimu vartotojams trumpam laikotarpiui (arba jis nejuntamas visiškai), kai duomenų srautai momentiška perskirstomi kitais maršrutais (mikro lygmuo). Makro lygmeniu didelio masto kibernetinės atakos, epideminis kenksmingo programinio kodo plitimas ar gamtos stichinės nelaimės gali sukelti gedimus eilėje tinklo grandžių, dėl ko interneto paslaugos sutrikimas juntamas didesniai vartotojų skaičiui ir ilgesnį laikotarpį. Todėl išskiriami sekantys interneto patikimumo požymiai pagal poveikį: tinklo gebėjimas akumuliuoti pa-

vienių elementų gedimus ir gebėti toliau teikti duomenų perdavimo paslaugas; tinklo gebėjimas atstatyti tinklo junglumą (duomenų perdavimo paslaugas) iki pirminio lygio per priimtina laiko tarpą po reikšmingo tinklo grandžių (potinklų) gedimo.

Interneto tinklo patikimumo metrika nėra galutinai parengta. Mokslo tirimuose darbuose nepakankamai apibyrėta interneto patikimumo charakteristika, priimtinas interneto paslaugos lygis. Interneto tarptinklinių sujungimų kompleksiskumas ir ribota informacija apie pilną interneto topologiją, sudaro sunkumus vertinant interneto patikimumą. Nėra prielaidų interneto patikimumą išreikšti skaitine verte. Praktiškai sudėtinga įvertinti kokią realią įtaką tinklui turės incidentas ar gedimų įvykis.

1.7. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

Internetas yra vienas labiausiai išvystytų IRT tinklų, kartu ir dažniausia pažeidžiamas dėl kibernetinių atakų ir tinklo infrastruktūros grandžių gedimų. CERT modelio vaidmuo siekiant saugumo incidentų valdymo Internetė įrodytas kitų autorių bei šio darbo rėmuose. CERT modelis leidžia operatyviai valdyti saugumo incidentus tinkle bei sudaro prielaidas internetui ir IT išlikti efektyviai veikiančiomis sistemomis.

CERT modelis būdamas efektyvus incidentų tyrimuose ir reagavimo metoduose, nesudaro reikiamų prielaidų bendram interneto tinklo saugumo ir patikimumo vertinimo klausimui spręsti. Kyla poreikis pasirinkti ir vystyti naujas, pro-aktyvias (prevencines) priemones, kurios sudarytų sąlygas mažinti interneto pažeidžiamumą ar neutralizuoti kibernetinių incidentų įtaką internetui.

Toliau formuluojamas uždavinys, suponuoją interneto saugumo analizės klausimą spręsti tyrinėjant pačią interneto tinklo infrastruktūrą. Didelio masto kibernetinės atakos bei pagrindinės interneto TCP/IP ir tinklų maršrutizacijos protokolai (BGP) protokolų saugumo problemos demonstruoja realias grėsmes interneto veiklos patikimumui. Iš to kyla darbo tikslas: tirti ir analizuoti stochastiškai sujungtų potinklų susiformavusį regiono ar valstybės interneto tinklą kaip bendrą sistemą, ir ieškoti būdų, kaip nustatyti ir stebėti tokios sistemos infrastruktūros vientisumo, veiklos nenutrūkstamumo bei patikimumo kokybės palai-kymo rodiklius.

Tikslui pasiekti reikia spręsti uždavinius:

1. Įvertinti interneto tinklo topologijos schemą bei sudaryti jos analizės modelius ir priemones.
2. Įvertinus topologiją, tolimesni tyrimus orientuoti į interneto tinklo junglumo analizę, siekiant identifikuoti kritinius tinklo elementus, kurių pažeidimai susiję su viso tinklo funkcionalumo praradimu.

3. Turint nustatytus kritinius interneto tinklo elementus, toliau sudaromas modelis jų stebėsenai, atliekami kibernetinių atakų simuliacijos eksperimentiniai bandymai.
4. Režiumuojant, tyrimais gauti rezultatai sudaro prielaidas formuluoti priemonės interneto tinklo infrastruktūros patikimui stiprinti, kurios savo ruožtu formuoja regiono interneto ateities reguliavimo ir vystymo gaires.

Interneto tinklo infrastruktūros topologijos tyrimai

Skyriuje analizuojamas iš stochastiškai sujungtų potinklų susiformavęs valstybės ar regiono interneto tinklas kaip bendra sistema, ir ieškoma būdų, kaip nustatyti tokios sistemos patikimumo, veiklos nenutrūkstamumo bei paslaugų kokybės palaikymo rodiklius. Analizuojant tinklo topologiją, pasiūlytas AS ir jų sujungimo linijų klasifikavimas bei parinkta naudoti grafų metriką su mazgų laipsniais ir jų pasiskirstymais. Taikyta metrikai regiono interneto tinklo infrastruktūrai atskleidė, kad regiono tinklas, vertinant AS ir jų sujungimus, yra neproporcingai segmentuotas, todėl egzistuoja pažeidžiamumai, kurie turi įtakos tinklo veiklos patikimumui.

Skyriaus tematika paskelbtas vienas autoriaus straipsnis (Kajackas, Rainys 2010).

2.1. Interneto tinklo specifiika

Elektroniniai ryšiai ir internetas vaidina ypatingai svarbų vaidmenį šių dienų visuomenės gyvenime. Gerai žinoma, kad internetas yra informacinės visuomenės pagrindas, Jungtinių Tautų Organizacija 2011 metais pripažinto teisę į prieigą prie interneto viena iš pamatinių žmogaus teisių.

Techniškai interneto pagrindą lemia TCP/IP protokolas, palaikantis paskirstytą (decentralizuotą) sąveikaujančių komunikacijų priemonių sistemą ir sudarantis galimybę perduoti bei priimti bet kokios prigimties ir rūšies elektroninę informaciją. Technologinės ir funkcinės interneto galimybės sudaro neribotas galimybes tinklo plėtrai, laisvą naujų mazgų ir potinklių prisijungimą. Šiuo metu veikia daug interneto prieigos ir paslaugų teikėjų (IPT), kurių skaičius nuolat auga. Jie kuria naujus lokalius potinklius ir naujas paslaugas, pritraukia naujų vartotojų.

Interneto plėtrai esminę įtaką daro naujos technologinės galimybės, naujos paslaugos, nuolat didėjantis vartotojų skaičius, augantys vartotojų sukuriamų duomenų srautai. Kartu su interneto plėtra auga ir jo atsakomybė, reikalavimai patikimumui, gyvybingumui bei duomenų saugumui. Todėl šiuolaikinis internetas yra nuolatinių mokslinių tyrimų objektas.

Analizuojant atskirų regionų ir valstybių interneto tinklų evoliuciją, pastebima bendra tendencija – kiekvienas IPT kuria savo tinklą. Dėl to interneto tinklų infrastruktūra susiformuoja stochastiškai, be sistemingo regiono tinklo projekto, be išsamios duomenų srautų bei pralaidumų analizės. Galima sakyti, kad regiono interneto tinklą sudaro atsitiktinai sujungti potinkliai. Todėl nėra žinoma ar pakankami tinklo mazgų bei jungiamųjų kanalų pralaidumai, ar tie pralaidumai bus pakankami esant atskirų mazgų bei kanalų gedimams, ar jie bus pakankami atsitiktinai padidėjus duomenų srautams ar kibernetinių atakų atvejais.

Disertacijos apimtyje vykdoma tiriamojo darbo kryptis – tirti ir analizuoti stochastiškai sujungtų potinklių susiformavusį regiono ar valstybės interneto tinklą kaip bendrą sistemą, ir ieškoti būdų, kaip nustatyti tokios sistemos patikimumo, veiklos nenutrūkstamumo bei paslaugų kokybės palaikymo rodiklius. Siekiant įvardintų tikslų šiame skyriuje sprendžiami uždaviniai: susiformavusios interneto tinklo topologinės schemos sudarymas, modelių ir analizės priemonių parinkimas.

Šiame skyriuje bus parodyta, kad interneto veiklos patikimumas, kitaip tariant tinklo išliekamumas, priklauso nuo tinklo topologijos. Tuo tarpu topologija yra tiesiogiai veikiama kibernetinių atakų, gedimų tinklo infrastruktūroje ir t. t. Detalus topologijos įvertinimas gali padėti nustatyti silpnąsias tinklo vietas ir suprasti kaip pasiekti didesnę interneto patikimumą.

2.2. Interneto tinklo modelis

Interneto tinklo analizei atlikti, kaip išeities praktika remtasi egzistuojančių tinklų vertinimo darbais: elektros tinklai (Stubna 2002, Watts 1998), socialiniai ryšiai (Barabási 1999, Ball 2002) ar mitybos grandinės (Montoya 2002). Šių sistemų sąryšių mechanizmo supratimas padeda geriau suvokti ir analizuoti interneto tinklą. Tačiau bendraja prasme interneto tinklo modeliavimas, jo topo-

logijos ir išliekamumo vertinimas, yra besiformuojanti mokslinė sritis (Chen 2002, Dimitropoulos 2006, Barabasi 2002, Magoni 2002, Medina 2000).

Vertinant literatūrą (Erdos 1960) apie atsitiktinių grafų charakteristikas, prie tokių priskirtinas ir internetas. Tokių grafų analitinis nagrinėjimas įdomus subgrafų junglumo analize bendrame grafe. Tai yra paralelė į interneto tinklą, kuris taip pat yra tinklas iš sujungtų lokalių potinklų. Teigiama, kad N mazgų grafe bendras tikėtinas briaunų skaičius yra lygus $pN(N-1)/2$ (Erdos 1960). Kitas Erdos atradimas teigia, kad grafe su dideliu skaičiumi mazgų, briaunų prijungtų prie mazgo skaičiaus pasiskirstymas atitinka Puasono skirstinį. Tačiau ši prielaida daugeliui realių interneto potinklų topologijų pasirodė negaliojanti (Barabasi 1999).

Apibendrinto tinklo modelio pateikime, 2.1 pav., tinklo junglumas kinta nuo tinklelio formos (2.1 a) iki visiškai atsitiktinio (2.1 c). Tarp šių ekstremumų internetas atitinka tarpinį variantą (2.1 c). Čia p žymi tikimybę, kad kiekvienos briaunos galas per viršūnę gali turėti sujungimą su kita briauna (Albert 2002).

2.1 pav. Bendrinis tinklo junglumo modelis: a) tinklelio formos; b) tarpinis; c) atsitiktinis (Albert 2002)

Fig. 2.1. Simple network connectivity model: a) grid; b) interim; c) random

Nors internetas greitai plečiasi, prijungiami nauji mazgai ir potinkliai, tinklo modelis išlieka nepakitęs – tarp dviejų mazgų išlaikomas sąlyginai nedidelis atstumas (Albert 2002). Distancija tarp dviejų mazgų, tai mažiausias skaičius briaunų nusakančių trumpiausią atstumą tarp šių mazgų.

Interneto tinklo infrastruktūra kaip grafas nagrinėta eilėje darbų (Dimitropoulos 2006, Chang 2004, Dohoon 2008, Dolev 2006). Egzistuoja dvejopa interneto tinklo pateikimo praktika:

a) kai tinklo mazgus atitinka maršrutizatoriai, o linijas fiziniai sujungimai tarp jų;

b) kai tinklo mazgus atitinka interneto autonominės sistemos (šios vidiniaje potinklyje gali turėti ir daugiau nei vieną maršrutizatorių ar komutatorių), o linijas egzistuojantys sujungimai tarp jų.

Kadangi pastaruoju metu visuotinė kompiuterizacija ir interneto kompleksiskumas ženkliai išaugo, išsiplėtusiam tinklui dažniau pritaikomas modelis – interneto atvaizdavimas kaip tinklo, sudaryto iš tankiai tarpusavyje sujungtų autonominių sistemų (AS). Interneto aplinkoje AS yra interneto protokolo (IP) maršrutizavimo adresų rinkinys, valdomas vieno ar kelių tinklo operatorių, skirtas standartizuotam ir viešam duomenų maršrutizavimui tinkle (Hawkinson 1996).

Teoriniuose darbuose (Gao 2000, Dimitropoulos 2006, Oliveira 2010) tinklo mazgais laikomos AS. Taip yra todėl, kad realiame tinkle ryšiams tarp atskirų potinklų valdyti naudojamas tinklų maršrutizacijos protokolas (BGP) protokolas (Rekhter 2006), kuris dinamiškoms sujungimų lentelėms sudarinėti panaudoja AS su tik jam priskirtu unikaliu numeriu. Iš to seka, kad AS vaidina pagrindinį vaidmenį duomenų srautų maršrutizavimui interneto tinkle. Realioje AS turi būti bent vienas mazgas, atliekantis tarp tinklinius sujungimus.

2.2.1. Topologija kaip multigrafas

Įvertinus, kad iš atskirų AS sudaromas abstraktus interneto tinklo modelis yra paplitęs mokslinių tyrimų objektas, šiuo modeliu kaip pamatiniu elementu bus pasiremta siekiant šio darbo tikslų. Interneto tinklo fragmento, sudaryto iš tarpusavyje sujungtų AS, modelis supaprastintai atvaizduotas 2.2 paveiksle.

Tolesnei analizei kiekviena AS_i formaliai aprašoma grafu $G_i(V, U)$, sudarytu iš viršūnių V ir briaunų U aibių. Čia viršūnės atitinka realių AS mazgus, briaunos – atitinka jungiamąsias ryšių linijas. Pagal tinklo struktūrą nustatomi pradiniai nagrinėjamo tinklo ar AS_i duomenys: N_i – mazgų skaičius, M_i – briaunų skaičius.

Sudėtingą grafą galima išskaidyti į paprastesnių grafų aibę. Paprasčiausia AS, kurioje yra vienas mazgas, atvaizduojamas grafu su viena viršūne. Atvirkščiai, apjungiant keletą AS su jas apibūdinančiais grafais gaunama sudėtingesnė AS ir sudėtingesnis grafas. Tokiu būdu apibendrinant viso regioninio tinklo infrastruktūrą gali būti pateikiama kaip multigrafas G_{net} arba kaip grafų $\{G_i(V, U)\}_{i=1}^I$ visuma.

Su grafais taip pat gali būti atliekami veiksmai kaip viršūnių šalinimas ar briaunos nutraukimas, kurie naudingi tinklo junglumo analizei. Taip pat galima analizuoti grafą nagrinėjant trumpiausią, greičiausią ir t. t. maršrutus (2.2 pav.).

2.2 pav. Interneto autonominių sistemų tinklo topologijos fragmentas
Fig. 2.2. Internet autonomous systems network topology fragment

Bendrasis interneto, kaip tinklo, sudaryto iš įvairaus sudėtingumo AS, modelis, yra patogus tuo, kad analizuojant makro lygmens charakteristikas dažnai nereikia nagrinėti pilnas visų AS tipologines schemas, o galima apsiriboti tam tikrais išoriniais AS parametrais. Kaip rodo susijusių (Dolev 2006, Dimitropoulos 2009) darbų praktika nagrinėjant tinklo veiklos patikimumą, galimas fragmentiškas tam tikrų interneto AS nagrinėjimas, išskiriant struktūrinius vienetus apribotus geografiškai, ar priskiriamus konkrečiai organizacijai.

2.2.2. Topologijos analizės principai

Tiriama interneto tinklo infrastruktūra vertinant visus interneto potinklius, apribotus IP adresų ruožu, priskirtu Lietuvos valstybėje veikiantiems subjektams. Lietuvoje interneto prieigą teikia apie 110 gana skirtingo dydžio IPT. Dalis IPT duomenų maršrutizavimą tinkle organizuoja formuojant AS, tuo tarpu kita dalis, dažniausiai tai nedideli IPT, neturi AS. Tokie IPT jungiasi prie stambesnių IPT viena ryšio linija pirkdami ryšio paslaugą iš stambesnių IPT. Tokie IPT, turėdami tik po vieną (kartais kelias) jungtį į interneto tinklą, įtakos bendram interneto tinklo infrastruktūros modelio junglumui neturi (Dolev 2006, Dimitropoulos 2009), nes tokie IPT neturi savybės tranzitinio duomenų perdavimo.

Tobulinant ir patikslinant bendrą regiono tinklo modelį, jį būtina patikslinti atspindint esamą interneto hierarchinę struktūrą, išryškinant atskirų posistemų svarbą bei įtaką. Interneto hierarchinė struktūra dažnai apibūdinama trijų tipų tinklo mazgais (SUNA 2004, Subramanian 2002):

Tranzitinė AS. Turi daugiau nei vieną jungtį su kitomis AS ir didžiąja dalimi yra naudojama kaip tranzitinis mazgas duomenų srautams tarp kitų AS. Dauguma didžiųjų IPT yra Tranzitinės AS. Tranzitinis duomenų srautų perdavimas yra tokių AS verslo pagrindas. Šio tipo AS akumuliuoja didžiąją dalį interneto srauto, todėl jos reikšmė tinklo topologijoje yra išskirtinė.

Vartotojiška AS. Turi jungtį tik su viena kita AS. Žiūrint iš maršrutizavimo perspektyvos, Vartotojiška AS išplečia kitos AS, iš kurios perka tranzitinio duomenų perdavimo paslaugą, tinklą. Vartotojiška AS nepersiunčia kitų AS duomenų srautų ir jai reikalinga Tranzitinės AS išėjimams į tarptautinį internetą. Praktikoje, lokalūs tinklai turintys vieną ryšio liniją su interneto tinklu, AS neformuoja ir jų IP adresacija Internetu siejama su motinine AS, t. y. Tranzitine AS. Mūsų nagrinėjamu atveju tokio tipo potinklius atitiks nedideli IPT.

Kartotinė AS. Turi daugiau nei vieną jungtį su kitomis AS. Tokios AS bruožas yra padidintas maršrutizavimo patikimumas kai panaudojama sujungimų dubliavimo technika. Taip pat gali būti sudubliuota pati AS. Dažnai naudojama didelėse organizacijose su kartotinėmis interneto jungtimis. Tokios organizacijos nebūtinai yra IPT ir jos neparduoda duomenų srauto kitoms AS. Tačiau tokioms organizacijoms, kaip bankai ar žiniasklaida, reikalinga sava ryšių maršrutizavimo prioretizacija bei išskirtinis ryšių patikimumas.

Paskirstytoji AS. Tokios AS duomenų bazės (serveriai) paskirstytos skirtingose regiono tinklo topologijos vietose. Tai atliekama siekiant geresnio AS pasiekiamumo ir patikimumo užtikrinimo. Tokia AS konfigūracija yra specifinis sprendimas ir taikomas, pavyzdžiui, domenų vardų sistemų (DNS) realizavime.

Vertinant bendrą regiono interneto tinklą su potinkliais kaip bendrą sistemą, egzistuoja jungtys su tarptautinio interneto ryšio tiekėjais. Tokios jungtys ir tokių jungčių AS yra reikšmingi regiono interneto tinklo junglumui. Šie ryšiai užtikrina globalaus interneto tinklo pasiekiamumą vidiniams šalies interneto vartotojams. Atsižvelgiant į tai, įvedama nauja, **Tier-1 AS**. Analizuojant realų tinklą, **Tier-1 AS** grupei priskiriamos tos AS, kurios yra sujungtos su kitų šalių tinklais. Paprastai tokie sujungimai yra susiję su taip vadinamais **Tier-1** lygio AS (Norton 2002). **Tier-1** tai yra tinklas kuriuo galima pasiekti bet kurį kitą tinklą Internetu be papildomo tranzitinio IP duomenų srauto pirkimo. Tarptautiniai **Tier-1** valdo pagrindinius globalaus interneto duomenų srautus ir interneto hierarchijoje neturi kitų jungčių su aukštesniu lygiu (2.3 pav.). Visos kitos Tranzitinės AS sąlyginai priskiriamos prie **Tier-2** lygio, o Vartotojiškos AS – **Tier-3** (Oliveira 2010).

Interneto tinklo modelio aprašymas nebus pilnas be ryšių tarp AS identifikavimo. Iškiriame du tarptinklinių sujungimų tipus svarbius AS topologijos aprašymui:

Lygiaverčių mainų tipo ryšys žymi sutartinį duomenų maršrutizavimą tarp panašių AS tinklų, tikslu keistis duomenų srautais tik tarp tų tinklų vartotojų (Norton 2002). Tai dažnai naudojamas sujungimo būdas, tačiau lygiaverčių mai-

nų tipo ryšiai turi savo apribojimus, nes skirti lygiaverčiam srauto apsikeitimui tarp dviejų konkrečių AS vartotojų. Lygiaverčių mainų ryšiai sutartiniai ir neapmokestinami. Šis apribojimas turi daugiau įtakos AS topologijai valstybės lygyje. *Tier-1* lygyje lygiaverčių mainų jungtis vaidina kitą reikšmę, didieji tarptautiniai *Tier-1* AS formuoja lygiavertį srautų apsikeitimą per lygiaverčių mainų jungtis. Tai lyg sudaro stuburinį globalaus interneto tinklą (Oliveira 2010).

Lygiaverčių mainų jungtis dar klasifikuojamos į dedikuotas ir viešąsias. Dedikuotiems lygiaverčių mainų ryšiams sudaryti skiriamos atskiros linijos tarp AS, tame tarpe ir fizinės jungtys. Tai susiję su operatyvesniu tokių linijų administravimu, tačiau ekonomiškai yra brangesnis būdas nei vieša lygiaverčių mainų jungtis. Vieša lygiaverčių mainų jungtis realizuojama per lygiaverčių mainų apsikeitimo mazgus (LMMM). Tai fizinė infrastruktūra valdoma nepriklausomo operatoriaus, kurioje įvyksta fizinė AS (LMMM tinklo dalyvių) jungtis. 2.3 paveiksle realizuota LMMM, kurioje AS jungiasi per fizinę infrastruktūrą. AS pačios sprendžia su kuria kita AS sudaryti lygiaverčių mainų ryšį.

2.3 pav. Lygiaverčių mainų mazgo struktūra

Fig. 2.3. Structure of internet exchange node

IPT lygiaverčių mainų jungčių sudarymui nenaudoja griežtų taisyklių. Lygiaverčių mainų sąryšiui tarp AS turi įtakos AS mazgo dydis, įeinančio/išeinančio duomenų srautų dydžiai, perėjimo mazgų (jungimo žingsnių) skaičius. Dėl šių priežasčių todėl lygiaverčių mainų tipo ryšių tinklas yra atsitiktinis.

Šiuolaikiniame internete didžiąją dalį duomenų srautų sukuria paieškos sistemų (*google*, *bing*), turinio (*youtube*) ir socialiniai tinklai (*facebook*). Šie tinklai išimtinai sudaro lygiaverčių mainų jungtis su IPT (Oliveira 2010).

Tranzitinio tipo ryšys, tai dedikuotos linijos, kai priimančias duomenis AS užtikrina duomenų persiuntimą link gavėjo. Didžioji dalis duomenų interneto tinkle persiunčiama Tranzitinės tipo ryšiais.

2.4 pav. Hierarchinė interneto topologijos schema

Fig. 2.4. Hierarchical Internet topology layout

Internete suminė AS ir sujungimo linijų klasifikacija formuoja hierarchinę tinklo struktūrą, kuri schematiškai išdėstyta 2.4 pav.

2.2.3. Autonominių sistemų metrikos

Pradinę interneto topologinės struktūros analizę atliksime pasinaudojant grafų metrikomis: mazgo laipsnis, grupavimas, kaimynystės funkcija ir kita.

Mazgo laipsnis. Grafų teorijoje, grafo viršūnės laipsnis yra skaičius briaunų jungiančių viršūnę (Harju 2007, Norton 2002). Viršūnės laipsnis v žymimas $\deg(v)$. Grafo $G_i(V_i^k, U_i^l)$ k -osios viršūnės V_i^k laipsnis – $\deg(V_i^k)$ yra lygus i -osios AS ryšio linijų su kitomis AS skaičiui k . Bendru atveju $k=1, \dots, K$.

Siekiant charakterizuojant ir atskirti tuos mazgus, kurie yra sujungti su kitų šalių tinklais sąvoka mazgo laipsnis skiriama į dvi dalis pagal požymius: šalies vidaus tarptinkliniams sujungimams $\deg_{in}(V_i^k)$ ir išorės, t. y. *Tier-1* tipo, $\deg_{out}(V_i^k)$.

Taikant AS metriką regioniniam interneto tinklui, įvedama koncepcija, kad Tier-1 AS, kurios valdo sujungimus su aukštesnio lygio, t. y. tarptautinio interneto ryšio kanalais, yra atsakingos už regionų jungiamumą. Atitinkamai Tranzitinės AS, valdančios sujungimus žemys su vartotojais ir vartotojiškomis AS yra svarbios regiono vidiniam junglumui. Tokia koncepcija suponuoja hierarchinę regioninio tinklo struktūrą bendrame interneto tinkle.

Mazgo laipsnio skirstinys. Tai yra mazgo laipsnių tikimybinis pasiskirstymas tinkle (Norton 2002). Mazgo laipsnio pasiskirstymas $P(k)$ tinkle apibūdinamas kaip mazgų tinkle santykis su laipsniu k . Jeigu turime tinkle bendrą skaičių mazgų n ir iš jų n_k turi laipsnį k , apibūdiname išraiška:

$$P(k) = n_k/n. \quad (2.1)$$

Daugeliui evoliucionuojančių tinklų nuspėti $P(k)$ formą sunku, kol nėra surinkama ir ištiriama detali informacija apie tinklo topologiją. Realiesiems tinklams $P(k)$ forma gali varijuoti plačiose ribose. $P(k)$ analizė leidžia turi atskleisti interneto tinklo infrastruktūros savybes, svarbias tinklo patikimumo tyrimams.

Grupavimas. Grupavimo technikai pagrindus davė socialinių ryšių tinklai. Reprezentatyvi grupė draugų laikoma sugrupuota kai kiekvienas narys pažysta kiekvieną kitą narį. Grupavimo požymio lygiui įvertinti naudojamas grupavimo koeficientas C (Strogatz 1998).

Jeigu pasirinktume i -ąją grafo viršūnę ir visas tiesiogines viršūnes jos kaimynės k_i , tai šių viršūnių sujungimų tinklas gali turėti maksimalų briaunų skaičių lygų $k_i(k_i-1)/2$. Jeigu bendras grafo briaunų tarp viršūnių k_i skaičius yra E_i , i -osios viršūnės grupavimo koeficientas bus C_i .

$$C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i-1)}. \quad (2.2)$$

Bendrasis tinklo grupavimo koeficientas būtų visų jo viršūnių C_i vidurkis. Atsitiktinai sujungtų grafų teorijoje laikoma, kad $C_i = p$. Jeigu grafe yra N viršūnių, p yra tikimybė, kad kiekviena pora viršūnių bus sujungta. Realiose tinkluose C_i yra didesnis esant tam pačiam skaičiui briaunų ir viršūnių (Albert 2002).

Vertinant tinklo patikimumo aspektu, aukštas C_i yra teigiama tinklo topologijos junglumo savybė. Kuo didesnė C_i , tuo didesnė tikimybė, kad kaimyniniai mazgai galės greitai vienas kitą pasiekti, nors tinkle nebūtinai tokio sujungimo distancija bus trumpa.

Gretimumo funkcija. Grafe mazgo gretimumą sudaro mazgų, prijungtų prie šio mazgo per tam tikrą distanciją, aibė. Tai yra įvertinama skaičiumi žingsnių tarp mazgo-šaltinio ir jo kaimynų (Norton 2002). Mazgo gretimumas charakterizuojamas gretimumo (kaimynystės) funkcija $N(h)$. Grafo $G=(V, U)$ gretimumo funkcija yra skaičius sugrupuotų mazgų (internetu topologijoje AS) pasiekiamų atstumu h (Albert 2002).

$$N(h) = \sum_{u \in V} N(u, h). \quad (2.3)$$

Atstumo h pasirinkimas tiesiogiai įtakoja funkcijos $N(h)$ rezultatus. Viena ar keletu linijų sujungta AS per $N(h)$ apibūdins kiekį tiesiogiai pasiekiamų mazgų. Arba, AS pasiekiamą tam tikrame regione (pavyzdžiui, mieste) apibūdins geografinį padengiamumą. $N(h)$ yra patogi ir naudinga sudarant topologinius tinklų žemėlapius (vizualizacija), tačiau nėra reikšminga vertinant tinklo infrastruktūros patikimumą.

Kituose darbuose (Barabási 1999) artimas $N(h)$ reiškinyms dar vadinamas **tinklo diametru**. Tinklo diametras $L(p)$ tai vidutinis skaičius žingsnių reikalingų nueiti kelią iš vieno mazgo iki kito. Realūs interneto tinklai ir potinkliai turi aukštą $L(p)$, todėl paprastai reikalingas nemažas skaičius žingsnių iš vieno mazgo pasiekti kitą, kuris nėra pirmojo kaimynas.

2.3. Lietuvos interneto tinklo analizė

Skirstant tinklo dedamąsias į hierarchinę struktūrą ir formuojant tinklo topologiją, surinkti reikalingi išeitiniai duomenys apie kiekvieną IPT, apie jo tinklą apibūdinantį grafą $G_i(V, U)$, nurodant N_i – mazgus, M_i – linijas bei įvertinant jų charakteristikas. Taip pat reikia įvertinti realias tarptinklinių sujungimų organizavimo taisyklės paremtas BGP maršrutizavimo lentelėmis.

Analizuojant Lietuvos regiono interneto tinklo infrastruktūrą, remtasi techniniais duomenimis surinktais tiesiogiai iš IPT infrastruktūros. Taip pat kaip išeitiniai duomenys buvo surinkti iš tarptautinių, viešai prieinamų, globalaus interneto topologijos duomenų bazių (RIPE-RIS ir *traceroute* tinklo komandų rezultatai).

Šios srities darbuose (Oliveira 2010, Wu 2007) nustatyta, kad interneto topologijos duomenys nėra absoliučiai tikslūs kaip buvo vertinta anksčiau. AS lygio topologija, pagal duomenis surinktus BGP ir *traceroute* pagrindu, turi reikšmingą paklaidą. Topologijos sudarymas BGP maršrutizavimo lentelių duomenų pagrindu praktikoje gali neįvertinti iki 40 % linijų, pagrinde lygiaverčių mainų tipo (Oliveira 2010). Atitinkamai tiriamųjų darbų, kurie globalaus interneto analizei naudoja BGP ir *traceroute* duomenų bazes, patikimumas yra abejotinas. Siekiant topologijos duomenų kokybės, pasirinkta šio darbo tyrimuose naudoti tiesioginės IPT apklausos duomenimis. Viešosiomis BGP duomenų bazėmis (CAIDA, RIPE) naudotasi tik tais atvejais kai IPT per apklausas duomenų nepateikė arba tuos duomenis buvo siekiama patikrinti.

Kitų autorių tyrimuose (Oliveira 2007) pastebėta, kad teoriniai globalaus interneto tinklo topologijos vertinimai prasilenkia su empirinių tyrimų rezultatais. Tai susiję su interneto kompleksiskumu. Apie 37 tūkst. sujungtų AS ir apie 350 tūkst. IP adresacijos blokų tinklas yra įvairialypis pagal savo technines charakte-

ristikas (Hall 2011), todėl ne visada tos pačios taisyklės galioja skirtingiems interneto potinklams. Dėl to interneto tinklo, apriboto regiono perimetru išreikštu per regionui priklausančių IP adresacijos ruožą, tyrimo privalumas yra patikimesi rezultatai.

Tyrimu identifikuota 37 IPT (iš 64 IPT apie kuriuos surinkti tikslūs duomenys), kurie savo duomenų perdavimą organizavo naudojant AS. Likusieji IPT priskirti Vartotojiškos AS.

Atlikus AS klasifikaciją nustatyta, kad didžioji dalis Lietuvos interneto tinklo topologijoje yra Vartotojiško tipo AS (81 %), kai tuo tarpu Tranzitinių AS yra tik 12 (19 %) (lentelė 2.1). Nedidelis skaičius Tranzitinio tipo AS gali būti paaiškinamas vidiniais IPT ekonominiais ir tinklo organizavimo niuansais. Interneto patikimumo aspektu nedidelis skaičius Tranzitinių AS gali nulemti, kad AS pažeidimai, pavyzdžiui kryptingos paskirstytosios atsisakymo aptarnauti atakos (PAAA) metu, ženkliai sutrikdys Lietuvos vidinio interneto tinklo veiklą. Objektiviai vertinant, 12-os Tranzitinių AS skaičius yra nedidelis, kad egzistuočių reali tikimybė jog kibernetinių atakų pasekoje dalis arba visos AS bus paveiktos taip, kad Lietuvos interneto tinklas (kaip multigrafas) nebebus jungtinis. Tranzitinės tipo AS buvo nustatyti lyginant tyrimo metu surinktus duomenis tiesiogiai apklausiant IPT su tarptautine RIPE duomenų baze-registru ir joje aprašytais BGP taisyklėmis (maršrutizavimo lentelės).

11 identifikuotų *Tier-1* tipo AS, taip pat yra ribotas resursas užtikrinti globalaus interneto pateikiamumą Lietuvos vartotojams, tačiau jį dar reikia įvertinti linijų pralaidos aspektu.

2.1 lentelė. AS pasiskirstymas pagal tipus

Table 2.1. AS types distribution

AS tipas	Kiekis	Procentai, %
Vartotojiška	52 (tame tarpe 4 Kartotinės AS)	81
Tranzitinė	12 (tame tarpe 11 <i>Tier-1</i> AS)	19

Ryšių tipų klasifikacija (2.2 lentelė) parodė, kad Lietuvos interneto infrastruktūroje vyrauja lygiaverčių mainų tipo sąryšiai tarp AS (76 %). Tačiau reikalinga įvertinti tai, kad internete didžioji dalis duomenų perdavimo vyksta tranzitinio tipo ryšiais, kurie Lietuvos interneto topologijoje tesudaro 24 % tinklo infrastruktūros. Nagrinėjant tinklo patikimumo aspektu, yra siektina, kad tranzitinio tipo ryšių dalis būtų dominuojanti. Taip pat pagal savybes tranzitinės jungtys yra universalesnės ir turi mažiau apribojimų srauto perdavimui.

Aprašytą hierarchinę tinklo struktūrą tikslinga papildyti įvertinant AS svarbos ar reikšmingumo kriterijų, aukščiausią lygį priskiriant toms AS, kurios tiesiogiai yra sujungtos su kitų šalių tinklais.

Regioninio tinklo AS topologijoje ryšiai su tarptautiniais (*Tier-1* tipo) AS vaidina svarbų vaidmenį, todėl jų vertinimas atskirai nuo vidaus regiono sujungimų yra prasmingas. 2.3 lentelėje pateikiame mazgų laipsnių pasiskirstymą vidiniams $\deg_{in}(V_i^k)$ tiek išoriniams $\deg_{out}(V_i^k)$ Tranzitinės tipo sujungimams. Analogiškai galima pateikti duomenis ir Lygiaverčių mainų tipo sujungimams.

2.2 lentelė. Ryšių tipų pasiskirstymas

Table 2.2. Distribution of connections types

Sujungimo tipas	Kiekis	Procentai, %
Lygiaverčių mainų	373	76
Tranzitinės	117	24

Disponuojant realiais duomenimis apie mazgų laipsnius (tiek vidiniams tiek išoriniams sujungimams), apskaičiavome $P(k)$ tranzitinėms ir lygiaverčių mainų sujungimų tipams (2.5 pav.).

2.3 lentelė. Mazgų laipsniai pagal Tranzitinio tipo ryšius

Table 2.3. Node degree for Transit type connections

AS numeris	$\deg_{in}(V_i^k)$	$\deg_{out}(V_i^k)$
AS1	44	5
AS2	10	2
AS3	25	2
...	...	...
AS _i	K _{in}	K _{out}

Analizuojant mazgų laipsnių pasiskirstymo (2.5 pav.) galima daryti išvadas, kad Lietuvos interneto tinklo AS topologijoje yra nedidelis skaičius mazgų, turinčių pakankamai didelį kiekį Tranzitinės tipo sujungimų. Tik 1 mazgas turi 47 Tranzitinės tipo sujungimus, kai tuo tarpu didžioji dalis mazgų turi tik 1 $P(k)=0,48$ ar 2 $P(k)=0,28$ sujungimus. Tinklo patikimumo aspektu, vienas mazgas turi didelę įtaką bendrai tinklo topologijai, kai tuo tarpu didžioji dalis mazgų (AS) turi pasikliauti 1-2 ryšių veiklos patikimumu. Lygiaverčių mainų tipo mazgo laipsnių pasiskirstymas yra tolygesnis negu Tranzitinės tipo jungčių.

2.5 pav. Mazgo laipsnių pasiskirstymo pagal ryšių tipus diagramos: a) Tranzitinės; b) lygiaverčių mainų; c) *Tier-1* AS

Fig. 2.5. Nodes degree distribution for types of connections: a) Transit; b) Peering; c) connecting *Tier-1* AS

Vykdamas tinklo analizę, reikia atkreipti dėmesį į tai, kad AS topologijos yra kintamos, dinamiškos (Zhang 2005, Hawkinson 1996). Atsiranda naujos AS ir nauji ryšiai tarp jų. Todėl AS topologijai apibūdinti naudojami duomenys turi būti nuolat atnaujinami. Idealiu atveju visi atnaujinimai turėtų būti fiksuojami realiu laiku.

Grupavimo koeficientas apskaičiuotas Lietuvos interneto tinklui yra $C_{LT}=0,23$. Atskirai vertinant tranzitinio tipo sujungimų tinklą $C_{transit}=0,05$, o lygiaverčių mainų jungčių atveju $C_{peering}=0,17$. Pilnai jungtinio grafo $C_i=1$, todėl apskaičiuotas C_{LT} rodo, kad junglumas tinkle yra žemas, o mažiausia išraiška yra $C_{transit}$. Tinklo vientisumas bus geriau užtikrintas, jeigu tinklo grupavimo koeficientas bus kuo aukštesnis.

2.4. Antrojo skyriaus išvados

Regiono interneto tinklas, jo topologijos savybių tyrimui, atvaizduojamas multigrafu, kurio viršūnės yra AS, o briaunos – ryšio jungtys.

1. Interneto topologinės struktūros patikimumo analizei geriausiai tinka ryšių grafų metodai, išskiriant mazgų laipsnius, mazgų laipsnių pasiskirstymą ir grupavimą.

2. Regiono interneto tinklo analizei sudarytas hierarchinis tinklo modelis, išskiriant tinklui būdingus AS ir jungčių tipus. Išskiriamos AS: Vartotojiška AS, Tranzitinė AS, Kartotinė AS, Kartotinė AS ir *Tier-1* AS. Skiriami jungčių tipai: Lygiaverčių mainų ryšiai ir Tranzitiniai sujungimai.

3. Atlikus Lietuvos interneto tinklo topologijos analizę nustatyta:

- Didžiąją dalį topologijos užima Vartotojiško tipo AS (81 %);
- Tranzitinio tipo AS sudaro tik 19 % tinklo infrastruktūros, o *Tier-1* AS yra tik 11.

4. Pagal sudarytą metriką, mazgo laipsnių pasiskirstymą, Lietuvos interneto tinklo topologijoje:

- yra tik vienas mazgas (AS) valdantis 47 tranzitinių jungčių;
- 76 % mazgų valdo tik 1-2 tranzitines jungtis su kitomis AS;
- mazgo laipsnių pasiskirstymas mazguose pagal lygiaverčių mainų ryšius yra tolygus ir dominuojantis lyginant su kitais ryšių tipais.

Kritinių interneto infrastruktūros komponentų nustatymas

Skyriuje tinklo topologijos analizės pagrindu nagrinėjama fundamentali interneto savybė – tinklo junglumas. Sudaryta metrika, kuri leidžia nustatyti kritinius interneto infrastruktūros elementus: kritinius ir η -kritinius mazgus bei kritines ir κ -kritines linijas. Suformuluotas kritinių tinklo elementų stebėsenos modelis, aprašytas stebėsenos realizavimo algoritmas.

Skyriaus tematika paskelbtas vienas autorių straipsnis (Kajackas, Rainys 2011).

3.1. Problemos formulavimas

Dėl didelio spektro IT sistemų, skirtingų taikomųjų programų ir jų konfigūracijų, egzistuoja didelė tikimybė pažeidžiamumus išnaudoti kibernetinėms atakoms realizuoti. Kibernetinės atakos klasifikuojamos pagal plitimo pobūdį, greitį, įtaką IT ir pan. (Paulauskas 2006). Kai kurios iš atakų turi įtakos interneto tinklo (ar jo dalies) veiklos stabilumui, nes pažeidžia svarbias interneto veiklai sistemas. Kadangi tokių atakų skaičius auga, tai susiję su normalios interneto tinklo veiklos pakitimais. Dažnai tokių atakų taikiniais yra labiausiai pažeidžiami tinklo infrastruktūros elementai. Darbe (Knight 2009) konstatuojama, kad tinklo

plėtra turi adaptuotis prie situacijos, o tinklo elementai būti pritaikyti ne tik su projektuotiems duomenų srautams, bet ir kibernetinių atakų įtakai.

Įprasta, kad duomenų perdavimo sistemų paslaugos kokybė vertinama pagal prarastus paketus, duomenų perdavimo spartą ir pan. Tačiau, reikėtų vertinti ir tinklo funkcinį patikimumą, kaip tam tikrą kokybinę paslaugos išraišką. Pagal 1 skyriuje pateikiamas saugumo incidentų įtakos vertinimus, interneto vartotojai, nuolat susidurdami su tinklais plintančiu kenksmingu programiniu kodu, nepažeidžiamais elektroninio pašto laiškais (spam) ir kibernetinėmis atakomis, negauna pilnavertės paslaugos. Pavyzdžiui, nepakankamai apsaugotas tinklas gali būti pažeistas PAAA atakos ir vartotojas gali nebegauti interneto prieigos paslaugos apskritai. Darytina išvada, kad galinio vartotojo atžvilgiu saugumo incidentai tinkle turi įtakos interneto paslaugos kokybei.

Bangos ilgųjų sutankinimo (WDM) tinkluose esantys dažni technologiniai duomenų perdavimo srauto (kanalo) nutrūkimai buvo priežastis ieškoti būdų gerinti WDM tinklų patikimumą. Šios srities tyrimuose pradėta naudoti sąvoka – patikimumo kokybė (Arakawa 2003). Patikimumo kokybės vertinimo analogijos pritaikomos ir interneto tinklo patikimumo analizėje. Darbe (Owezarski 2006) nagrinėjamas interneto patikimumo klausimas, pasitelkiant interneto paslaugų kokybės (QoS) užtikrinimo būdus. Naudojama matavimais paremta tinklo architektūra, gebanti užtikrinti numatytą paslaugos kokybę gedimų, perkrovų ir PAAA atakų atvejais. Principas paremtas tinklo srauto matavimais realiu laiku ir mechanizmų, galinčių prisitaikyti prie pasikeitusių sąlygų, naudojimu. Ši praktika leidžia teigti, kad interneto patikimumo kokybę įtakoja tinklo infrastruktūros elementų veikimo kokybė. Kitaip, tinklo infrastruktūros elementų veiklos sutrikimai (dėl kibernetinių atakų ar gedimų) turi įtakos tinklo patikimumo kokybei.

Kitas problemos aspektas yra telekomunikacijų procesai internete. IPT formuoja savo tinklus individualiai pagal vykdomo verslo interesus, technines tinklo plėtos galimybes ir vartotojų poreikius. Kiekvienas IPT valdo tik savo tinklo maršrutizatorius ir formuoja savo tarptinklinių sujungimų strategiją, savo nuožūra atlieka tinklo perimetro stebėseną, apsaugą bei tinklo funkcionalumo patikimumą. Sujungimai su kitais tinklais taip pat formuojami pačių IPT iniciatyva naudojant BGP protokolą AS maršrutizavimo lentelėms sudaryti. Tokia jungtinė potinklų sistema formuoja hierarchinę interneto struktūrą (Gao 2000). Bendras stochastiškai suformuoto interneto tinklo priklauso nuo įvairių faktorių, tame tarpe nuo tinklo topologijos ir nuo atskirų tinklo elementų (AS) patikimumo.

Šios prielaidos leidžia teigti, kad stochastiškai suformuoto interneto tinklo infrastruktūroje yra kritiniai elementai, kurių pažeidimai turi įtakos bendram tinklo funkcionalumui. Tinklo elementų pažeidimai gali būti susiję su kibernetinių atakų veikla ar atsitiktiniais gedimais. Kritinių interneto tinklo elementų nustatymo uždaviniui išspręsti reikia sukurti metodologiją.

3.2. Metodologija ir kriterijai

Interneto tinklo analizei paprastai yra taikoma grafų teorija (Ekmanis 2010, Chang 2004, Subramanian 2002). Darbuose (Lauks 2009, Jeļinskis 2009) grafų teorija pritaikoma srautų analizei bei srautų inžinerijai tinkle, kai tuo tarpu pritaikymo praktikos interneto tarptinklinių sujungimų tyrimų srityje nepakanka.

Interneto tinklo segmentas atvaizduojamas kaip grafas G_{net} , kurio viršūnėse yra autonominės sistemos (AS). Stacionari tinklo būseną atitinka jungtinį grafą. Tokiame grafe yra bent vienas kelias tarp i -osios AS ir bet kurios kitos AS, priklausančios G_{net} . Šio darbo 2 skyriuje nagrinėta Lietuvos regiono interneto tinklo infrastruktūros topologija ir ją atitinkantis grafas.

Grafo G_{net} ypatingos svarbos (kritiniai) elementai žymimi u . Tokias u sudaro kritiniai mazgai ir kritinės linijos, o jų apibūdinimas nėra vienareikšmis ir gali kisti priklausomai nuo kriterijų.

Pagal griežtąją taisyklę grafo mazgas yra kritinis jeigu jo eliminavimas išskaido pradinį grafą į subgrafus. Išplėstinė **kritinio mazgo** V_c charakteristika apibūdina V_c kaip mazgą, kurio eliminavimas ar sutrikdymas pradinį grafą išskaido arba reikšmingai pablogina tinklo savybes (Lauks 2009).

Toks dviejų dalių mazgo apibūdinimas apsunkina kritinių mazgų paiešką. Įvardinti pokyčiai „išskaido arba reikšmingai pablogina tinklo savybes“ realiai nustatomi skirtingais būdais. Todėl šiame darbe taikomi du apibrėžimai: kritinis mazgas ir η – kritinis mazgas.

Kritiniu laikysime mazgą, kurio eliminavimas ar sutrikdymas išskaido pradinį grafą į du ar daugiau atskirų subgrafų, neturinčius tarpusavio ryšių.

η – kritiniu laikysime mazgą, kurio eliminavimas žymiai pablogina tinklo savybes daugeliui (ηA) vartotojų.

Pagal pirmąjį požymį apibūdintiems kritiniams mazgams nustatyti taikytinas formalus grafo viršūnių išėmimo metodas. Jeigu i -osios AS pašalinimas sukuria atskirus tarpusavio ryšio neturinčius subgrafus – tokia AS laikoma V_c .

Patikslinant antrąjį požymį, η – kritinio mazgo apibūdinimą, šiame darbe mazgo kritiškumas vertinamas susietai su prie i -osios AS prisijungusių interneto vartotojų skaičiumi A_i . Mazgo kritiškumo indeksas η išreiškiamas santykiu:

$$\eta_i = \frac{A_i}{\sum_{j=1}^J A_j}. \quad (3.1)$$

Čia $\sum A_j$ yra bendras regiono interneto tinklo vartotojų skaičius.

Kad būtų patogiau, η – kritinio mazgo išraišką skirstysime į dvi kategorijas: $\eta_i \geq 0,1$ ir $\eta_i < 0,1$. Atitinkamai $\eta_i \geq 0,1$ mazgų reikšmė (kritiškumas) bendroje tinklo infrastruktūroje yra didžiausias.

Kritinė linija E_c apibūdinamas taip pat nevienareikšmiai. Vienas iš tokių apibūdinimų yra „briauna AB yra kritinė jeigu abu galiniai taškai A ir B yra kritiniai mazgai“. Kitaip, E_c yra ryšys jungiantis kritinius mazgus taip, kad eliminavus tokią liniją grafą nustoja būti jungtiniu (Lauks 2009).

Atliekant E_c nustatymą G_{net} laikomas sudarytu iš visų IPT veikiančių interneto tinkle, atitinkančių grafo viršūnes. Aktualu įvertinti ir tas ryšio linijas, kurių pašalinimas mažesnius IPT (neturinčius AS) atjungs nuo nacionalinio interneto tinklo.

Pagal analogiją su šiame darbe suformuluotomis kritinio mazgo sampratomis toliau taikomi du apibrėžimai: kritinė linija ir κ – kritinė linija.

Kritinė laikysime liniją, kurios eliminavimas ar gedimas suformuoja kelis atskirus subgrafus neturinčius tarpusavio ryšio (briaunų).

κ – kritinė linija laikysime liniją, kurios eliminavimas ar gedimas žymiai pablogina tinklo jungiamumo savybes.

E_c nustatymas pagal pirmąjį požymį atliekamas analogišku V_c principu – grafo briaunų išėmimo būdu. Jeigu n -osios briaunos pašalinimas sukuria atskirus tarpusavio ryšio neturinčius subgrafus – tokia linija laikoma E_c . Mūsų atveju nagrinėjamas grafas atitinka regioninį interneto tinklą kartu su N_{int} sujungimais. N_{int} yra linijos jungiančios regioninio tinklo AS su tarptautinio interneto tinklo tiekėjo AS. Tokiu atveju taikant briaunų išėmimo metodą N_{int} atitiks E_c .

Patikslinant κ – kritinės linijos sampratą, ji siejama su linijos pralaidos parametru Δ . Vertinsime linijos priklausančios i -ajai AS maksimalią instaliuotą pralaidą Δ_{max} su i -osios AS valdomų sujungimų suminiu pralaidos parametru ΣBw . Šis santykis išreiškiamas pralaidos koeficientu η_{AS} :

$$\eta_{AS} = \frac{\Delta_{max}}{\sum_{k=1}^K Bw} . \quad (3.2)$$

Čia Δ_{max} yra i -osios AS maksimali instaliuota pralaida, Gb/s; ΣBw yra i -osios AS valdomų sujungimų k suminė pralaida, Gb/s.

η_{AS} apskaičiavimas parodo linijos reikšmę i -osios AS jungiamumui lyginant su kitomis i -osios AS linijomis. κ – kritinės linijas suskirstysime į dvi kategorijas: $\eta_{AS} \geq 0,8$ ir $\eta_{AS} < 0,8$. Atitinkamai $\eta_{AS} \geq 0,8$ linijų reikšmė (kritiškumas) bendram i -osios AS jungiamumui yra didžiausia. Iš esmės, minėtos sąlygos tenkinimas parodo i -osios AS neproporcingą resursų paskirstymą.

Analizuojant κ – kritines linijas (E_{ck}), tenkinančias sąlygą $\eta_{AS} \geq 0,8$, paskaičiuojami jų apkrovų intensyvumai (trafikas). n -osios linijos ($n = 1, 2, \dots, E_{ck}$), duomenų srauto $\Delta_{traffic}$ (Gb/s) santykis su Δ_{max} parodo linijos apkrovą išreikštą linijos apkrovos koeficientu λ_n , $\lambda_n = \Delta_{traffic} / \Delta_{max}$. Tai yra dinaminis para-

metras ir skiriasi nuo aukščiau nagrinėtų, kurie yra daugiau statiniai. Δ_{traffic} vienas reikšmingiausių ir labiausiai IPT stebimų tinklo parametrų.

Realiaame tinkle, esant normaliai būsenai, ryšio linijos nėra perkrautos ir paprastai turi rezervus. Tačiau priklausomai nuo vartotojų aktyvumo ar kibernetinių atakų sukurtų duomenų srautų, ryšio intensyvumas gali viršyti instaliuotą pralaidumą. Esant sąlygai kai $\lambda_n \geq 0,8$, nurodo artėjimą prie kritinių linijos resursų išnaudojimo, o daugiau nei vienos linijos apkrovos artėjimas prie kritinės ribos gali būti susijęs su vykstančia kibernetine ataka, kuri savo ruožtu gali priversti prie žymaus viso tinklo jungiamumo degradacijos.

3.3. Taikymas

Sukurta metrika pritaikyta praktikoje interneto tinklo infrastruktūros kritinių elementų identifikavimui. Taikyme naudotasi Lietuvos regiono interneto tinklo infrastruktūros duomenimis iš 2 skyriaus tyrimų.

3.1 pav. Tinklo vizualizacijos duomenų bazės struktūrinė schema

Fig. 3.1. Structure of network visualization data base

Lietuvos interneto tinklo modelio sudaryme naudotas didelis kiekis techninių duomenų, kuriems apdoroti pasirinkta kurti duomenų bazę. Duomenų bazė turi susisteminti duomenis ir palengvinti operavimą jais. Pasirinkta struktūrizuotų užklausų kalba (SQL) paremta duomenų bazės struktūra su MySQL realizacija. Sukurtos duomenų bazės struktūra (3.1 pav.) sudaryta iš:

a) Pagrindinės lentelės Nr.1 per kurią pasiekiamos visos kitos lentelės. Joje saugomi tarptinklinių sujungimų duomenys, tokie kaip AS tarpusavio jungtys,

kokia technologija naudojama, sparta, su kokia šalimi yra organizuotas sujungimas, bei kokiame mazge realizuotas sujungimas;

b) Lentelės Nr. 2, kurioje įrašyti duomenys apie AS, pavadinimas, autonominės sistemos numeris, turimas interneto paslaugų gavėjų skaičius;

c) Lentelės Nr. 3, kurioje nurodyta AS fizinė dislokacija, šalis.

d) Lentelės Nr. 4 su saugoma informacija apie sujungimų tipus (tranzitinė ar kita).

e) Lentelės Nr. 5, kurioje įrašyti AS administratoriaus duomenys.

Duomenims į lenteles suvesti, o taip pat juos atvaizduoti, sudaryta aplikacija dinaminės interpretuojamos programavimo kalbos (PHP) pagrindu. Tokiu būdu galima operatyviai atvaizduoti įvairius duomenis, kurie yra išskaičiuojami iš MySQL duomenų bazės apdorojant PHP, kaip pavyzdžiui: AS lygiaverčių mainų sujungimų schema; bendrą ar konkretaus AS išėjimo į užsienį spartą; kiek AS yra susijungę per konkretų lygiaverčių mainų maršrutizavimo mazgą LMMM ir pan. Vienas operatoriui aktualiausių duomenų bazės panaudojimo aspektų yra Lietuvos interneto tinklo schemos grafinis atvaizdavimas.

Duomenų bazės pagrindu atlikus eksperimentus viršūnių išėmimo metodu, grafe sudarytame iš AS mazgų, identifikuoti 4 kritiniai mazgai (V_c). Nuo V_c priklauso bendras tinklo junglumas. Siektina, kad tokių V_c tinkle būtų mažiau, o tas pasiekama formuojant papildomas jungtis tarp AS.

Tuo tarpu η – kritinių mazgų, tenkinančių sąlygą $\eta_i \geq 0,1$, nustatyta 3. Pastebėta, kad vienas iš jų sutampa su atitinkamu kritinių mazgu V_c . Taip pat pastebėta, kad η_i sąlygos didinimas tiesiogiai lemia V_c didėjimą.

Kritinių linijų (E_c) paieška grafe atitinkančiame Lietuvos interneto tinklą sudėtinga dėl didelės aibės. E_c paieška vyksta tarp apie 500 tarptinklinių sujungimo linijų, todėl matematinis apskaičiavimų variantų modelis reikalauja laiko ir kompiuterinių resursų. Eksperimentinių tyrimų rezultatai 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Tinklo kritinių elementų nustatymo rezultatai

Table 3.1. Network critical elements calculation results

Kritinis elementas	Kriterijus	Sąlygos	Rezultatai
V_c	Mazgų eliminavimo metodas		4
	η – kritinis mazgas	$\eta_i \geq 0,1$	3
		$\eta_i \geq 0,2$	11
		$\eta_i \geq 0,3$	25
E_c	Linijų eliminavimo metodas		26
	κ – kritinė linija	$\eta_{AS} \geq 0,9$	2
		$\eta_{AS} \geq 0,8$	13
		$\eta_{AS} \geq 0,5$	33

Linijų išėmimo metodu nustatytos 26 kritinės linijos. Tinklo grafe yra 26 variantai kai jungtis grafą išskaido (grafas nustoja būti jungtiniu). Interneto patikimumo aspektu didėjantis E_c skaičius yra neigiamas faktorius. E_c jungties pažeidimas blogina viso tinklo junglumą. Praktikoje reikia siekti mažinti E_c , t. y. mažinti tinklo patikimumo priklausomybę nuo E_c .

κ – kritinių linijų (E_{ck}) paieška taikyta kiekvienam IPT atskirai. Nustatyti tik 2 IPT (nepriklausantys E_c), kurių tarpe yra E_{ck} , tenkinančios sąlygą $\eta_{AS} \geq 0,9$.

3.4. Stebėsena

Nustatytus V_c ir E_c tikslinga nuolat stebėti, kad kritinių tinklo elementų gedimai ar kritiniai linijų apkrovų resursų išnaudojimai būtų nustatyti ir įvertinti. Stebėsenos veiksmas yra svarbus nustatyti kritinių elementų gedimus laiku, nes tokių elementų netekimas praktiškai įtakoja bendrą tinklo funkcionalumą. Gedimų nustatymui kaip priemonę naudosime detektorius esančius subgrafe G_c , sudarytame iš viršūnių V_c ir briaunų E_c . Detektoriai nuolat komunikuodami tarpusavyje vykdo tinklo stebėseną.

Paprasčiausias būdas stebėsenai atlikti yra periodiškai tinklų komutacijos mazgų patikrinimas (apklausa). Tai atliekama interneto kontrolės žinučių protokolo (ICMP) apimtyje esančiomis *ping*, *tracpath*, *pathping* ar *traceroute* komandos. Šios komandos gerai žinomos ir plačiai naudojamos tinklo administratorių. Nėra sudėtinga sudaryti programą, kad komanda nuolat (pavyzdžiui, 10 min intervalais) tikrintų visų kritinių mazgų atsaką (gyvybingumą), o pats procesas būtų automatizuotas. Jeigu kuris nors tinklo mazgas neatsiliepia į užklauso komandą, operatoriaus prižiūrimeame tinklo topologijos žemėlapyje būtų atvaizduojamas įspėjimas apie gedimą, o tokio mazgo patikrinimo periodiškumas sutankinamas (pavyzdžiui 1 s intervalais) kol nebus gautas atsakas apie mazgo funkcionalumo atstatymą. Teigiama tokio metodo savybė yra nepriklausomumas, nes užklauso gali būti generuojamos ir iš šalies, nesant tinklo perimetre, susitarimai su maršrutizatorių administratoriais dėl sensorių talpinimo nėra būtini. Metodas patogus, pavyzdžiui, tinklų reguliavimo institucijoms ar mokslinių tyrimų vykdytojams. Tačiau pats metodas yra nelankstus. Centrinis stebėsenos serveris gauna tik ribotą techninę informaciją apie tinklo mazgo neveiklumą. Techninių mazgo charakteristikų kaitos informacija nepasiekiamą. IPT technologiškai gali nustatyti, kad tinklo elementai neatsakinėtų į šias komandas. Tokie elementai iškristų iš stebėsenos sistemos.

Kritinių elementų stebėsenos uždavinio sprendimas paremtas SNMP (paprastasis tinklų valdymo protokolas, angl. *Simple Network Management Protocol*) protokolu. SNMP yra aplikacijų lygio protokolas integruotas į daugelį šiuolaikinių tinklo įrenginių palaikančių TCP/IP, todėl jį galima panaudoti centralizuotai stebėsenai organizuoti. SNMP veikimas paremtas duomenų pagal

nustatytus kintamuosius surinkimu iš nutolusių įrenginių, mūsų atveju tai bus tinklo maršrutizatoriai, į valdymo sistemą (Case 1990). Reikalingi kintamieji gali būti nurodomi iš valdymo sistemos arba iš anksto nustatyti. Programiniai komponentai (agentais) veikia kiekviename iš stebimų mazgų, registruoja ir siunčia duomenis per SNMP į valdymo sistemą. SNMP leidžia vykdyti aktyvų tinklo valdymą, pavyzdžiui, galima atnaujinti ar pakeisti tinklo konfigūraciją apsieičiant komandomis tarp valdymo sistemos ir tinklo mazgų. Toks stebėsenos metodas lankstesnis, leidžia rinkti daugiau techninės informacijos, tačiau jam realizuoti integruoti agentai IPT mazguose. SNMP yra standartizuotas protokolas turintis galimybių įvairiems pritaikymams, todėl gali būti adaptuotas praktiškai bet kokiems tinklo įrenginių parametrams fiksuoti.

SNMP principu paremta stebėsenos sistema realizuojama sekančiais etapais:

1. siunčiamas užklausa į V_c (SNMP agentas);
2. iš SNMP agento gaunamas atsakas, kuris priimamas stebėsenos sistemoje (SNMP serveris);
3. apdorojami ir išsaugomi duomenų bazėje matavimų duomenys.

Sukurtas kritinių interneto tinklo elementų stebėsenos algoritmas praktiniam stebėsenos realizavimui pateiktas 3.2 pav.

Stebimi mazgai tinkle valdomi SNMP protokolu *read*, *write* ir *trap* tipų pagrindinėmis komandomis. Organizuojant stebėseną, komanda *read* skirta periodiškai nuskaityti duomenis, *trap* asinchroniškai raportuoti valdymo sistemai apie įvykius, tokius kaip ryšio sutrikimai, duomenų srauto kritinis lygis ir pan. Kokią informaciją agentas stebimame tinklo įrenginyje rinks, priklauso nuo valdymo informacijos bazės (VIB). Stebėsenai atlikti agentai įvedami į tinklo maršrutizatorius. Tokiu atveju VIB tekstinis failas (duomenų lentelė) parenkama aprašyti sekančius parametrus: tinkle galimas ryšio klaidas, srauto kitimus kiekviename kanale. VIB tekstinis failas ir atitinkamai stebimi techniniai parametrai gali būti keičiamas. Tam naudojama *traversal* komanda, kuri parodo kokius kintamuosius maršrutizatorius gali palaikyti. Naudojant *write* komandą galima pakeisti VIB failą pagal valdymo sistemos operatoriaus poreikius.

Praktiniam realizavimui pasirinktas *Ethernet Statistics Group* VIB (Waldbusser 1995), skirtas λ_n apskaičiavimui SNMP agente. Dvipusiam kanalui λ_n apskaičiuojamas pagal formulę 3.3 įvertinančią įėjimo/išėjimo (žymima *in/out*) srauto reikšmes:

$$\lambda_n = \frac{\max(\Delta_{in}, \Delta_{out}) \times 8}{\Delta t \times \Delta_{max}} \quad (3.3)$$

Δ_{in} – dviejų SNMP *ifInOctets* agento apklausos ciklų skirtumas, skaičiuojamas įėjimo srauto kanale, bitai (Waldbusser 1995).

Δ_{out} – dviejų SNMP *ifOutOctets* agento apklausos ciklų skirtumas, skaičiuojamas išėjimo srauto kanale, bitai (Waldbusser 1995).

Δ_{max} – greitis sąsajoje vertinamas *snmpifSpeed* objekte, bits/s (Waldbusser 1995).

Δt – laiko tarpas. $\Delta t = 60$ s.

3.2 pav. Kritinių interneto tinklo elementų stebėsenos algoritmas

Fig. 3.2. Critical internet network elements monitoring algorithm

Interneto tinklo infrastruktūros kritinių mazgų stebėsenos algoritmo (3.2 pav.) įgyvendinimas realizuotas pseudo kodo algoritmu. Pseudo kodo realizacija realiai stebėsenai atlikti pateikiama 3.3 paveiksle ir yra tinkama programiniam realizavimui.

SNMP agentai gali būti programiškai konfigūruojami kas įgalina nustatyti aliarmo žinučių siuntimą stebėsenos sistemai ne tik visiško linijos gedimo atveju, bet ir esant kritiniam linijos apkrovimui, t. y. esant sąlygai $\lambda_n \geq 0,8$. Tokiu būdu stebėsenos funkcija atliekama dar operatyviau.

```

1  t, id_A, out ∈ B[];
   i ∈ [0, n-1];
   read ID, IP_address ∈ A[];
2  set i = 0;
3  for each ID ∈ A[i] do
4      fix local system time t(i);
5      send SNMP request IP_address ∈ A[i];
6      if IP_address ∈ A[i] responded then;
7          get out(i);
                                     else
8          send alert notification;
9          set out(i) = 0;
10         calculate  $\lambda_n$ ;
                                     endif;
11     write id_A, t(i), out(i) ∈ B[];
                                     end;
12 wait 60s.
                                     return.

```

3.3 pav. Kritinių interneto tinklo elementų stebėsenos pseudo kodo algoritmo realizacija

Fig. 3.3. Critical internet network elements monitoring pseido-code algorithm

3.5. Trečiojo skyriaus išvados

1. Interneto tinklo infrastruktūros patikimumui ypatingą svarbą turi tarptinklinių sujungimų mazgai ir ryšio linijos. Sudaryta metrika leidžianti nustatyti kritinius regiono interneto tinklo elementus: kritinius ir η – kritinius mazgus bei kritines ir κ – kritines linijas.

2. Sudarytą metriką pritaikius Lietuvos interneto tinklo infrastruktūrai:

- identifikuoti 4 kritiniai mazgai (V_c);
- nustatyti 3 η – kritiniai mazgai, tenkinantys sąlygą $\eta_i \geq 0,1$;
- nustatytos 26 kritinės linijos ir 2 IPT, kurių tarpe yra κ – kritinės linijos, tenkinančios sąlygą $\eta_{AS} \geq 0,9$.

3. Nacionalinio interneto tinklo infrastruktūroje yra apibrėžtas skaičius jungčių ir mazgų, nuo kurių priklauso bendras tinklo junglumas ir atitinkamai

tinklo patikimumas. Konkretus kritinių mazgų ir jungčių identifikavimas nurodo tinklo pažeidžiamumus. Atitinkamai tikslingas tokių mazgų ir jungčių mažinimas (tinklo junglumo didinimas) suponuoja interneto tinklo patikimumo stiprinimą.

4. Įrodyta, kad kritinių tinklo elementų stebėseną įmanoma SNMP protokolo pagrindu naudojant detektorius tinklo kritiniuose mazguose ir bendrą stebėsenos sistemą. Sudarytas tinklo stebėsenos algoritmas ir jo realizacijos kodas. Sudarytas stebėsenos modelis leidžia realiu laiku centralizuotai vertinti regiono interneto tinklo būseną, analizuoti tinklo veiklos sutrikimus.

Kibernetinių atakų įtaka interneto funkcionalumui

Tyrimo tikslas yra parengti modelį, kuriuo siekiama įvertinti kibernetinių atakų poveikį Lietuvos interneto tinklo infrastruktūrai ir nustatyti labiausiai pažeidžiamus mazgus ir linijas tinkle. Sudarytas virtualus Lietuvos interneto tinklo modelis bei paruošti ir išbandyti skirtingi kibernetinių atakų scenarijai. Atliekant bandymus generuojant duomenų srautų ataką iš tarptautinių AS nukreiptą į Lietuvos tinklo infrastruktūrą, nustatyti 3 AS (mazgai) ir 4 jungiamosios linijos, kurios pasiekė galimybių ribas. Kiti atakų scenarijai nukreipti į atskirus tinklo infrastruktūros mazgus lėmė, kad tinklas sugebėjo akumuliuoti duomenų srautus.

Skyriaus tematika publikuoti du autoriaus straipsniai (Kajackas, Rainys 2011; Kajackas, Rainys, Aputis 2011).

4.1. Kibernetinių atakų analizė

Elektroninių ryšių tinklų ir informacijos saugumo incidentas (kibernetinė ataka) apibūdinamas kaip įvykis, veiksmas ar neveikimas, kuris sukelia ar gali sukelti neteisėtą prisijungimą ar sudaryti sąlygas neteisėtai prisijungti prie informacinės sistemos ar elektroninių ryšių tinklo, sutrikdyti ar pakeisti (įskaitant valdymo

perėmimą) informacinės sistemos ar elektroninių ryšių tinklo veikimą, sunaikinti, sugadinti, ištrinti ar pakeisti elektroninius duomenis, panaikinti ar apriboti galimybę naudotis elektroniniais duomenimis, taip pat sudaryti sąlygas pasisavinti ar kitaip panaudoti neviešus elektroninius duomenis tokios teisės neturintiems asmenims. Yra duomenų apie didelio masto kibernetines atakas, kurios turėjo įtakos interneto tinklo veiklai. 2007 metais buvo surengta didelio masto kibernetinė ataka prieš Estijos informacines sistemas. Atakos metu buvo pažeisti bankų, įvairių ministerijų, vyriausybės, bei kiti svarbūs Estijos internetiniai tinklalapiai. Buvo nustatyta, kad išpuolio metu surengta 128 PAAA atakos, iš jų 115 interneto kontrolės žinučių protokolais (ICMP) protokolo, 4 TCP/IP ir 9 kiti kanalų srautų perkrovos (Nazario 2010). Atakos metu buvo pažeista didelė Estijos interneto tinklo dalis. 2008 metais buvo surengta panašaus pobūdžio kibernetinė ataka Gruzijoje. Ataką sudarė taip pat PAAA atakos, kurių pasireiškimo pobūdis buvo analogiškas Estijos atvejui (Nazario 2010).

Pagal minėtų kibernetinių atakų nukreiptų į interneto tinklą pavyzdžių analizę ir darbų (Mirkovic 2004, Chandramouli 2009) rezultatus, tikslinga išskirti tris (BGP, TCP ir DNS) tinklo protokolus, kuriuos naudojant atakų poveikis tinklui yra didžiausias.

BGP protokolas yra svarbiausias maršruto parinkimo protokolas interneto tinkle, skirtas keisti maršruto parinkimo informacija tarp autonominių sistemų (Kozierok 2005, Mahajan 2002). Pagrindiniai šio protokolo saugumo trūkumai yra transporto mechanizme bei griežtos autentifikacijos nebuvimas. Dažnu atveju operacinėse sistemose arba tinklo valdymo įrenginiuose, palaikančiuose BGP, nėra naudojama autentifikacija, taip pat pasitaiko, kad slaptažodžiai tinkle yra siunčiami nešifruoti. Kadangi BGP protokolas naudoja TCP protokolą BGP sesijoms užmegzti, BGP sesijos tampa pažeidžiamos dėl TCP protokolo spragų. Išnaudojus šias saugumo spragas atakos rengėjai gali manipuluoti interneto tinkle esančiu BGP srautu. BGP srautas einantis į kitą tinklą gali būti nutrauktas arba gali būti nukreiptas į kitą norimą tinklą, kad būtų galima išgauti ir pasisavinti siunčiamą informaciją.

Kadangi BGP protokolo maršrutizavimo lentelių duomenų tikrumo patikrinimo mechanizmų nėra, grėsmės internete pasireiškia sekančiais:

- klaidinga kelio informacija, apsikeičiant maršrutizavimo lentelėmis tarp AS, greitai išplinta tinkle. Didesnis skaičius klaidų gali sutrikdyti tinklo veiklą (Hall 2011);
- nenaudojami IP adresacijos blokai panaudojami AS neturint tam teisės;
- IP adresacijos bloko pasiekiamumas nurodomas fiktyviai, siekiant perimti duomenų srautą.

Transporto kontrolės protokolas (TCP) protokolas skirtas duomenų srautų kontroliavimui kompiuteriniuose tinkluose. TCP yra svarbiausias protokolas Internetinių protokolų rinkinyje TCP/IP. Sudarant sujungimą tarp dviejų sistemų

TCP protokolas naudoja „Three way handshake“ metodą ryšio sesijoms užmegzti (Kozierok 2005). Pavyzdžiui, kibernetinės atakos metu yra siunčiama didelis skaičius SYN ir neatsakomo SYN-ACK tipo pranešimų. Tokių būdų sistemos resursai yra apkraunami iki ribų ir sistemos funkcionavimas blokuojamas.

Domenų vardų sistema (DNS) yra hierarchinė įvardijimo sistema skirta kompiuteriams ar kitoms sistemoms prijungtoms prie interneto ar privataus tinklo. Svarbiausia DNS funkcija, tai paversti skaitomus domenų vardus į skaitmeninį atitikmenį, kuris susijęs su tinklo įrangą. Pasaulyje yra 13 pagrindinių DNS serverių, jie sudaro visų serverių hierarchijos viršūnę ir be jų internetas tiesiog negalėtų funkcionuoti. Kibernetinės atakos metu yra stengiamas apkrauti DNS serverių resursus taip, kad jų funkcionavimas nutrūktų. Sutrikus DNS serverių darbui daugelis sistemų taptų nepasiekiamos, nes nebūtų teikiama informacija apie sistemų domenų vardus.

4.2. Metodologija

Tyrimu siekiama prognozuoti hipotetinės kibernetinės atakos įtaką Lietuvos interneto tinklo infrastruktūrai, bei nustatyti silpnąsias vietas tinklo infrastruktūroje. Kuriama eksperimento metrika orientuota į 3 skyriuje nagrinėtus tinklo kritinius elementus, t. y. siekiama įvertinti kaip kibernetinių atakų srautai ir tinklo perkrovos (Pavilanskas 2010) įtakos tinklo elementus ir konkrečiai kritinius elementus.

Siekiant nustatyti koks galėtų būti kibernetinių atakų poveikis Lietuvos interneto tinklo infrastruktūros funkcionalumui, reikalinga išspręsti sekančius uždavinius:

- i. sudaryti (simuliuoti) virtualią tinklo topologijos schemą pagal realius duomenis apie tinklo charakteristikas;
- ii. sukurti ir išmėginti virtualiame tinkle hipotetinių kibernetinių atakų scenarijus, įvertinti įtaką ir pasekmes.

Tyrimų objektas yra regiono interneto infrastruktūra, t. y. grafas iš AS, tarptautinių tinklo teikėjų AS bei tarptinklinių tranzitinės ir lygiaverčių mainų tipo sujungimų (4.1 pav.). Įvertinus kitų darbų pavyzdžius (Kulikovs 2009, Kajackas 2007), tinklo modeliavimui pasirenkamas *OPNET Modeler* programų paketas. *OPNET Modeler* tinklo simuliacijos uždaviniui tinka, nes programa yra skirta projektuoti ir analizuoti įvairaus tipo telekomunikacijų tinklus, jų mazgus ir linijas, bibliotekos leidžia pasirinkti įvairias technologijas.

Daroma prielaida, kad interneto tinklas ar jo dalis gali būti pažeista kibernetinės atakos. Generuojamos atakos charakteristikos parenkamos atsižvelgiant į jos įtaką tinklo infrastruktūrai (4.1 skyriaus analizė). Realizuojama kuriant didesnius nei įprasta duomenų srautus iš vienos ar kelių AS potinklių, imituojant PAAA atakas arba įrenginių BGP protokolo konfigūracijos pakeitimas imituo-

jant atsitiktinius gedimus ir konfigūravimo klaidas. Formuluojami ir eksperimentiškai tikrinami šie scenarijai:

1. dirbtinis duomenų srauto generavimas iš tarptautinių tinklo teikėjų AS į Lietuvos interneto infrastruktūrą;
2. pagrindinio tranzitinės tipo tarptinklinių sujungimų mazgo gedimas;
3. pagrindinio lygiaverčių mainų tipo tarptinklinių sujungimų mazgo gedimas.

4.1 pav. Regiono interneto tinklo grafas: juodi mazgai yra regiono AS; balti – tarptautinės AS; lygiaverčių mainų sujungimai – punktyrinė linija; tranzitinės – linija

Fig. 4.1. Graph of the state Internet network: national AS represented in black nodes; international AS in white; peering interconnections type – dotted lines; tranzitinės – solid lines Structure of network visualization data base

4.3. Tyrimo rezultatai

Realizuojant pirmąjį metrikos etapą, regiono interneto tinklas sumodeliuotas *OPNET* iš 40 regioninių AS, 17 tarptautinių tinklo teikėjų AS, 548 tarptinklinių sujungimų, tame tarpe 424 lygiaverčių mainų ir 124 tranzitinės. Duomenys tinklo modeliui naudoti iš 2 skyriaus darbo rezultatų bei juos atnaujinus pagal laikę pasikeitusią topologiją. Lyginant su periodu kai vykdyta topologijos analizė, mazgų ir jungčių skaičius išaugo. Atitinkamai ryšių grafas taip pat išsiplėtė.

Maršruto parinkimo duomenų keitimuisi tarp autonominių sistemų buvo panaudotas BGP protokolas, nes šis protokolas šiuo metu yra pagrindinis maršruto parinkimo protokolas naudojamas Internetu. Autonominę sistemą *OPNET Modeler* terpėje atitiko vienas *Ethernet* technologijos maršruto parinktuvas palaikantis BGP protokolą. Autonominių sistemų apjungimui tinkle buvo panau-

dotos 10GBaseX ir 1000BaseX technologijos. Technologijų tipas buvo pasirinktas atsižvelgiant į tai kokia pralaida yra naudojama tarp realių AS Lietuvos interneto infrastruktūroje.

Sumodeliuotame Lietuvos interneto tinkle buvo sukurti trys skirtingi duomenų srautai. Pagrindinis duomenų srautas buvo kuriamas Lietuvos tinklo viduje, taip pat buvo sukurtas duomenų srautas einantis iš Lietuvos tinklų į tarptautinius AS ir duomenų srautas iš tarptautinių tinklų einantis į Lietuvos AS. Tinklo modelyje duomenų srautams sukurti buvo naudojamas (FTP, HTTP, E-mail) paslaugos.

Dėl informacijos konfidencialumo modelyje esančių AS realūs pavadinimai yra užkoduoti, tačiau autoriui yra žinomi. AS yra priskiriami tam tikri numeriai. Taip pat nėra skelbiami užsienio šalių AS su kuriomis Lietuvos tinklai turi sujungimus.

Kibernetinės atakos tinklo modelyje buvo realizuojamos kuriant duomenų srautų pliūpsnius, imituojant PAAA atakas. Duomenų srautai buvo kuriami iš vienos ar kelių autonominių sistemų potinklų. Kitas atakų realizavimo būdas buvos įrenginių BGP protokolo konfigūracijos pakeitimas imituojant atsitiktinius gedimus ir konfigūravimo klaidas.

Virtualioje Lietuvos interneto tinklo infrastruktūroje buvo modeliuojamas įprastas tinklo darbas ir nustatytos įprastos (neviršijant normalių duomenų srauto apimčių) tinklo darbo sąlygos. Tai leido nustatyti ribas nuo kurių reikia keisti įvesties vertes atakų imitavimui. Įprasto tinklo darbo metu buvo surinkti duomenys:

- Autonominių sistemų BGP maršrutų lentelės įrašai;
- Duomenų perdavimo linijų pralaidumas;
- Vartotojų paslaugų vėlinimo laikai;
- BGP protokolo parametrai;
- Įrangos CPU parametrai.

Pagal įprasto tinklo darbo metu surinktų duomenų pakitimus buvo įvertinama kibernetinių atakų įtaka.

Lietuvos interneto infrastruktūra AS lygiu sumodeliuota pirmą kartą. realizacija *OPNET* įrankiu pateita B priede.

4.3.1. Srauto generavimo kibernetinė ataka

Šio scenarijaus realizavime kibernetinė ataka vykdyta generuojant srautą į visas regiono AS (4.2 pav.). Simuliuojama situacija, kai tarptautinių ryšio kanalų pralaida maksimaliai išnaudota duomenų srautui. Atitinkamai regioninių AS tarp-tinkliniai sujungimai įtakojami ir srautų pasiskirstymas tinkle sutrinka. Realiai toks scenarijus susidaro PAAA atakų atvejais, kai netipiškai dideliu srautu generuoti naudojami *botnet* tinklai (Juknius 2011).

Sumodeliuotame tinkle imituojant normalų tinklo darbą ir papildomai simuliuojant kibernetinės atakos srautus, kompiuterinių resursų OPNET programai nepakanka arba skaičiavimų laikas yra nepatenkinamas. Todėl įvedamas koeficientas skaičiavimų duomenims sumažinti visais lygiais vienodai.

4.2 pav. Tinklo topologijos fragmentas iliustruojantis kibernetinę ataką (atakos vektorius – PAAA iš tarptautinių AS į nacionalinį tinklą)

Fig. 4.2. Part of the network topology illustrating type of attack (attack vector represented by DDoS from international AS to the national AS infrastructure)

Pirmo scenarijaus eksperimento rezultatai parodė, kad PAAA simuliacija turėjo įtakos 3 AS (sąlyginiai numeriai 24, 32 ir 100). Virtualaus tinklo tarptinklinių sujungimų išdavoje šie mazgai akumuliuo didžiąją dalį atakos srauto. AS (sąlyginiai numeriai 24, 32 ir 100) jungiantys ryšiai skiriasi savo pralaidos ir maršrutizavimo parametrais, todėl atakos įtaka sujungimams nevienoda. Didžiausias srautų apkrovas gavusių linijų nustatymas leidžia identifikuoti atakos pažeidžiamas sritis tinklo infrastruktūroje.

Įvertinus AS (sąlyginiai numeriai 24, 32 ir 100) sujungimų apkrovos matavimus nustatytos 4 linijos paveiktos atakos. Srautai šiose linijose pasiekė maksimalią pralaidą (4.3 pav.). Rezultate tai linijos gedimas. 4.3 pav. grafikas iliustruoja linijos, kurioje srautas buvo didžiausias, apkrovos kitimą. 20-ą scenarijaus eksperimento minutę srautas linijoje išaugo 3 kartus daugiau nei yra įprastas linijos apkrovimas. Analogiški procesai užfiksuoti ir kitose trijose atakos pažeistose linijose.

4.3 pav. Linijos pralaidos matavimo rezultatai vykstant PAAA atakai (rezultatai įvertinus koeficientą $k = 1000$)

Fig. 4.3. Throughput measurement during the DDoS attack scenario (results with set of coefficient $k = 1000$)

4.3.2. Tranzitinio mazgo kibernetinė ataka

Antrojo scenarijaus eksperimente pasirinktas tinklo mazgas (AS numeris 24), siekiant įvertinti jo pažeidimo dėl kibernetinės atakos (mazgo gedimas tinkle dėl BGP konfigūracijos pažeidimo) įtaką tinklo darbui (4.4 pav.). Atakos tikslas buvo nutraukti duomenų perdavimą Lietuvos tinklams vieninteliu tiesioginiu tranzitiniu sujungimu jungiančiu AS Nr.24 su AS Nr.194 užsienyje. AS Nr.24 tinklo topologijoje turi didžiausią skaičių tranzitinės tipo tarptinklinių jungčių ir pagal 3 skyriaus tyrimus identifikuojamas kaip V_c .

Eksperto metu, eliminavus tinklo mazgą, srautai tinkle persiskirstė. Maršrutizavimo lentelės pasikeitė duomenų srautus nukreipiant aplenkiant AS Nr.24. Regioninio tinklo srautai, atnaujinus maršrutizavimo lenteles, veikė.

Šis mazgas topologijoje turi tarptinklinius sujungimus su tarptautiniais AS, todėl kiti regioninio tinklo AS vartotojai į tarptautinį internetą gali išeiti per kitas *Tier-1* AS. Analogiškai srautai iš tarptautinių AS persiskirstė į kitas tarptautines AS, kad pasiekti regioninį tinklą apeinant AS Nr.24. To išdavoje išaugo apkrovos linijose. 4.5 paveiksle iliustruota linijos apkrovimas tarptinklinių sujungimų jungtyje su tarptautiniu AS. 20-ą scenarijaus eksperimento minutę srautas linijoje išaugo apytikriai 8 kartus daugiau nei yra įprastas linijos apkrovimas (linijos gedimas).

4.4 pav. Tinklo topologijos fragmentas iliustruojantis kibernetinę ataką (atakos vektorius – tranzitinės tarptinklinių sujungimų mazgo pažeidimas)

Fig. 4.4. Part of the network topology illustrating the attack on interconnections node (attack vector represented by broken node/lines)

4.5 pav. Linijos pralaidos matavimo rezultatai vykstant tranzitinės mazgo atakai (rezultatai įvertinus koeficientą $k = 1000$)

Fig. 4.5. Throughput measurement during the transit node attack scenario (results with set of coefficient $k = 1000$)

4.3.3. Lygiaverčių mainų mazgo kibernetinė ataka

Scenarijus realizuotas su prielaida, kad kibernetinės atakos pasekoje tarptinklinių lygiaverčių mainų sujungimų mazgas buvo pažeistas (realizacija analogiška 4.4 pav.). Dėl pakitusios BGP protokolo konfigūracijos duomenų perdavimas lygiaverčių mainų sujungimais buvo nutrauktas. Pagal tinklo topologijos tyrimus (žiūr. 3 sk.), Lietuvos interneto tinklo infrastruktūroje yra centrinis lygiaverčių mainų maršrutizavimo mazgas LMMM.

Scenarijaus eksperimento rezultate srautai eliminavus LMMM persiskirstė į tranzitinės sujungimų tinklą. Tranzitinės linijų apkrovos išaugo. Išanalizavus visus tinklo tranzitinius sujungimus pagal tai kiek kartų pakito apkrova, buvo nustatyti tranzito tipo sujungimai, kuriems teko didžiausia apkrova. 4.6 paveiksle pavaizduotas 42AS–4AS tranzito jungimo pralaidumo vidurkio grafikas. Šis sujungimas priklauso AS Nr.24, tai didžiausia Lietuvos interneto tinklo AS turinti 28 tranzito sujungimus. Pagal pateiktą grafiką pastebima, kad 10 minutę sujungimo apkrova ženkliai padidėja ir apkrova tampa tris kartus didesnė. Būtent šiam sujungimui teko didžiausia apkrova.

4.6 pav. Linijos pralaidos matavimo rezultatai vykstant lygiaverčių mainų mazgo atakai (rezultatai įvertinus koeficientą $k = 1000$)

Fig. 4.6. Throughput measurement during the *peering* node attack scenario (results with set of coefficient $k = 1000$)

4.4. Ketvirtąjo skyriaus išvados

1. Pasiūlytas metodas įvertinti ir išmatuoti hipotetinių kibernetinių atakų ar mazgų gedimų įtaką interneto infrastruktūros funkcionalumui. Eksperimentai pratęsia ir užtvirtina interneto tinklo topologijos ir tinklo infrastruktūros kritinių elementų tyrimus.

2. Sukurtas virtualus Lietuvos interneto tinklo modelis, kurio pagrindu, eksperimentiškai įvertinamas tinklo patikimumas naudojant kibernetinių atakų scenarijus.

3. Eksperimente, kurio kibernetinės atakos vektorius iš tarptautinių AS nukreiptas į nacionalinį regiono tinklą, nustatyta:

- 3 AS (tinklo mazgai) ir 4 tarptinklinių sujungimų linijos patyrė maksimalias srautų apkrovas ir negalėjo funkcionuoti normaliu režimu;
- Šiose tinklo infrastruktūros vietose pirmiausia susidaro perkrovos ir interneto paslaugų teikimo trūkiai, dėl to faktiškai vartotojams neužtikrinama reikalinga kokybė;
- Eksperimento metu pažeistos AS ir linijos sutampa su 3 skyriuje teoriškai nustatytais kritiniais mazgais ir linijomis. Tai patvirtina teorinio modelio pagrįstumą.

4. Bandymuose, kurių kibernetinės atakos vektoriai nukreipti į tranzitinės ir lygiaverčių mainų tarptinklinių sujungimų mazgų pažeidimus, reikšmingų bendro tinklo funkcionalumo sutrikimų nepatyrė. Tinklo infrastruktūra perskirstė srautus taip, kad bendras tinklas išlikdavo funkcionalus. Šių scenarijų atvejais kibernetinės atakos reikšmingai pažeidė tik vieną ryšio liniją.

5. Tyrimo rezultatai naudingi prognozuojant realių kibernetinių atakų įtaką regiono interneto tinklo infrastruktūrai. Sukurtas modelis naudingas modifikuojant Lietuvos interneto tinklo infrastruktūrą.

Interneto tinklo infrastruktūros patikimo stiprinimas

Skyriuje formuluojamos priemonės regiono interneto tinklo infrastruktūros patikimumui stiprinti. Atsižvelgiant į interneto topologijos, kritinių tinklo infrastruktūros elementų bei kibernetinių atakų simuliacijų tyrimų rezultatus, siūlomos išankstinio įspėjimo sistemos pritaikymo, tinklo topologijos balansavimo ir organizacinių priemonių visuma. Šių priemonių pritaikymas regiono tinklo infrastruktūros reguliavimo politikoje sudarys prielaidas užtikrinti regiono interneto tinklo veiklos patikimumą ir saugumą. Formuoja regiono interneto ateities vystymo gaires.

Skyriaus tematika paskelbtas vienas autoriaus straipsnis konferencijų medžiagoje (Rainys 2006; Kajackas, Rainys 2010; Kajackas, Rainys 2011).

5.1. Prielaidos

Interneto tinklas vystomas prisilaikant tinklo neutralumo principų. Interneto duomenų srautas skaidomas į paketus, kurie iš siuntėjo gavėjui nukreipiami artimiausiu ir/ar greičiausiu keliu. Paketai tinkle yra lygiaverčiai; maršrutizatoriai ir kita tinklo įranga stengėsi juos kuo greičiau išsiųsti adresatui, neskirstydama, kuris yra svarbesnis (Watal 2011). Ekonomiškai visi perduoti duomenų paketai

yra vienodos vertės. Laikoma, kad tinklo neutralumo principas yra sėkmingo interneto plėtros fakto priežastis.

Išskyrus domenų vardų sistemą (DNS), interneto plėtra tiesiogiai nėra įtakojama reguliavimo mechanizmų. Tačiau dėl išaugusios įtakos verslui, technologinių procesų valdymui, valstybės paslaugų teikimui bei vartotojų socialiniams santykiams, interneto tinklas tapo svarbiu resursu valstybės ir jos piliečių gyvenimo kokybei. Be to, 4 skyriuje aprašyti eksperimentai demonstruoja riziką kylančią tinklo infrastruktūrai dėl kibernetinių atakų poveikio. Dėl šių priežasčių absoliutaus interneto neutralumo prisilaikyti nepakanka. Reikalingas interneto reguliavimas arba tam tikras minimalių saugumo ir patikimumo reikalavimų užtikrinimas.

Internetas, analogiškai kitoms telekomunikacijų technologijoms kaip PSTN ir GSM, yra valstybės priežiūros ir reguliavimo objektas. Tačiau reguliavimo tarnyboms interneto tinklas kaip priežiūros objektas yra nauja sritis. Dar nėra pakankamai praktikos kaip užtikrinti interneto veiklos patikimumą ir kokybę. 2, 3 skyriuose pateiktos tinklo topologijos bei kritinių elementų analizės metrikos leidžia vertinti regioninio interneto tinklo infrastruktūros patikimumą. Tai laikytina kiekybiniu ir kokybiniu įvertinimu. Be to, atsižvelgiant į praktinių tyrimų rezultatus, kyla poreikis veiksams ir priemonėms, kurios galėtų kontroliuoti ir gerinti tinklo infrastruktūros patikimumą.

Tokių priemonių tikslas būtų sustiprinti regiono interneto tinklo infrastruktūros saugumą ir patikimumą, vykdant kritinių tinklo funkcijų priežiūrą ir stiprinimą. To neužtikrinus kyla interneto veiklos trikdžių rizika, kas gali iššaukti interneto nepasiekiamumą didelei grupei vartotojų, elektroninės valdžios paslaugų teikimo sutrikimus ir pan.

Ateities interneto architektūra taip pat yra svarbus aspektas nagrinėjant tinklo infrastruktūros patikimumo priemones. Interneto protokolas orientuotas į duomenų perdavimą realizuojamą tarp galinių taškų – serverio ir vartotojo (*end-to-end* principas). Jeigu tarkime vartotojas nr.1 atsisiunčia iš *youtube* serverio *video* failą, tame pačiame regione vartotojas nr.2 gali siųsti tą patį *video* failą atskirai ir netgi tuo pačiu laiko momentu. Tarkim tokių vartotojų regione vienu metu yra daug. Tas pats *video* atskirai siunčiamas daug kartų, todėl tinklo resursai (linijų pralaida) išnaudojami neoptimaliai. Paul S. 2010, 2011, FMIA-TT 2011, Allman M. 2007, Alduan 2010 darbuose konstruojama ateities interneto architektūra, kurios pagrindą sudaro turinys (*media*). Ji paremta dabartine hierarchine tinklo struktūra, kurioje ant dabartinės architektūros/topologijos (fizinis tinklas, serveriai su turiniu ir t. t.) atsiranda nauji tinklo architektūros lygiai 5.1 pav. Tai yra informacijos paieškos serverių ir paslaugų bei informacijos turinio paskirstymo serverių ir paslaugų lygiai. Tokios architektūros tinklo topologijos realizavimas bus ženkliai sudėtingesnis, todėl reikia įvertinti tai, kad tinklo topo-

logijos tobulinimas, jos saugumo ir patikimumo stiprinimas, atsižvelgtų į ateities architektūros pokyčius.

Veikia visa eilė mokslo projektų ruošiant bazę ateities interneto plėtrai. Tokių projektų tikslai yra viso globalaus tinklo pokyčių planavimas. Tačiau priemonių regiono ar valstybės suformuoto interneto tinklo (globalaus interneto kontekste tai būtų tik potinklis) saugumui, vientisumui ir kokybei užtikrinti rengimas yra atskiras ir mažai nagrinėtas mokslo darbuose klausimas.

5.1 pav. Ateities media interneto architektūra (Paul 2010)

Fig. 5.1. Future Media Internet network architecture

5.2. Išankstinio įspėjimo sistema

Išankstinio įspėjimo sistemos (IIS) naudojamos ir vystomos tokiose srityse kaip įspėjimai apie gamtos stichijas, cunamius ar žemės drebėjimus. IIS aliarmai skirti įspėti apie galimas nelaimes, imtis veiksmų nuostolius ir sugriovimams sumažinti (Grasso 2007). Tokios IIS pagrindinis principas yra sensorių, matuojančių, pavyzdžiui, žemės virpesius, signalai. Kritinė masė suveikusių sensorių iššaukia aliarmą. Šis principas gali būti panaudoti kuriant interneto tinklo infrastruktūros IIS. Tačiau internetui tik sensorių sistemos nepakanka arba ji negalės būti pakankamai veiksmi.

Regiono interneto tinklas yra sudėtinga, stochastiškai sujungtų potinklų sistema. Juose veikia skirtinga tinklo ir srautų maršrutizavimo įranga, skirtingi protokolai (IP, BGP, SNMP, HTTP ir kita). Bendra tokio komplikuoto tinklo kibernetinio saugumo situacija nėra žinoma. Be to, kaip jau buvo aptarta 1 skyriuje, auga saugumo incidentų/gedimų skaičius tinkle, kibernetinės atakos tapo kompleksinėmis, o jų žala tinklo infrastruktūrai išaugo taip pat. Kad įvertinti kibernetinio saugumo lygį, egzistuojančias grėsmes, kylančias kibernetines atakas, naudojamos IIS. IIS padeda aptikti grėsmes kaip galima anksčiau, išvengti ar sumažinti nuostolius, valdyti rizikas.

IIS naudojamos IPT savo tinklų apsaugai, kuri dažniausiai yra paremta paketų analize kibernetinių atakų prevencijai. Tačiau vertinant regiono tinklo aspektu, IIS realizacija yra sudėtingesnė. Tam įtakos turi dėl tarptinklinių sujungimų esantys dideli ir nestabilūs duomenų srautai, kurių duomenų paketų analizei reikėtų sudėtingos IIS. Tokiu atveju IIS dar ir įneštų nepriimtina duomenų perdavimo vėlinimą.

Vertinant regiono tinklo apimtyje, kibernetinių atakų skaičius ir jų tipų variacija yra dideli. Taip pat reikia įvertinti besikeičiančią ateities interneto architektūrą: išaugęs įrenginių prijungtų prie tinklo skaičius, išplėsta IP adresacija (IPv6 protokolas), debesų technologijos ir išaugęs perduodamų duomenų kiekis. Tradicinės IIS negali efektyviai veikti šių faktorių aplinkoje (Golling 2011), todėl regiono interneto tinklo IIS architektūra turi būti sukurta naujai.

5.2.1. Išankstinio įspėjimo sistemos analizė

Dažniausiai sutinkamas IIS realizavimo variantas yra naudojant įsibrovimo aptikimo sistemą IDS. Naudojamos kelios pagrindinės IDS technikos: nesuderintų veiksmų aptikimas, anomalijų aptikimas arba abiejų kombinacijos (Golling 2011, Ando 2007).

Pirmuoju variantu IDS realizuojama remiantis signatūromis. Signatūrą sudaro iš anksto žinomų informacinės sistemos programų nesankcionuotų veiksmų požymių duomenų bazė. Tai gali būti kenksmingo programinio kodo pavyzdžiai, nepriimtinių procesų aprašai ir pan. Duomenų srautas yra tikrinamas ir lyginamas su signatūromis. Sutapimo atvejų generuojamas įspėjimas. Interneto tinkluose duomenų srautas yra per didelis, kad IDS efektyviai veiktų nesukeliant vėlinimo, todėl dažnai naudojama ne viso paketo turinio, o tik duomenų paketų antraščių tikrinimas.

Anomalijų aptikimo IDS sistemos lygina procesus tinklo įrenginiuose ir (ar) informacinėje sistemoje su normaliuoju sistemos veiklos modeliu. Esamos tinklo duomenų srautų charakteristikos matuojamos ir lyginamos su aprašytais normalios veiklos požymiais (failų tipai, jų dydžiai, srautų apimtys per laiko matą ir pan.). Neatitikimai ar nestandartinė sistemos veikla indikuojami kaip anomalijos.

jos. Pažangiausiose šio tipo IDS panaudojamos save apsimokančių mašinų technikos su evoliuciniais algoritmais ir neuroniniais tinklais. Problemų kyla jeigu naudojama duomenų bazė su per daug „griežtomis“ charakteristikomis, anomalijų detektavimo IDS generuoja didelį skaičių klaidingų įspėjimų ir atvirkščiai.

Vertinant uždavinį sudaryti IIS skirtą regiono interneto tinklui, minėti IDS sprendimai negali tinkamai atlikti savo funkcijų:

a) duomenų srauto analizė gali aptikti, pavyzdžiui, tinklo perimetro skenavimo bandymus ar kenksmingą programinį kodą, nes jis būna tipinis (yra žinomas tokio kodo branduolys). Tačiau tikslių atakų ar įsilaužimo į konkretų tinklo infrastruktūros elementą detektuoti IDS tiksliai nesugeba (Shimoda 2007);

b) IDS veikla dažniausiai remiasi duomenų paketų analize, tačiau interneto tinkle duomenų srautai yra per dideli apdoroti IDS. Reikalingi duomenų buferavimo metodai, o tai yra ekonomiškai neefektyvu dėl didelės didelių investicijų fizinei įrangai poreikio (Dharmapurikar 2003);

c) IDS sistemos yra ribotos ir nelanksios, nes paprastai naudoja tik *log* ir *flow* failus bei duomenų paketų antraščių analizę (Wang 2004). Be to, kriptografiškai koduojant siunčiamus duomenis (pavyzdžiui, HTTPS protokole) – IDS savo funkcijos atlikti negali.

Darytina išvada, kad aprašytam uždaviniui atlikti, reikalingas naujo tipo arba kombinuotos IIS sprendimas.

5.2.2. Išankstinio įspėjimo sistemos sprendimas

IIS keliama uždaviniai:

a) IIS skirta veikti regiono interneto tinkle, sudarytame iš apjungtų potinklų ir AS. IIS generuojami įspėjimo pranešimai (aliarmo signalai) taip pat turi būti aktualūs regiono interneto tinklo apimtyje;

b) kadangi regiono tinkle esančius potinklius valdo skirtingi operatoriai, tiesioginė intervencija, duomenų srautų perėmimas ir analizė, negalimas. Šaliai, ne tinklo savininkei, srautas yra neprieinamas, todėl aptartos standartinės IDS sistemos netinka;

c) siekiant tikslumo bei klaidingų pranešimų mažėjimo, IIS turi analizuoti ir sisteminti informaciją iš įvairių šaltinių susijusių su tinklo būsenos stebėjimu bei grėsmių tinklo infrastruktūros saugumui.

IIS koncepcijos kūrimui 5.2 pav. pasinaudota sprendimais aprašytais 1, 3, 4 skyriuose (Rainys 2006; Kajackas, Rainys 2010; Kajackas, Rainys 2011). Schemos viršutinėje dalyje yra tinklų infrastruktūra ir objektai, kurie generuoja informaciją IIS veiklai. Tai yra duomenų generavimo lygis. Jame egzistuoja automatinis techninės informacijos generavimas iš sensorių. Taip pat subjektai, kurie teikia pranešimus apie įvykusį incidento faktą bei pažeidžiamumų tyrimų laboratorijų informacijos duomenų bazės. Šioje vietoje įvedama nauja, darbe nenagri-

nėta, informacijos rūšis – IS ir jų taikomųjų programų pažeidžiamumai. Egzistuoja didelis skaičius tokių duomenų bazių. Jos yra uždarnos (specifinės) arba viešai prieinamos. Kadangi aptinkamų IS pažeidžiamumų programose bei tinklo įrangoje yra daug, duomenų bazių įrašai kategorizuojami pagal operacinių sistemų tipą, įrangos gamintoją ir pan. (Sufatrio 2004). Pažeidžiamumo įrašas paprastai turi savyje pažeidžiamos sistemos vietos aprašą, vertinimą dėl pasekmių, kurias gali sukelti piktavališkas pažeidžiamumo išnaudojimas ir egzistuojančios priemonės pažeidžiamumo pašalinimui.

Duomenų analizės lygis skirtas informacijos surinkimui ir analizei. SNMP stebėsenos sistema apdoroja duomenis iš sensorių esančių kritiniuose tinklo infrastruktūros elementuose. Sistemos veikimo principai aprašyti 3 skyriuje. Šiame etape analizuojama informacija parodo tinklo gedimus, srautų perdavimo sutrikimus. Tokios informacijos pagrindu turėtų būti ieškoma tinklo gedimo priežasčių, ji galėtų būti koreliuojama su informacija iš kitų šaltinių tam, kad identifikuoti priežastis sukeliančias gedimus tinkle.

5.2 pav. IIS sistemos koncepcija (prototipas)

Fig. 5.2. Conceptual implementation of early warning system

Kitas IIS informacijos šaltinis – CERT, aptartas 1 skyriuje. CERT incidentų tyrimai vykdomi pagal AS operatorių pranešimus arba iš *honeypot* tipo sensorių. Incidentų poveikis tinklo infrastruktūrai gali skirtis, todėl šioje vietoje analizuojama ar incidentas (pavyzdžiui, naujas kompiuterinis virusas) gali išplisti į kitas AS ir sukelti didelio skaičiaus IS veiklos sutrikimus.

Pažeidžiamumų analizės objekte yra svarbu nustatymai, pagal kuriuos analizuojami pažeidžiamumai susiję su įrenginiais ir programomis naudojamomis regioninio interneto tinklo infrastruktūroje. Nustačius susijusius pažeidžiamumus, vertinama galima jų įtaka tinklo infrastruktūrai ar kibernetinių atakų realizavimo galimybės.

Ispėjimo iniciavimo lygyje analizuojama informacija iš aukštesnio lygmens objektų ir priimamas sprendimas(ai) dėl ispėjimo reikalingumo. Sprendimas dėl ispėjimo formavimo gali būti priimtas gaunant informaciją iš vieno šaltinio arba informacija iš kelių šaltinių koreliuojama ieškant ryšio(ių) tarp jų. Pavyzdžiui, esant informacijai apie pažeidžiamumą maršrutizavimo įrangoje ir duomenims iš CERT apie įvykusius incidentus ir (ar) duomenims iš stebėsenos sistemos apie gedimus tarptinkliniuose sujungimuose, priimamas sprendimas dėl aliarmo iniciavimo. Kad ispėjimo formavimo procesas būtų efektyvus, svarbu, kad informacija iš aukštesnio lygmens būtų pateikta kaip galima greičiau.

Sprendimo priėmimo objekto tikslas yra, pagal informaciją iš trijų objektų (duomenų analizės lygis), įvertinti tikimybę įvykti įvykiui S , kuris turės neigiamų pasekmių tinklo infrastruktūrai. Nustatoma, kad sprendimas dėl aliarmo iniciavimo įvyks kai bus viršytas kritinis informacijos apie įvykio S tikimybę $S'(t)$ lygis a .

Tikimybės $S'(t)$ vertinime atsiranda neteisingo sprendimo (klaidos) $\varepsilon(t)$ tikimybė (Grasso 2007). Gali susidaryti dviejų rūšių klaidos: neįvykęs aliarmas $\varepsilon_{na}(t)$, kai sprendimas dėl ispėjimo formavimo nebuvo priimtas, tačiau pagal pasekmes tinklo infrastruktūrai aliarmas buvo reikalingas; klaidingas aliarmas $\varepsilon_{ka}(t)$, kai aliarmas buvo realizuotas, tačiau situacija dėl neigiamų pasekmių tinklo infrastruktūroje nesusiformavo. Sprendimo priėmimo objektas, įvertinantis tikimybės neapibrėžtumą ir priimtų sprendimų pasekmes, turėtų sumažinti $\varepsilon_{na}(t)$ ir $\varepsilon_{ka}(t)$ aliarmų įvykius. Nuo informacijos patenkančios į objektą kiekio ir kokybės keičiasi tikimybės neapibrėžtumas ir $\varepsilon(t)$.

$$P_{ka}(t) = P[S \leq a | S'(t)] \quad (5.1)$$

$$P_{na}(t) = P[S > a | S'(t)] \quad (5.2)$$

Klaidingo aliarmo tikimybė $P_{ka}(t)$ laiko momentu t yra tikimybė, kad įvykiu S įvertis bus mažesnis-lygus kritiniam lygiui a , pagal EWS duotuoju momentu operuojamą informaciją apie spėjamą tikimybę $S'(t)$, priimant, kad buvo priim-

tas sprendimas dėl aliarmo. Neįvykusio aliarmo tikimybė $P_{na}(t)$ yra tikimybė, kad įvykio S įvertis bus didesnis nei lygis a .

Siektina, kad sprendimo priėmimo objekte klaidos $\varepsilon(t)$ tikimybė būtų artina nuliui. Tam užtikrinti įvedamas tinklo infrastruktūros virtualizacijos objektas (5.2 pav.). Jo tikslas yra sprendimo priėmimo objekte apdorojamą informaciją apie įvykius sumodeliuoti virtualioje tinklo infrastruktūros aplinkoje, tokiu būdu patvirtinant arba paneigiant tikimybę įvykti įvykiui $S'(t)$. Tinklo infrastruktūros virtualizacijos sprendimai ir taikymai nagrinėti 4 skyriuje.

Duomenų bazė (DB) yra aliarmų archyvas. Jeigu sprendimo priėmimo objekte susidaro situacija atitinkanti ankstesnius įvykius iš DB, toliau sektini veiksmai pagal analogiją.

Aliarmo sklaidos objekto tinklas yra perduoti (paskleisti) informaciją apie kritinę situaciją. Šioje vietoje svarbu komunikacijos kanalo pasirinkimas (tai gali būti GSM tinklo SMS pranešimai ar dedikuotas tinklalapis internete) bei tikslinė adresatų grupė (pavyzdžiui IPT ar AS valdytojai).

Rezumuojant galima teigti, kad sprendimo priėmimo objekto efektyvumą lemia: *laikas t* per kurį informacija pasiekia objektą (trumpas t laikotarpis sudaro geresnes galimybes reagavimo veiksams); aliarmo *patikimumas* (maksimaliai sumažinta klaidos $\varepsilon(t)$ tikimybė); prevencinių veiksmų *tikslumas* (IIS suformuotame įspėjime numatytos IS atnaujinimų ir koregavimų rekomendacijos).

5.2.3. Išankstinio įspėjimo sistemos taikymas

Dėl šalies interneto tinklo savybių, tokių kaip sava kalba, tinklo topologija, IS charakteristikos ir pan., IIS taikymas praktikoje sutinkamas atskiruose regionuose.

Lietuvoje IIS kuriama Ryšių reguliavimo institucijos bazėje. Kadangi ši institucija atlieka nacionalinio CERT funkcijas, IIS turi privalumą disponuoti informacija apie saugumo incidentus regiono IPT tinkluose. Padengiamas incidentų tyrimo objektas duomenų analizės lygyje (5.2 pav.). Tarpvalstybinių sutarčių pagrindu IIS turi priėjimą prie didžiųjų IS kompanijų (tokių kaip *Microsoft*) programų pažeidžiamumų duomenų bazių (pažeidžiamumų analizės objektas 5.2 pav.). Šioje IIS pritaikius aukščiau sudarytą sprendimų priėmimo modelį, IIS veikia taptų labiau preciziška.

5.3. Organizacinės priemonės

5.3.1. Incidentų valdymo efektyvumas

Efektyvus reagavimas į saugumo incidentus yra svarbus ir kritiškai reikalingas tinklo operatoriui procesas, kad būtų užtikrintas veiklos tęstinumas ir QoS. Naujajamas incidentų valdymo CERT modelis leidžia minimizuoti incidento ar kibernetinės atakos poveikį tinklo infrastruktūrai bei atstatyti prarastą QoS.

Lietuvoje CERT modelis pirma kartą įgyvendintas 1998 metais Lietuvos mokslo ir studijų institucijų kompiuterių tinkle *LITNET*. *LITNET*-CERT pagrindinė paskirtis – mažinti grėsmes, kylančias dėl *LITNET* tinkle teikiamų paslaugų saugumo pažeidimų (*LITNET* 2011). 2006 metais veiklą pradėjo Lietuvos Respublikos nacionalinis elektroninių ryšių tinklų ir informacijos saugumo incidentų tyrimo padalinys (*CERT-LT*), kuris atlieka Lietuvos interneto tinklų ir informacijos saugumo incidentų tyrimus, veiksmų koordinavimą sprendžiant incidentus, rengia rekomendacijas apie grėsmes (*RRT* 2011). *CERT-LT* atlieka incidentų valdymą visuose regiono interneto AS (5.1 lentelė).

5.1 lentelė. Incidentų statistika Lietuvos interneto AS tinkle

Table 5.1. Incidents statistics within Lithianian internet AS network

Laikotarpis	Registruotų incidentų skaičius
2006	93
2007	225
2008	343
2009	12588
2010	10050

Svarbu pastebėti, kad 2009 metais *CERT-LT* organizacinėje struktūroje įdiegtas optimizuotas CERT modelis, aprašytas šio darbo 1 skyriuje. Organizacinės CERT modelio priemonės sudarė sąlygas ženkliai padidinti reagavimo į incidentus skaičių. Statistiškai apie 37 kartus (5.1 lentelė).

CERT modelis orientuotas reaguoti į saugumo incidentus, t. y. į bet kurio tipo incidentus keliančius grėsmę informacinei sistemai, tinklui ar perduodamos juo informacijos saugumui. Tačiau incidentu keliamos pasekmės tinklo infrastruktūrai, gali ženkliai skirtis priklausomai nuo incidento pobūdžio. Nagrinėjant šio skyriaus kontekste, priežiūros/reguliavimo institucijos veiksmai reikalingi tada, kai kyla rizika interneto tinklo funkcionalumui/junglumui. Tinklo pažeidžiamumo lygiui įvertinti siūlo remtis slenksčiais aprašytais 5.2 lentelėje.

Svarbu išlaikyti fizinį tinklo infrastruktūros saugumą. Kabeliai, maršrutizatoriai ir kita tinklo įranga turi būti tinkamai apsaugota nuo vandalizmo atvejų, vagysčių ir t. t.

Prie fizinio saugumo reikia priskirti ir elektros energijos tiekimo užtikrinimą tinklo infrastruktūros elementams. Standartiškai dyzeliniai generatoriai rezerviniam telekomunikacijų mazgų maitinimui nustatyti 72 h veikimui (Clarke 2010).

5.2 lentelė. Tinklo pažeidžiamumo rizikos slenksčiai

Table 5.2. AS types distribution

	< 2 val.	> 2 val.	> 4 val.	> 6 val.	> 8 val.
< 2 % vartotojų	nedidelė	nedidelė	nedidelė	vidutinė	didelė
> 2 % vartotojų	nedidelė	nedidelė	vidutinė	didelė	didelė
> 5 % vartotojų	nedidelė	vidutinė	didelė	didelė	didelė
> 10 % vartotojų	vidutinė	didelė	didelė	didelė	didelė
> 15 % vartotojų	didelė	didelė	didelė	didelė	didelė

5.3.2. Topologijos balansavimas

Darbe (Wu 2007) analizuojant interneto maršrutizavimo sisteminius ypatumus ir pažeidimų modelius padarytos išvados, kad tinklo topologija turi patikimumo trūkumų vietose kur tinklo segmento pralaida siauresnė nei turėtų būti pagal pikinius duomenų srautus. Taip pat patikimumas nukenčia dėl įvykstančių maršrutizavimo tarp AS klaidų.

Analizuojant interneto infrastruktūrą 2 skyriuje nustatyta, kad atlikus AS klasifikaciją didžioji dalis Lietuvos interneto tinklo topologijoje yra Vartotojiško AS tipo (81 %), o ryšių tipų klasifikacija parodė, kad Lietuvos interneto infrastruktūroje vyrauja lygiaverčių mainų tipo sąryšiai tarp AS (76 %). Daroma išvada, kad Lietuvos interneto tinklo infrastruktūra susiformavusi neproporcingai, tai sukelia papildomas rizikas tinklo veiklos patikimumui.

Didelio masto kibernetinių atakų (PAAA) prevencijai CERT modelis nėra pakankamai efektyvus (Nazario 2010). Kibernetinių atakų eksperimentai Lietuvos interneto infrastruktūrai (4 sk.) patvirtina tokias prielaidas. Tokiu atveju alternatyvus rezervinis jungčių su tarptautinėmis AS tinklas būtų efektyvus sprendimas. Toks tinklas regiono interneto perimetro apsaugai laikomas kaip

rezervinis ir aktyvuojamas (leidžiama prisijungti ir naudotis IPT), kai EWS registruoja reikšmingus tinklo infrastruktūros pažeidimus.

Atsižvelgiant į tinklo topologijos analizę ir atliktų tyrimų rezultatus, reikia siekti subalansuoti tinklo topologiją. Tam pasiekti siūlomos sekančios priemonės:

1. Padidinti Tranzitinių AS ir tranzito ryšio linijų santykį bendroje tinklo topologijoje.

Tinklo topologijoje dominuoja Vartotojiško tipo AS, kurių junglumas nusileidžia Tranzitinėms AS. Lygiaverčių mainų linijoms galioja tas pats principas. Papildomas tranzitinių jungčių įvedimas į regiono tinklo infrastruktūrą, fiziškai padidintų Vartotojiško tipo AS junglumą. Kitas metodas yra lygiaverčių mainų linijos tipą pakeisti tranzitine. Taip pagerėtų tarptinklinių sujungimų charakteristikos, duomenų srautai turėtų daugiau perdavimo kelio variantų.

2. Nustatyti tranzito ryšio linijas, kuriose realūs duomenų srautai 50-ia ar mažiau procentų išnaudoja maksimalias linijų pralaidas.

Sudaryti regiono interneto tinklo valdymo planą, kuris tokias linijas išnaudotų esant netipiškai išaugusiems duomenų srautams tinkle (pavyzdžiui, didelio masto kibernetinių atakų atveju) ar dėl eilės elementų gedimų tinkle susidarius perkrovoms. Esant kritiniam situacijai tinkle, tokių linijų operatoriai (IPT) turėtų priimti ir tranzitu praleisti duomenų srautus iš tų IPT, kurių turimų veikiančių linijų pralaidumai nepakanka. Tokio plano veikla užtikrintų regiono tinklo vientisumo palaikymą.

3. Praplėsti tarptautinių kanalų pralaidą.

Regiono tarptinklinių sujungimų su kitų regionų AS skaičius ir jų pralaida yra ribota. Egzistuoja tikimybė, kad dėl kibernetinių atakų bendra tokių jungčių pralaida bus išnaudota maksimaliai. *Botnet* tinkluose gali veikti keletas šimtų tūkstančių nuotoliniu būdu valdomų pažeistų kompiuterių. Jeigu priimtume, kad vienas toks kompiuteris generuoja bent 1 Mbit/s srautą atakos metu, sąlyga, kad bendras Lietuvos regiono tarptautinių kanalų pralaidumas tyrimo metu buvo 60 Gbit/s būtų patenkinta prie 60 tūkstančių *botnet* tinklo. Todėl tokios atakos ir jos poveikio regiono tinklui tikimybė yra reali. Minėtų jungčių pralaida turėtų būti praplėsta arba rezerviniai pralaidumai paruošti atvejams kai reikia akumuliuoti netipinius duomenų srautus.

5.3.3. Interneto protokolų saugumo plėtiniai

Gerai žinoma, kad DNS yra vienas pagrindinių interneto protokolų, užtikrinantis domenų vardų sąryšį su IP adresacija. DNS protokolo apsaugos pagrindinė spraga yra autentifikacijos trūkumas. Ši problema sprendžiama įvedant autentifikaciją ir duomenų vientisumo apsaugą bei naudojant perduodamų duomenų šifravi-

mą (Arends 2004). DNS protokolo saugumo plėtinys DNSSEC (angl. *Domain Name System Security Extensions*) sprendžia šį uždavinį.

DNSSEC sistema veikia skaitmeniniu būdu pasirašant atsakymus į DNS paiešką, naudojant viešojo rakto kriptografiją (Lammle 2009). Kad įgyvendinti tai keletas naujų DNS įrašų buvo sukurta įskaitant RRSIG, DNSKEY, DS ir ns DNS įrašus. Kuomet naudojama DNSSEC, kiekvienas atsakymas į DNS užklausą turės RRSIG DNS įrašą. RRSIG įrašas yra skaitmeninis parašas, naudojamas atsakymams iš DNS šaltinio. Skaitmeninis parašas gali būti patikrintas, nustatant tinkamą viešąjį raktą, kuris yra DNSKEY įrašas. Pagal gautus rezultatus apsaugotas DNS klientas gali nustatyti ar gautas atsakymas iš DNS serverio yra geras (saugus), taip pat ar DNS serveris palaiko DNSSEC, bei nustatyti ar yra padaryta kokia tam tikra klaida. Teisingas DNSKEY įrašas yra nustatomas autentifikavimo grandinėje, nustatant teisingą viešą raktą. Šis viešas raktas gali būti panaudotas nustatyti DS (designated signer) įrašą. DS įrašas pagrindiniame domene (DNS zone) toliau gali būti naudojamas nustatant DNSKEY įrašą subdomene, kur toliau gali turėti kitus DS įrašus nustatant tolimesnius subdomenus.

DNSSEC protokolas nėra plačiai taikomas, nes jis neišsprendžia visų DNS protokolo problemų. Pagrindinės problemos siejamos su programinės įrangos suderinamumas su DNSSEC. Kadangi DNSSEC yra gan nauja technologija todėl programinės įrangos palaikymas skiriasi nuo DNS technologijos palaikymo. Šiuo metu yra labai mažai programinės įrangos kuri galėtų visiškai palaikyti DNSSEC. Protokolas reikalauja nuolatinio administravimo. Kuomet nenaudojama DNSSEC, užtenka sukonfigūruoti vardų serverį ir užregistruoti domenų. DNSSEC parašai galioja tik tam tikrą laikotarpį ir turi būti atnaujinami. Raktai naudojami parašams turi būti periodiškai keičiami.

DNSSEC suderinamumo problemos su esamais sprendimais. DNSSEC gali susidurti su tokiomis problemomis, kaip dinaminiai atnaujinimai, DNS valdymo programomis, specialios konfigūracijos Spilt-DNS, bei maršrutizatoriai ir ugniasienės kurios nepalaiko DNSSEC.

DNSSEC standartizavimas nėra visiškai baigtas. Techninio realizavimo dalys DNSSEC yra dauguma standartizuotos, tačiau organizavimo ir administravimo standartizavimo užbaigimo dar nėra. Reikia standartizuoti tokius dalykus kaip rakto paskirstymas, rakto kaitaliojimas ir perėjimas nuo vieno vardų serverio prie kito.

Internete naudojamas maršrutizavimo BGP protokole egzistuoja saugumo spragos (Sriram 2006). Incidentas, kai 2010 metais eksperimento būdu inicijuotas neįprastai didelis fiktyvių maršrutų lentelių atnaujinimas, sukėlė didelio skaičiaus maršrutizatorių gedimus (Hall 2011). Tinkle jie nebuvo matomi (kaimyniniai maršrutizatoriai neturėjo jų pasiekiamumo informacijos), todėl adresuoti duomenys jų nepasiekdavo. Incidento afektas truko apie 2 h.

BGP protokolas yra pagrindinis interneto tarptinkliniams sujungimams organizuoti tarp AS. AS maršrutizatoriai keičiasi informacija (sujungimų lentelėmis) su kitomis AS, kurias jie gali tiesiogiai pasiekti. BGP protokolo pagrindu vykstantis maršrutizavimo lentelių atnaujinimas nėra centralizuotai valdomas. Sujungimų lentelės iš esmės yra IP adresacijos blokai. Informacijos apsikeitimo grandinė tęsiasi nuo vienos AS į kitą, su kiekviena AS numatytųjų maršrutų apimtis didėja. Joks kitas protokolas junglumui nėra naudojamas. BGP protokolo pažeidžiamumai susiję su nenumatyta sąlyga maršrutizavimo lentelių tikrumui patikrinti (Zao 2002) ir nagrinėti 4 skyriuje.

BGP pažeidžiamumo problematika spręsta protokolo saugumo plėtiniais: S-BGP (Kent 2003) ir soBGP (White 2003). Iš kurių BGPSEC (Bush 2011) sprendimas IPT pradedamas taikyti praktikoje. BGPSEC viešojo rakto infrastruktūrą, kuri užtikrina maršrutų sietį su AS bei įveda kodavimą. Atliekama kelio autorizacija, kuri numato, kad kalias į AS x iš tikro priklauso šio AS numatytajai IP adresacijai x . BGPSEC apsaugo nuo AS, nurodančių neteisingus kelius ar AS neteisėtai įterpiančių save į numatytąjį kelio maršrutą.

5.4. Penktojo skyriaus išvados

1. Interneto infrastruktūros stochastinis vystymasis remiantis neutralumo principais neužtikrina reikalaujamo patikimumo. Reikalingos sisteminės ir operatyvinės priemonės užtikrinti minimalius tinklo saugumo ir patikimumo reikalavimus.

2. Siūloma prevencinė priemonė, išankstinio įspėjimo sistema (IIS), apjungia interneto topologijos, kritinių tinklo infrastruktūros elementų bei kibernetinių atakų simuliacijų tyrimų rezultatų principus. Sudaryta IIS sistema remiasi interneto infrastruktūrai koncepcija paremta pažeidžiamumų analizės, CERT incidentų tyrimais bei SNMP stebėsenos priemonių naudojimu.

3. IIS aliarmo sprendimo priėmimo objekto efektyvumą lemia: *laikas t per kurį informacija pasiekia objektą (trumpas t laikotarpis sudaro geresnes galimybes reagavimo veiksams)*; aliarmo *patikimumas* (maksimaliai sumažinta klaidos $\varepsilon(t)$ tikimybė); prevencinių veiksmų *tikslumas*.

4. Regioninėje sistemoje sudarytas EWS modelis geriausiai tinkamas pozicionuoti nacionalinio ryšių reguliatoriaus bazėje. Taip būtų užtikrinamas nešališkumas ir visų sektorių IS (valstybinio, privataus) padengiamumas.

Bendrosios išvados

1. CERT modelis, efektyvus atskirų incidentų tyrime, nesudaro reikiamų prielaidų bendram interneto tinklo saugumo ir patikimumo klausimui išspręsti. Interneto pažeidžiamumai kelia poreikį kurti ir vystyti naujas, pro-aktyvias (prevencines) priemones, kurios sudarytų sąlygas kontroliuoti bei neutralizuoti kibernetinių incidentų bei atsitiktinių gedimų įtaką interneto veiklos patikimumui.
2. Interneto tinklo topologinės struktūros patikimumo analizei geriausiai tinka ryšių grafų sudarymo metodai, išskiriant mazgų laipsnius, mazgų laipsnių pasiskirstymą ir grupavimą.
 - 2.1. Pagal sudarytą autonominių sistemų (AS) ir jungčių klasifikaciją, Lietuvos interneto tinklo infrastruktūroje dominuoja Vartotojiško tipo AS (81 %) ir lygiaverčių mainų tipo sąryšiai tarp AS (76 %);
 - 2.2. Pagal mazgo laipsnių pasiskirstymą, Lietuvos interneto tinklo topologijoje yra tik vienas mazgas valdantis 47 tranzitinių jungčių, o 76 % mazgų valdo tik 1-2 tranzitines jungtis su kitomis AS.
3. Interneto tinklo infrastruktūros pažeidžiamumo analizė pagal kritinių ir η -kritinių mazgų, kritinių ir κ -kritinių linijų paieškos metodiką identifikuoja regiono interneto tinklo kritinius elementus bei sudaro prielaidas įvertinti jų kritiškumą. Šių elementų stebėseną paremta modeliu, naudojančiu SNMP protokolą, užtikrina centralizuotą tinklo infrastruktūros junglumo stebėseną.

Sudarytą metriką pritaikius Lietuvos interneto tinklo infrastruktūrai, identifikuoti 4 kritiniai mazgai ir 3 η – kritiniai mazgai, bei nustatytos 26 kritinės linijos ir 2 regiono interneto potinkliai, kurių tarpe yra κ – kritinės linijos.

4. Sukurtas virtualus regiono interneto tinklo modelis, kurio pagrindu, eksperimentiškai vertinamas tinklo patikimumas naudojant kibernetinių atakų scenarijus. Bandyje (kibernetinės atakos vektorius iš tarptautinių AS į nacionalinį regiono tinklą) nustatyta 3 AS (tinklo mazgai) ir 4 tarptinklinių sujungimų linijos, kurios patyrė maksimalias srautų apkrovas. Pažeistos jungtys ir AS sutampa su kritiniais mazgais ir kritinėmis linijomis nustatytais pagal teorinį modelį.
5. Išankstinio įspėjimo sistema ir tinklo topologijos balansavimo priemonės sudaro prielaidas sustiprinti regiono interneto tinklo infrastruktūros patikimumą.

Literatūra ir šaltiniai

Albert R., Barabasi A. L. 2002. Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of Modern Physics* 74, P. 47–97.

Alberts C., Dorofee A., Killcrece G., 2004. Defining Incident Management Processes for CSIRTs: A Work in Progress. Software Engineering Institute Carnegie Mellon University.

Alduán M., Álvarez F., Zahariadis Th., Nikolakis N., Chatzipapadopoulos F., Jiménez D., Manuel Menéndez J. 2010. Architectures for Future Media Internet. 2nd *International Conference on User Centric Media*.

Allman M., Christenson K., Nordman B., Paxson V. 2007. Enabling an Energy-Efficient Future Internet Through Selectively Connected End Systems. *HotNets-VI*.

Ando R., Takefuji Y. 2007. Parallel analysis for lightweight network incident detection using nonlinear adaptive systems. National Institute of Information and Communication Technology, Japan. *IFIP International Conference on Network and Parallel Computing - Workshops*, 7 p.

Arakawa Sh., Katou J., Murata M. 2003. Design method of Logical Topologies with Quality of Reliability in WDM Networks. Osaka University.

Arends R., Austein R., Larson M., Massey D., Rose S. 2004. DNS Security Introduction and Requirements. Internet Engineering Task Force.

- Ball P. 2002. Hubcaps Could Squash STDs. <http://www.nature.com/nsu/010823/010823-6.html>. Žiūrėta 2010-10-10.
- Barabási A., Albert R. 1999. Emergence of Scaling in Random Networks. *Science Magazine*, 286: 4509.
- Barabási A. 2002. The Physics of the Web. <http://physicsweb.org/article/world/14/7/9>. Žiūrėta 2010-10-10.
- Bondy J. A., Murty U. S. R. 1976. Graph Theory with Applications, P. 270.
- Brohée S., Faust K., van Helden J. 2009. Network Analysis Tools (NeAT) Tutorial. RSAT.
- Bush R. 2011. BGPsec Operational Considerations.
- Case J., Fedor M., Schoffstall M., Davin J. 1990. A Simple Network Management Protocol (SNMP). Internet Engineering Task Force, RFC 1157.
- Chandramouli R., Rose S. 2009. Secure Domain Name System (DNS) Deployment Guide. Recommendations of the National Institute of Standards and Technology. – P. 118.
- Chang H., Govindan R., Jamin S., Shenker S. J., Willinger W. 2004. Towards capturing representative AS-level Internet topologies. *Elsevier Computer Networks Journal* 44(6), P. 737–755.
- Clarke R., Knake R. 2010. Cyber War: The Next Threat to National Security and What to Do About It. *HarperCollins*.
- Chen Q., Hyunseok C., Govindan R., Jamin S., Shenker S., Willinger W. 2002. The Origin of Power Laws in Internet Topologies Revisited. *Proceedings of IEEE Infocom*.
- Condon E., Cukier M., He T. 2007. Applying Software Reliability Models on Security Incidents. Center for Risk and Reliability Department of Mechanical Engineering University of Maryland, College Park. *18th IEEE International Symposium on Software Reliability Engineering*, 10 p.
- Dharmapurikar S., Krishnamurthy P., Sproull T., Lockwood J. 2003. Deep packet inspection using parallel bloom filters. *IEEE High Performance Interconnects*, P. 44–51.
- Dimitropoulos X., Krioukov D., Vahdat A., Riley G. 2009. Annotations in Modeling Complex Network Topologies. *TOMACS*, Vol. 19, No. 4, Article 17.
- Dimitropoulos X., Krioukov D., Riley G. 2006. Revealing the Autonomous System Taxonomy: The Machine Learning Approach. *PAM workshop paper source*.
- Dohoon K. 2008. Reliability and Risk Analysis of the Internet: Case of Korean Internet Interconnections. *IEEE SoSE*.
- Dolev D., Sugih J., Osnat M., Shavitt Y. 2006. Internet resiliency to attacks and failures under BGP policy routing. *Computer Networks*, Vol. 50, Issue 16, P. 3183–3196.
- Ekmanis M. 2010. Graph Mining for Traffic Source Similarity Search. *Electronics and Electrical Engineering*. – Kaunas: Technologija – No. 5(101). – P. 39–42.

Erdős P., Rényi A. 1960. On the Evolution of Random Graphs. Publication of the Mathematical Institute of the Hungarian Academy of Sciences.

FMIA-TT 2011. Future Media Internet Architecture Reference Model. NextMEDIA consortium FP7 ICT-249065.

Gao L., Rexford J. 2000. Stable Internet Routing Without Global Coordination. ACM SIGMETRICS.

Garšva E., Skudutis J. 2004. Secure Computer System Design. *Electronics and Electrical Engineering*. No. 6 (55). P. 43–48.

Golling M., Stelte B. 2011. Requirements for a Future EWS – Cyber Defence in the Internet of the Future. *CCD COE Publications*.

Goodger A., Glorioso A., Lioy A., Katsumi B. 2011. Security & Resilience in Governmental Clouds. ENISA.

Grasso V., Beck J., Manfredi G. 2007. Automated decision procedure for earthquake early warning. *Journal of Engineering Structures*.

Hadgkiss J. 2006. Computer Security Incident Response Teams: Exploring the Incident Learning Capability. The University of Melbourne 83 p.

Hanley M., Dean T., Schroeder W. 2011. An Analysis of Technical Observations in Insider Theft of Intellectual Property Cases. Carnegie Mellon University, CMU/SEI-2011-TN-006.

Hall C., Clayton R., Anderson R., Ouzounis E. 2011. Inter-X: Resilience of the Internet Interconnection Ecosystem. ENISA.

Harju T. 2007. Graph Theory. University of Turku Lecture Notes.

Hawkinson J., Bates T. 1996. Guidelines for creation, selection, and registration of an Autonomous System. RFC 1930.

Herman I. 2000. Graph Visualization and Navigation in Information Visualization: a Survey, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 6.

Jeļinskis J., Lauks G. 2009. Detection of Trends of Internet Traffic using Sequential Pattern. *Electronics and Electrical Engineering*. – Kaunas: Technologija – No. 5(93). – P. 3–6.

Juknius J., Čenys A. 2011. BOTNET propagation via public websites detection algorithm. *Science – future of Lithuania: Electronics and electrical engineering*. Vilnius: Technika. ISSN 2029-2341. T. 3, nr. 1 (2011), p. 29–32.

Lauks G., Jeļinskis J. 2009. Metamodelling of Queuing Systems using Fuzzy Graphs. *Electronics and Electrical Engineering*. – Kaunas: Technologija – No. 4(92). – P. 61–64.

Lammle T. 2009. CompTIA Network+. *Wiley Publishing*, 892p.

Libicki M. 2009. Cyberdeterrence and Cyberwar. Rand Corporation.

LITNET 2011. <https://cert.litnet.lt/>. Žiūrėta 2010-10-10.

- Lohr S., Markoff J. 2006. Windows Is So Slow, but Why? *New York Times*.
- Magoni D., Pansiot J. 2002. Analysis of the Autonomous System Network Topology. <http://www.acm.org/sigcomm/ccr/archive/2001/jul01/ccr-200107-magoni.pdf>. Žiūrėta 2010-10-10.
- Mahajan R., Wetherall D., Anderson T. 2002. Understanding BGP Misconfiguration. In Proc. of ACM SIGCOMM.
- Medina A., Matta I., Byers J. 2000. On the Origin of Power Laws in Internet Topologies. ACM SIGCOMM Computer Communication Review 30. P: 18-28.
- Masurkar V. 2003. Responding to a Customer's Security Incidents—Part 1: Establishing Teams and a Policy. Sun Microsystems 24 p.
- Mirkovic J., Martin J., Reiher P. 2004. A Taxonomy of DDoS Attacks and DDoS Defense Mechanisms. UCLA CSD Technical Report. – No. 020018.
- Montoya J., Solé R. 2002. Small World Patterns in Food Webs. http://arxiv.org/PS_cache/cond-mat/pdf/0011/0011195.pdf. Žiūrėta 2010-10-10.
- Nazario J. 2010. Politically Motivated Denial of Service Attacks. CCDCOE.
- Norton W. B. 2002. The Art of Peering: The Peering Playbook. <http://arneill-py.sacramento.ca.us/ipv6mh/playbook.pdf>.
- Oliveira R., Pei D., Willinger W. 2010. The (in)Completeness of the Observed Internet AS-level Structure. *IEEE/ACM Transactions on Networking*.
- Oliveira R., Zhang B., Zhang L. 2007. Observing the Evolution of Internet AS Topology. *Proceedings of ACM SIGCOMM*.
- Owezarski P., Larrieu N. 2006. Measurement Based Approach of Congestion Control for enforcing a robust QoS in the Internet. LAAS-CNRS 7, IEEE, 0-7695-2649-7.
- Pavilanskas L., Statkus A. 2010. Evaluation of TCP Acknowledgment Mechanism Influence on Router Performance. *Electronics and Electrical Engineering*. – Kaunas: Technologija. – No. 7(103). – P. 95–100.
- Paul S., Pan J., Jain R. 2011. A Survey of the Research on Future Internet Architectures. *IEEE Communications Magazine*.
- Paul S., Pan J., Jain R. 2010. Architectures for the Future Networks and the Next Generation Internet: A Survey. *Computer Communications*.
- Paulauskas N., Garšva E. 2006. Computer System Attack Classification. *Electronics and Electrical Engineering* No. 2(66), P. 84–87.
- Provos N., Holz T. 2007. Virtual Honeypots: From Botnet Tracking to Intrusion Detection. *Addison-Wesley Professional*.
- Kajackas A., Pavilanskas L., Vindašius A. 2007. Synchronous Voice Applied Customer Access based on IEEE 802.11. *Electronics and Electrical Engineering*. – Kaunas: Technologija – No. 8 (80). – P. 23–28.

- Karygiannis A., Antonakakis E., Apostolopoulos A. 2006. Detecting Critical Nodes for MANET IDS. IEEE Computer Society.
- Karun H. H. 2006. Security incidents handling and organizational models. Gjøvik University College Department of Computer Science and Media Technology, 24 p.
- Kent S. T. 2003. Securing the Border Gateway Protocol. *The Internet Protocol Journal*, vol. 6, no. 3.
- Killcrece G., Kossakowski K. P., Ruefle R., Zajicek M. 2003. Organizational Models for Computer Security Incident Response Teams (CSIRTs). Software Engineering Institute Carnegie Mellon University.
- Knight S., Leblanc S. 2009. When not to pull the plug – the need for network counter-surveillance operations. *Cryptology and information security series* Vol. 3, P. 226–237.
- Kozierok C. M. 2005. The TCP/IP Guide. *No Starch Press*.
- Kulikovs, M. Petersons E. 2009. Modeling the On-line Traffic Estimator in OPNET. *Electronics and Electrical Engineering* – Kaunas: Technologija, – No. 7(95). – P. 82–86.
- Shimoda A., Goto S. 2007. Virtual Dark IP for Internet Threat Detection. APAN Network Research Workshop, p. 17–23.
- Smith D. 2005. Reliability, Maintainability and Risk. 7th ed.: Elsevier.
- Stubna M., Fowler J. 2002. An Application of the Highly Optimized Tolerance Model to Electrical Blackouts. <http://www.chaos.cornell.edu/hot3.pdf>. Žiūrėta 2010-10-10.
- Strogatz S. 2001. Exploring Complex Networks. *Nature* 410. P:268–276.
- Sriram K., Montgomery D., Borchert O., Kim O., Kuhn R. 2006. Study of BGP Peering Session Attacks and Their Impacts on Routing Performance. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*: Special issue on High-Speed Network Security, Vol. 24, No. 10, p. 1901–1915.
- Subramanian L., Agarwal S., Rexford J., Katz R. H. 2002. Characterizing the Internet hierarchy from multiple vantage points. IEEE Infocom paper source.
- Sufatrio, Yap R., Zhong L. 2004. A Machine-Oriented Integrated Vulnerability Database for Automated Vulnerability Detection and Processing. *LISA XVIII*, p. 47–58.
- Thonnard O. 2010. A multi-criteria clustering approach to support attack attribution in cyberspace. PhD Thesis, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications.
- The Swedish Urban Networks Association (SUNA) 2004. Robust nodes recommendations.
- Rekhter Y., Li T., Hares S. 2006. Border Gateway Protocol 4. RFC 4271, Internet Engineering Task Force.
- RRT 2011. <https://www.cert.lt/>. Žiūrėta 2010-10-10.
- Zhang B., Liu R., Massey D., Zhang L. 2005. Collecting the Internet AS-level topology. *ACM SIGCOMM Computer Comm. Review (CCR)*, 35(1):53–61.

- Zhao X., Pei D., Bush R., Massey D., Mankin A. 2002. Observation and Analysis of BGP Behavior under Stress. IMW'02, 2002.
- Wagner A. 2008. Robustness and Evolvability: A Paradox Resolved. *ProcBiolSci*, vol. 275, p. 91-100.
- Waldbusser S. 1995. Network Monitoring Management Information Base. Carnegie Mellon University.
- Wang K., Stolfo S. 2004. Anomalous payload-based network intrusion detection. *Recent Advances in Intrusion Detection*, p. 203–222.
- Watal A. 2011. A Co-Regulatory Approach to Reasonable Network Management. *Journal of Information Policy*, Vol. 1, pp. 155–173.
- Watts D., Sorogatz S. 1998. Collective Dynamics of Small World Networks. *Nature* 393 P:440-442.
- West-Brown M. J., Stikvoort D., Kossakowski K. P., 2003. Handbook for Computer Security Incident Response Teams (CSIRTs). Software Engineering Institute Carnegie Mellon University.
- White R. 2003. Securing BGP Through Secure Origin BGP. *The Internet Protocol Journal*, vol. 6, no. 3.
- Wiik J., Gonzalez J. J., Kossakowski K. P. 2005. Limits to Effectiveness in Computer Security Incident Response Teams.
- Wu J., Zhang Y., Mao Z., Shin K. 2007. Internet routing resilience to failures: analysis and implications. In *Proc. of ACM CoNext*.

Autoriaus publikacijos disertacijos tema

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Rainys R., 2006. Network and Information Security. Assessments and Incidents Handling // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija. – ISSN 1392 – 1215. – No. 6(70). – P. 69–74.

Kajackas A., Rainys R., 2010. Internet Infrastructure Topology Assessment // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija. – ISSN 1392 – 1215. – No. 7 (103). – P. 91–94.

Kajackas A., Rainys R., 2011. Estimation of Critical Components of Internet Infrastructure // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija. – ISSN 1392 – 1215. – No. 4(110). – P. 35–38.

Kajackas A., Rainys R., Aputis A., 2011. Assessment of Cyber Attacks Influence over Internet Network // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija. – ISSN 1392 – 1215. – No. 7(113). – P. 89–92.

Straipsniai kituose leidiniuose

Rainys R., 2006 How Can NRA Contribute to the Improvement of IT Security // Information Security Solutions Europe, Conference material. – P. 426–432.

Rainys R., 2007. Belaidžių tinklų saugumas įmonėse // Konferencijos INFORMACINĖS TECHNOLOGIJOS 2007 pranešimų medžiaga. – Kaunas, Kauno technologijos universitetas. – ISSN 1822-6337. – P. 234–239.

Priedai

A priedas. Pilna realios Lietuvos interneto tinklo topologijos schema

Stalviniai grafo žymėjimai: a) juodos linijos – tranzitinio tipo, žalios – lygiaverčių mainų; b) raudoni mazgai – regiono IPT, geltoni – tarptautiniai AS, juodi – *Tier-1* AS

B priedas. Virtualus Lietuvos interneto tinklo modelis kibernetinių atakų eksperimentams

B priedo duomenų masyvo lentelė

Tipas	Kiekis
Lygiaverčių mainų	373
Tranzitinės	117
Mazgai	57

Rytis RAINYS

REGIONŲ INTERNETO TINKLO INFRASTRUKTŪROS PATIKIMUMO TYRIMAI

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
elektros ir elektronikos inžinerija (01T)

INVESTIGATION OF THE REGIONAL INTERNET NETWORK INFRASTRUCTURE
DEPENDABILITY

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Electrical and Electronic Engineering (01T)

2011 11 11. 7,25 sp. I. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Ciklonas“
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius