



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Dronų sienos prasiveržimų tikimybinis modeliavimas taikant binominį skirstinį ir Monte Karlo simuliaciją

Baigiamasis magistro projektas

Artūras Solovjovas

Projekto autorius

Doc. Saulius Japertas

Vadovas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Dronų sienos prasiveržimų tikimybinis modeliavimas taikant binominį skirstinį ir Monte Karlo simuliaciją

Baigiamasis magistro projektas
Aeronautikos inžinerija (6211EX024)

Artūras Solovjovas

Projekto autorius

Doc. Saulius Japertas

Vadovas

Asist. Janina Jablonskytė

Recenzentė

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Artūras Solovjovas

Dronų sienos prasiveržimų tikimybinis modeliavimas taikant binominį skirstinį ir Monte Karlo simuliaciją

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Artūras Solovjovas

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kaunas technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Magistro baigiamojo projekto užduotis

Išduota studentui (-ei) – Artūriui Solovjovui

1. Projekto tema

Dronų sienos prasiveržimų tikimybinis modeliavimas taikant binominį skirstinį ir Monte Karlo simuliaciją

(Lietuvių kalba)

Probabilistic Modeling of Drone Wall Penetrations Using Binomial Distribution and Monte Carlo Simulation

(Anglų kalba)

2. Projekto tikslas ir uždaviniai

Tikslas: Sukurti ir pritaikyti inžinerinį tikimybinį modelį „dronų sienos“ sistemos efektyvumui įvertinti, apskaičiuojant prasiveržusių UAV skaičiaus pasiskirstymą ir viršijimo tikimybes, taikant binominį modelį ir Monte Karlo metodą.

Uždaviniai:

1. Apibrėžti nagrinėjamą sistemą ir modeliavimo uždavinį. Aiškiai aprašyti „dronų sienos“ sistemos veikimo principą ir modeliuojamą situaciją: kiek taikinių patenka į sistemą per pasirinktą laiko intervalą ir kokį maksimalų taikinių skaičių sistema pajėgi aptarnauti tuo pačiu metu;
2. Apibrėžti tikimybinius parametrus ir ryšius. Nustatyti ir aprašyti naudojamus parametrus: įeinančių taikinių (dronų) skaičių, sistemos pajėgumą (kanalų skaičių), taikinio aptikimo tikimybę, taikinio neutralizavimo tikimybę ir bendrą sėkmingo perėmimo tikimybę (aptikimas + neutralizavimas). Nurodyti, kaip šie dydžiai tarpusavyje susiję;
3. Sudaryti prasiveržimų skaičiavimo schemą, įvertinant pajėgumo ribojimą. Aprašyti, kaip apskaičiuojamas prasiveržusių taikinių skaičius, kai sistemos pajėgumas ribotas. Šioje vietoje leidžiama naudoti simbolius, kad būtų tiksliau:
 $N_a = \min(N, C)$ – taikinių skaičius, kuriuos sistema realiai gali aptarnauti (perimti);
 $N_u = \max(0, N - C)$ – taikinių skaičius, kurie lieka neaptarnauti dėl pajėgumo trūkumo;
 B – prasiveržusių taikinių skaičius (galutinis vertinamas rezultatas);
4. Pritaikyti binominį modelį ir apskaičiuoti pagrindinius rizikos rodiklius. Taikant binominį skirstinį apskaičiuoti prasiveržusių taikinių skaičiaus statistinius rodiklius: vidurkį ir sklaidą (dispersiją), taip pat viršijimo tikimybę – tikimybę, kad prasiverš ne mažiau kaip nustatytas taikinių skaičius (praktinė riba t). Papildomai nustatyti 95 % ir 99 % blogiausių atvejų ribas (kvantilius);
5. Atlikti scenarijų analizę ir įvertinti parametru įtaką prasiveržimų rizikai. Sudaryti kelis praktinius scenarijus, keičiant įeinančių taikinių skaičių, sistemos pajėgumą, aptikimo tikimybę ir

neutralizavimo tikimybę. Kiekvienam scenarijui apskaičiuoti viršijimo tikimybes (pvz., kad prasiverš ne mažiau kaip t taikinių) ir 95 % / 99 % ribas. Remiantis rezultatais nustatyti, kurie parametrai labiausiai didina prasiveržimų riziką;

6. Parengti Monte Karlo simuliaciją ir palyginti rezultatus su binominiu modeliu. Parengti Monte Karlo simuliacijos algoritmą prasiveržusių taikinių skaičiui įvertinti (atliekant didelį realizacijų skaičių) ir palyginti simuliacijos rezultatus su binominio modelio skaičiavimais pagal tuos pačius rodiklius: vidurkį, sklaidą, viršijimo tikimybę ir 95 % / 99 % ribas. Pateikti aiškia išvadą, kada binominis modelis duoda pakankamai tikslų rezultatą, o kada būtina taikyti simuliaciją (pvz., kai pajėgumo riba daro didelę įtaką rezultatui arba kai tikimybės nėra pastovios).

3. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

Atlikti C-UAS sistemos efektyvumo vertinimo analizę ir sudaryti tikimybinį UAV prasiveržimo modelį, taikomą „dronų sienos“ tipo sistemai. Modelyje įvertinti šiuos parametrus: atakuojančių UAV skaičių, sistemos pajėgumo ribą, aptikimo tikimybę, neutralizavimo tikimybę ir perėmimo bandymų skaičių. Parengti binominiu skirstiniu pagrįstą matematinį modelį ir Monte Karlo metodą, apskaičiuoti prasiveržusių UAV skaičiaus statistinius rodiklius, viršijimo tikimybes ir kvantilius. Atlikti scenarijų analizę, rezultatus pateikti lentelėmis ir grafikais, palyginti abiejų metodų rezultatus ir suformuluoti inžinerines išvadas apie sistemos efektyvumą prisotrinimo sąlygomis.

4. Papildomi reikalavimai projektui, ataskaitai ir jos priedams

„Netaikoma“

Projekto autorius	Artūras Solovjovas <i>(Vardas, Pavardė)</i>	2026-02-15 <i>(Data)</i>
Projekto vadovas	Saulius Japertas <i>(Vardas, Pavardė)</i>	2026-02-15 <i>(Data)</i>
Krypties studijų programų vadovas	Artūras Keršys <i>(Vardas, Pavardė)</i>	2026-02-15 <i>(Data)</i>

Solovjovas, Artūras. Dronų sienos prasiveržimų tikimybinis modeliavimas taikant binominį skirstinį ir Monte Karlo simuliaciją. Magistro baigiamasis projektas / vadovas Doc. Saulius Japertas; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Aeronautikos inžinerija (E14), Inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: kovos su nepilotuojamaisiais orlaiviais sistema (C-UAS), nepilotuojamieji orlaiviai (UAV), prasiveržimo tikimybė, binominis skirstinys, Monte Karlo simuliacija, sistemos efektyvumas, masinė dronų ataka, prisotinimo režimas.

Kaunas, 2026. 69 p.

Santrauka

Šiame magistro baigiamajame projekte vertinamas „dronų sienos“ tipo kovos su nepilotuojamaisiais orlaiviais sistemos efektyvumas masinės atakos ir sistemos prisotinimo sąlygomis. Nagrinėjamas prasiveržusių taikinių skaičius, kai sistemos veikimą riboja baigtinis pajėgumas, o pavienio taikinio perėmimo sėkmė priklauso nuo aptikimo ir neutralizavimo tikimybių.

Darbo tikslas – sudaryti ir pritaikyti tikimybinį modelį „dronų sienos“ sistemos efektyvumui įvertinti, apskaičiuojant prasiveržusių nepilotuojamųjų orlaivių skaičiaus pasiskirstymą ir viršijimo tikimybes, taikant binominį skirstinį ir Monte Karlo metodą.

Darbe atlikta literatūros analizė apie C-UAS sistemų architektūrą, masinių bepiločių orlaivių atakų keliamas grėsmes, sistemos prisotinimo reiškinių ir tikimybinio modeliavimo taikymą gynybos uždaviniuose. Remiantis literatūros ir empirinių duomenų analize sudarytas modelis, kuriame naudojami pagrindiniai įėjimo parametrai: atakuojančių taikinių skaičius N , sistemos pajėgumas C , aptikimo tikimybė P_d , neutralizavimo tikimybė P_k ir perėmimo bandymų skaičius m . Analitiniam vertinimui pritaikytas binominis skirstinys, o skaitiniam vertinimui parengtas Monte Karlo modeliavimas.

Tyrimo metu apskaičiuoti šie rodikliai: prasiveržusių taikinių skaičiaus vidurkis, dispersija, standartinis nuokrypis, viršijimo tikimybė ir 95 % bei 99 % kvantiliai. Baziniam scenarijui taikyti parametrai $N = 200$, $C = 200$, $P_d = 0,95$, $P_k = 0,90$, $m = 1$, kritinis prasiveržusių taikinių slenkstis $t = 30$, o Monte Karlo modeliavime atlikta $R = 20\ 000$ realizacijų. Papildomai atlikta scenarijų analizė, keičiant parametrus N , C , P_d , P_k ir m , siekiant įvertinti jų įtaką prasiveržimų rizikai.

Gauti rezultatai parodė, kad didžiausią įtaką prasiveržimų rizikai turi santykis tarp atakuojančių taikinių skaičiaus ir sistemos pajėgumo ribos. Didėjant sistemos apkrovai virš pajėgumo ribos, spartėja tiek vidutinio prasiveržusių taikinių skaičiaus, tiek viršijimo tikimybės ir kvantilių augimas. Nustatyta, kad vien vidutinės reikšmės nepakanka sistemos efektyvumui vertinti, todėl praktiniam rizikos įvertinimui būtina analizuoti ir blogesniųjų scenarijų rodiklius.

Binominio modelio ir Monte Karlo simuliacijos rezultatų palyginimas parodė, kad bazinio scenarijaus atveju abiejų metodų rezultatai yra artimi, todėl binominis modelis gali būti taikomas kaip bazinis analitinis C-UAS sistemos efektyvumo vertinimo metodas. Monte Karlo metodas yra tinkamesnis tada, kai reikia vertinti sudėtingesnius scenarijus, parametų kintamumą ir sistemos apkrovos poveikį prasiveržimų rizikai. Gauti rezultatai gali būti taikomi vertinant C-UAS sistemos pajėgumą, nustatant

kritines apkrovos ribas ir pagrindžiant inžinerinius sprendimus dėl sistemos efektyvumo masinės atakos sąlygomis.

Solovjovas, Artūras. Probabilistic Modeling of Drone Wall Penetrations Using Binomial Distribution and Monte Carlo Simulation. Masters's Final Degree Project / supervisor assoc. prof. Saulius Japertas; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Aeronautical Engineering (E14), Engineering Science.

Keywords: C-UAS, unmanned aerial vehicles, UAV, breach probability, binomial distribution, Monte Carlo simulation, system effectiveness, saturation regime.

Kaunas, 2026. 69 pages.

Summary

This master's final degree project evaluates the effectiveness of a "drone wall" type counter-unmanned aerial system under mass attack and system saturation conditions. The research focuses on the number of penetrating targets when system operation is constrained by finite capacity and the success of individual target interception depends on detection and neutralization probabilities.

The aim of the work is to develop and apply a probabilistic model for evaluating the effectiveness of a "drone wall" system by calculating the distribution of the number of penetrating unmanned aerial vehicles and exceedance probabilities using the binomial distribution and Monte Carlo simulation.

The thesis includes a literature review covering C-UAS architecture, threats posed by mass drone attacks, the saturation effect, and the application of probabilistic modeling to defense-related problems. Based on the literature review and empirical data, a model was developed using the following main input parameters: the number of attacking targets N , system capacity C , detection probability P_d , neutralization probability P_k , and the number of engagement attempts m . Detection probability scenarios were formed on the basis of the interval $P_d \in [0.234; 0.997]$ found in the literature, while the interpretation of system capacity was based on empirical data describing tracking channel limits and the number of simultaneously handled targets. The binomial distribution was used for analytical evaluation, and a Monte Carlo simulation model was developed for numerical evaluation.

The following performance indicators were calculated: the mean number of penetrating targets, variance, standard deviation, exceedance probability, and the 95% and 99% quantiles. The baseline scenario used the following parameters: $N = 200$, $C = 200$, $P_d = 0,95$, $P_k = 0,90$, $m = 1$, critical penetration threshold $t = 30$, and $R = 20\,000$ Monte Carlo realizations. In addition, scenario analysis was performed by varying N , C , P_d , P_k and m in order to assess their influence on penetration risk.

The results showed that the most important factor affecting penetration risk is the relationship between the number of attacking targets and the system capacity limit. When system load exceeds capacity, the mean number of penetrating targets, exceedance probability, and upper quantiles increase rapidly. The results also showed that the mean value alone is not sufficient for system effectiveness assessment, and that risk evaluation must include worst-case-oriented indicators.

The comparison of the binomial model and Monte Carlo simulation showed that, for the baseline scenario, the results of both methods are close, which means that the binomial model can be used as a baseline analytical method for C-UAS effectiveness evaluation. Monte Carlo simulation is more suitable when more complex scenarios, parameter variability, and the effect of system load on

penetration risk must be assessed. The obtained results can be used to evaluate C-UAS capacity, identify critical load limits, and support engineering decisions related to system effectiveness under mass attack conditions.

Turinys

Lentelių sąrašas	11
Paveikslėlių sąrašas	12
Santrumpų ir terminų sąrašas	13
Įvadas	15
1. Literatūros apžvalga	16
1.1. „Dronų sienos“ koncepcija ir C-UAS architektūra	16
1.2. Masinių UAV atakų reiškinys ir prisotinimas.....	16
1.3. Statistiniai ir empiriniai duomenys „dronų sienos“ parametrų parinkimui.....	17
1.3.1. „Prasiveržimo“ sąvoka: kas laikoma prasiveržimu ir kokiame laiko lange	18
1.3.2. C-UAS vertinimo rodikliai: ką realiai matuoja literatūra	19
1.3.3. Skaitiniai parametrai, reikalingi modeliui ir palyginimui.....	19
1.3.4. Prasiveržimų kilmė: neaptarnauti taikiniai ir nepavykę perėmimai	21
1.3.5. Modelio parametrų N , C , Pd , Pk ir m nustatymas iš empirinių duomenų	22
1.3.6. Empirinių duomenų kokybė, šališkumas ir ribotumai.	23
1.3.7. Empirinių duomenų panaudojimas rezultatų palyginimui.....	24
1.4. Tipinių atakos UAV klasių apžvalga	24
1.5. Modeliavimo metodų apžvalga	25
1.5.1. Tikimybiniai ir sistemos sėkmės modeliai	26
1.5.2. Grupinių UAV atakų ir sistemos pajėgumo modeliavimo metodai.....	27
1.5.3. Taikomi rodikliai ir jų ryšys su šio darbo tikslais.....	28
1.6. Binominio modelio taikymas gynybos sistemų analizėje	29
1.7. Monte Karlo metodo taikymas aviacijoje ir gynyboje.....	30
1.8. Literatūros apžvalgos išvada	30
2. Metodinė ir teorinė dalis	33
2.1. Modeliavimo uždavinio formalizavimas	33
2.1.1. Laiko langas ir analizės vienetas	34
2.1.2. Modelio įėjimo parametrai	35
2.1.3. Sistemos pajėgumo riba ir prisotinimo sąlyga.....	36
2.1.4. Vieno taikinio perėjimo sėkmės tikimybė	38
2.1.5. Modelio išėjimo dydžiai	39
2.1.6. Galutinė modeliavimo uždavinio formuluotė.....	41
2.2. Binominio modelio sudarymas ir taikymo prielaidos	41
2.2.1. Binominio modelio prielaidos	42
2.2.2. Binominio modelio formulavimas	42
2.2.3. Binominio modelio taikymo ribos	43
2.3. Monte Karlo metodo metodika	44
2.3.1. Monte Karlo metodo taikymo logika.....	44
2.3.2. Simuliacijos algoritmo schema.....	45
2.3.3. Monte Karlo metodo taikymo ribos.....	46
2.4. Matematinis modelis	47
2.4.1. Sistemos pajėgumo apribojimo įvedimas	47
2.4.2. Sėkmingo perėmimo tikimybės modelis	47
2.4.3. Prasiveržusių taikinių skaičiaus modelis	48
2.4.4. Rizikos rodikliai.....	49

3. Rezultatai ir jų analizė	51
3.1. Binominio modelio rezultatai.....	51
3.2. Monte Karlo simuliacijos rezultatai	57
3.3. Binominio modelio ir Monte Karlo rezultatų palyginimas	60
3.4. Dinaminės Monte Karlo simuliacijos modelis su apkrovos priklausomybe	63
Išvados	65
Literatūros sąrašas	66

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Literatūriniai ir empiriniai duomenys modelio parametrų parinkti	20
2 lentelė. Literatūroje pateikiami prasiveržimų rizikos vertinimo pavyzdžiai ir jų taikymas šiame darbe	31
3 lentelė. Scenarijų analizėje taikytos parametrų ribos	51
4 lentelė. Bazinio scenarijaus binominio modelio įėjimo parametrai	52
5 lentelė. Binominio modelio rezultatų suvestinė baziniam scenarijui	52
6 lentelė. Monte Karlo simuliacijos įėjimo parametrai baziniam scenarijui	57
7 lentelė. Monte Karlo simuliacijos rezultatų suvestinė baziniam scenarijui	58
8 lentelė. Binominio modelio ir Monte Karlo rezultatų palyginimas baziniam scenarijui	60

Paveikslėlių sąrašas

1 pav. Prasiveržusių UAV skaičiaus priklausomybė nuo atakuojančių UAV skaičiaus N	53
2 pav. Prasiveržusių UAV skaičiaus priklausomybė nuo perėmimo bandymų skaičiaus m	53
3 pav. Prasiveržusių UAV skaičiaus priklausomybė nuo perėmėjų skaičiaus m esant skirtingoms $Pd \times Pk$ reikšmėms	54
4 pav. Prasiveržusių UAV skaičiaus priklausomybė nuo aptikimo tikimybės Pd esant skirtingoms Pk reikšmėms	55
5 pav. Kombinuotas Pd ir Pk poveikio prasiveržusių UAV skaičiui atvaizdavimas	55
6 pav. Viršijimo tikimybės $P(B \geq t)$ priklausomybė nuo perėmimo bandymų skaičiaus m	56
7 pav. Monte Karlo simuliacijos būdu gauto prasiveržusių UAV skaičiaus empirinis pasiskirstymas baziniam scenarijui	58
8 pav. Monte Karlo būdu gauta viršijimo tikimybės $P(B \geq t)$ priklausomybė nuo kritinio prasiveržusių UAV slenksčio t	59
9 pav. Monte Karlo būdu gauto prasiveržusių UAV skaičiaus priklausomybė nuo perėmimo bandymų skaičiaus m	59
10 pav. Pagrindinių statistinių rodiklių palyginimas	61
11 pav. Viršijimo tikimybių palyginimas	61
12 pav. Prasiveržusių UAV skaičiaus priklausomybė nuo UAV atvykimo intensyvumo λ esant skirtingiems α ir β	64

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

UAV – nepilotuojamasis orlaivis;

UAS – nepilotuojamųjų orlaivių sistema;

C-UAS – kovos su nepilotuojamaisiais orlaiviais sistema;

DTI – aptikimas, sekimas ir atpažinimas;

RF – radijo dažnis;

EO – elektrooptinis;

IR – infraraudonasis;

ATR – automatinis taikinio atpažinimas.

Terminai:

Nepilotuojamasis orlaivis – orlaivis, kuriame nėra piloto ir kuris valdomas nuotoliniu būdu arba veikia autonomiškai.

Nepilotuojamųjų orlaivių sistema – visuma, apimanti nepilotuojamąjį orlaivį, valdymo priemones, ryšio kanalus ir kitus veikimui būtinus elementus.

Kovos su nepilotuojamaisiais orlaiviais sistema – technologinių ir organizacinių priemonių visuma, skirta nepilotuojamiesiems orlaiviams aptikti, sekti, atpažinti ir neutralizuoti.

Dronų siena – sąlyginis C-UAS sistemos modelis, naudojamas vertinti, kokia dalis atakuojančių taikinių gali būti perimta, o kokia dalis gali prasiveržti per sistemą.

Sistemos pajėgumas – didžiausias taikinių skaičius, kurį sistema gali aptarnauti per apibrėžtą laikotarpį arba vienu metu.

Prasiveržimas – atvejis, kai taikinyš nebuvo perimtas ir kirto saugomos sistemos ribą arba pasiekė ginamą zoną.

Prasiveržimo tikimybė – tikimybė, kad konkretus taikinyš arba tam tikras taikinių skaičius nebus perimtas ir prasiverš per sistemą.

Perėmimas – sėkmingas taikinio aptikimo, sekimo ir neutralizavimo procesas.

Aptikimo tikimybė – tikimybė, kad sistema nustatys taikinio buvimą stebimoje erdvėje.

Neutralizavimo tikimybė – tikimybė, kad aptiktas taikinyš bus sėkmingai sustabdytas, pažeistas arba sunaikintas.

Viršijimo tikimybė – tikimybė, kad prasiveržusių taikinių skaičius bus lygus arba didesnis už nustatytą ribinę reikšmę.

Binominis skirstinys – diskretusis tikimybinis skirstinys, aprašantis sėkmių arba nesėkmių skaičių baigtiniame bandymų skaičiuje, kai kiekvieno bandymo tikimybė laikoma pastovia.

Monte Karlo simuliacija – statistinio modeliavimo metodas, kai sistemos elgsena vertinama atliekant daug atsitiktinių realizacijų ir analizuojant gautų rezultatų pasiskirstymą.

Kvantilis – skirstinio reikšmė, žemiau kurios patenka tam tikra nustatyta rezultatų dalis.

Prisotinimo sąlygos – sistemos veikimo būseną, kai atakuojančių taikinių skaičius priartėja prie sistemos pajėgumo ribos arba ją viršija.

Įvadas

Pastaraisiais metais sparčiai augantis nepilotuojamųjų orlaivių (UAV) naudojimas civilinėje ir karinėje srityje padidino grėsmę saugomiems objektams, kritinei infrastruktūrai ir teritorijoms. Ypač didelį iššūkį kelia masinės ir koordinuotos UAV atakos, kai C-UAS sistema per ribotą laiką turi aptikti, sekti, identifikuoti ir neutralizuoti didelį taikinių skaičių. Tokiose situacijose sistemos efektyvumą lemia ne tik pavienių komponentų techninės charakteristikos, bet ir bendras sistemos pajėgumas veikti prisotinio režime.

Darbo aktualumą lemia vis dažnesnis UAV naudojimas kariniuose konfliktuose ir kritinės infrastruktūros apsaugos uždaviniuose. Praktika rodo, kad masinės UAV atakos gali perkrauti tradicines C-UAS sistemas, todėl tampa svarbu kiekybiškai vertinti sistemos efektyvumą ir prasiveržimų riziką prisotinio sąlygomis.

Šiame darbe nagrinėjama „dronų sienos“ koncepcija, kai kelių priemonių ir procesų visuma naudojama atskrendančių UAV srautui stabdyti. Net ir techniškai pažangiose sistemose egzistuoja tikimybinis neapibrėžtumas: taikynys gali būti neaptiktas, neidentifikuotas arba nesėkmingai neutralizuotas. Be to, esant dideliame UAV sraute, atsiranda sistemos pajėgumo riba, dėl kurios dalis taikinių lieka neaptarnauti. Dėl to reikalingas matematinis modelis, leidžiantis įvertinti prasiveržusių UAV skaičių ir su tuo susijusią riziką.

Darbo problema – realiose C-UAS sistemose prasiveržimų rizika dažnai vertinama nepakankamai įtraukiant sistemos pajėgumo apribojimus. Dėl to sudėtinga nustatyti, kada sistema dar veikia efektyviai, o kada pereina į prisotinio režimą. Inžineriniu požiūriu svarbu turėti kiekybinį modelį, leidžiantį apskaičiuoti prasiveržusių UAV skaičiaus pasiskirstymą, vidurkį, dispersiją, viršijimo tikimybes ir kvantilius.

Darbo naujumą sudaro tai, kad UAV prasiveržimų rizika vertinama viename modelyje sujungiant sistemos pajėgumo ribojimą, aptikimo ir neutralizavimo tikimybes bei Monte Karlo metodą blogesniųjų scenarijų analizei. Darbe papildomai vertinamos viršijimo tikimybės ir 95 % bei 99 % kvantiliai.

Tyrimo objektas – „dronų sienos“ tipo UAV aptikimo ir neutralizavimo sistemos efektyvumas, vertinamas pagal prasiveržusių taikinių skaičių pasirinktame laiko intervale.

Darbo tikslas – sukurti ir pritaikyti tikimybinį modelį „dronų sienos“ sistemos efektyvumui ir UAV prasiveržimų rizikai vertinti, taikant binominį skirstinį ir Monte Karlo metodą.

Darbe taikomi du pagrindiniai metodai: binominis modelis, leidžiantis analitiškai apskaičiuoti prasiveržusių UAV skaičiaus pasiskirstymą ir statistinius rodiklius, bei Monte Karlo metodas, naudojamas sudėtingesnių scenarijų ir prisotinio efektų analizei.

Darbą sudaro literatūros apžvalga, teorinė ir metodinė dalys, matematinio modelio sudarymas, scenarijų analizė, rezultatų palyginimas ir išvados.

1. Literatūros apžvalga

1.1. „Dronų sienos“ koncepcija ir C-UAS architektūra

„Dronų siena“ šiame darbe suprantama kaip vientisa kovos su nepilotuojamosiomis orlaivių sistemomis sistema, kurios paskirtis – per ribotą laiko langą aptikti, sekti, identifikuoti ir neutralizuoti UAV, o jos veiksmingumas vertinamas pagal prasiveržusių taikinių skaičių. Literatūroje pabrėžiama, kad tokių sistemų rezultatas priklauso ne nuo vienos techninės priemonės, bet nuo visos veikimo grandinės suderinamumo [1, 2]. Dėl to antidroninė sistema turi būti vertinama kaip vientisa architektūra, kurioje svarbi ne tik atskirų komponentų kokybė, bet ir jų tarpusavio sąveika, informacijos perdavimo sparta bei bendras sistemos pajėgumas [1–3].

C-UAS architektūra dažniausiai aprašoma kaip kelių funkcinių blokų visuma: aptikimo, sekimo, identifikavimo, sprendimų priėmimo ir neutralizavimo [1–3]. Aptikimo ir sekimo grandinėje naudojami įvairūs jutikliai – radarai, elektrooptinės ir infraraudonųjų spindulių sistemos, radijo dažnio bei akustiniai jutikliai [1, 3, 4]. Skirtingų jutiklių derinimas leidžia padidinti aptikimo patikimumą ir sumažinti klaidingų aptikimų tikimybę įvairiomis sąlygomis [1, 3, 4]. Tačiau vien jutiklių nepakanka – jų surinkta informacija turi būti sujungiama į bendrą situacijos vaizdą, leidžiantį laiku nustatyti taikinių prioritetus ir paskirstyti sistemos išteklius [2, 4, 5].

C-UAS sistemos veikimo logika grindžiama nuoseklia taikinio apdorojimo grandine: UAV pirmiausia turi būti aptiktas, po to sekamas, identifikuotas kaip grėsmė ir perduotas sprendimui dėl neutralizavimo [2, 6, 7]. Jeigu bent viename grandinės etape atsiranda klaida, vėlavimas arba nepakankamas tikslumas, mažėja bendras sistemos veiksmingumas [1, 2, 4]. Dėl to literatūroje pabrėžiama ne tik jutiklių kokybė, bet ir visos grandinės gebėjimas užtikrinti nenutrūkstamą taikinių apdorojimą [2, 5, 7].

Svarbus veiksnys yra sistemos pajėgumas. Net ir esant didelėms aptikimo bei neutralizavimo tikimybėms sistema negali apdoroti neriboto taikinių skaičiaus, nes ją riboja sekimo kanalų kiekis, sprendimų priėmimo sparta, neutralizavimo priemonių skaičius ir reakcijos laikas [2, 6, 7]. Kai atakuojančių UAV skaičius viršija sistemos galimybes, atsiranda prisotinimo režimas, kuriame dalis taikinių lieka neaptarnauti [2, 6, 7]. Tokia situacija ypač aktuali grupinių ir koordinuotų atakų metu, kai bendrą rezultatą lemia ne tik pavienio taikinio neutralizavimo tikimybė, bet ir sistemos pralaidumas pasirinktame laiko lange [2, 6].

Todėl „dronų sienos“ koncepcija šiame darbe nagrinėjama kaip vientisa architektūra, kurios veiksmingumą lemia dvi pagrindinės savybės: tikimybinė veikimo sėkmė atskiruose grandinės etapuose ir ribotas sistemos pajėgumas vienu metu apdoroti taikinius [1, 2, 6]. Toks požiūris leidžia pereiti nuo technologijų aprašymo prie kiekybinio sistemos veiksmingumo vertinimo skirtingomis atakos sąlygomis [2, 6, 7].

1.2. Masinių UAV atakų reiškinys ir prisotinimas

Masinės UAV atakos C-UAS sistemų kontekste suprantamos kaip situacijos, kai per ribotą laiko intervalą į ginamą erdvę patenka didelis skaičius taikinių, o sistema priversta vienu metu vykdyti jų aptikimą, sekimą, atpažinimą ir neutralizavimą [6, 7]. Tokiose situacijose sistemos veiksmingumas nebegali būti vertinamas kaip pavienio taikinio perėmimo uždavinys, nes lemiamą reikšmę įgauna

bendras taikinių srautas, sistemos išteklių paskirstymas ir gebėjimas per tam tikrą laiką apdoroti ribotą objektų skaičių [6–8].

Literatūroje pabrėžiama, kad masinių UAV atakų metu sistemos veiksmingumą riboja ne vien atskirų komponentų techninės charakteristikos, bet ir visos veikimo grandinės apkrova [6, 8]. Net jei radarai, optiniai jutikliai ar neutralizavimo priemonės atskirai pasižymi aukštu veiksmingumu, bendras rezultatas gali blogėti dėl riboto sekimo kanalų skaičiaus, sprendimų priėmimo delsos, operatorių apkrovos ar neutralizavimo priemonių kiekio [6–8]. Todėl svarbus tampa ne tik klausimas, ar sistema gali sunaikinti konkretų taikinį, bet ir kiek taikinių ji gali aptarnauti per pasirinktą laiką.

Šiame kontekste itin svarbi yra prisotinimo sąvoka. Prisotinimas suprantamas kaip sistemos veikimo režimas, kai atakuojančių taikinių intensyvumas viršija sistemos pajėgumą ir pradeda formotis neaptarnautų taikinių dalis [6, 7]. Tokiu atveju prasiveržimai atsiranda ne vien dėl nepavykusių perėmimų, bet ir dėl to, kad dalis UAV apskritai nepatenka į pilną perėmimo grandinę [6, 7, 9].

Prisotinimo režime sistemos elgsena tampa nelinearinė. Kol taikinių skaičius neviršija sistemos galimybių, prasiveržimų skaičius daugiausia priklauso nuo pavienių perėmimų sėkmės [6, 7]. Tačiau apkrovai artėjant prie ribos net ir nedidelis papildomas UAV skaičius gali sukelti reikšmingą prasiveržimų augimą, nes daugėja neaptarnautų taikinių [6, 9]. Dėl to sistemos veiksmingumas mažėja greičiau, negu būtų galima tikėtis vertinant vien pavienio taikinio sunaikinimo tikimybę.

Masinių UAV atakų analizėje svarbus ne tik bendras taikinių skaičius, bet ir jų veikimo pobūdis. Koordinuotos atakos, atakos bangomis ar klaidinantys taikiniai gali būti naudojami sistemos apkrovai didinti ir prisotinimui sukelti [7, 8]. Tokiais atvejais dalis UAV gali būti skirta ne tiesioginiam smūgiui, o sistemos resursų išnaudojimui, siekiant sumažinti jos gebėjimą reaguoti į pagrindinę grėsmę [7].

Todėl šiame darbe prisotinimas laikomas vienu svarbiausių veiksnių, lemiančių prasiveržusių UAV skaičių. Vertinant „dronų sienos“ veiksmingumą būtina atskirti taikinius, kurie lieka neaptarnauti dėl sistemos pajėgumo ribos, ir taikinius, kurių perėmimas nepavyksta dėl tikimybinių priežasčių [6, 7, 9]. Toks požiūris leidžia tiksliau modeliuoti realų sistemos veikimą ir paaiškina, kodėl vien didelės aptikimo bei neutralizavimo tikimybės negarantuoja mažos prasiveržimų rizikos.

1.3. Statistiniai ir empiriniai duomenys „dronų sienos“ parametrų parinkimui

Literatūros apžvalgoje aptarus C-UAS architektūrą ir masinių UAV atakų sukeltą prisotinimo reiškinį, tolesnis žingsnis yra nustatyti, kokie statistiniai ir empiriniai duomenys gali būti naudojami modelio parametrų pagrįsti. Šiame darbe siekiama ne tik teoriškai aprašyti „dronų sienos“ veikimą, bet ir sudaryti tokį modelį, kurio įėjimo parametrai būtų susieti su literatūroje pateikiamais rodikliais, bandymų duomenimis ir operacinėmis prielaidomis. Dėl šios priežasties šiame poskyryje nagrinėjama, kaip literatūroje apibūdinamas prasiveržimas, kokie rodikliai taikomi C-UAS sistemų vertinimui ir kaip iš paskelbtų duomenų gali būti ištraukti šiam darbui reikalingi parametrai.

Svarbu pabrėžti, kad C-UAS srityje skelbiami rodikliai ne visada tiesiogiai atitinka modeliui reikalingus dydžius. Literatūroje dažnai pateikiami aptikimo nuotoliai, klasifikavimo tikslumas, neutralizavimo sėkmės procentai, reagavimo laikai, klaidingų aptikimų rodikliai ar sistemos pralaidumo aprašymai, tačiau šie duomenys paprastai priklauso nuo konkretaus scenarijaus, taikinio tipo, aplinkos ir bandymo sąlygų. Dėl to vien mechaninis skaitinių reikšmių perkėlimas į modelį

nebūtų pakankamai pagrįstas. Reikia įvertinti, kokią fizinę prasmę konkretus rodiklis turi, kokiomis sąlygomis jis gautas ir kaip gali būti susietas su šio darbo parametrais N , C , P_d , P_k ir m . Toliau tekste naudojamų parametrų N , C , P_d , P_k ir m reikšmės bei jų fizinė interpretacija detalios aptariamos 1.3.3 poskyryje.

Šiame darbe laikomasi nuostatos, kad empiriniai duomenys turi būti naudojami ne kaip pavieniai izoliuoti skaičiai, bet kaip kontekstinė informacija scenarijams ir parametrų intervalams pagrįsti. Todėl toliau pirmiausia apibrėžiama, kas šiame darbe laikoma prasiveržimu ir kokiam laiko lange jis vertinamas. Po to aptariama, kokius rodiklius realiai taiko C-UAS literatūra, kokie skaitiniai rodikliai gali būti naudojami palyginimui ir kaip atskirti prasiveržimus, atsirandančius dėl sistemos pajėgumo ribos, nuo prasiveržimų, atsirandančių dėl nepavykusių perėmimų. Galiausiai parodoma, kaip iš literatūros ir empirinių šaltinių ištraukti modelio parametrus, kaip vertinti jų kokybę ir kaip šiuos duomenis panaudoti tolesniuose darbo skyriuose rezultatų palyginimui.

1.3.1. „Prasiveržimo“ sąvoka: kas laikoma prasiveržimu ir kokiam laiko lange

Kad prasiveržimų statistika būtų vertinama nuosekliai, būtina aiškiai apibrėžti, kas šiame darbe laikoma prasiveržimu. C-UAS literatūroje sistemos veiksmingumas dažnai aprašomas atskirais techniniais rodikliais, tačiau sistemos lygmens požiūriu svarbiausia yra tai, ar UAV buvo laiku sustabdytas ir ar pasiekė saugomą zoną [2, 4]. Todėl šiame darbe prasiveržimas suprantamas kaip atvejis, kai nepilotuojamasis orlaivis pasiekia nustatytą saugomos zonos ribą arba kritinį objektą be sėkmingo neutralizavimo per apibrėžtą laiko langą [2, 5].

Prasiveržimas šiame darbe turi dvi pagrindines dedamąsias – erdvinę ir laikinę. Erdvinė dedamoji nusako ribą, kurios pasiekimas laikomas sistemos nesėkme, pavyzdžiui, įėjimą į saugomą perimetrą arba priartėjimą prie kritinio objekto nustatytu atstumu. Laikinė dedamoji nusako laikotarpį, per kurį sistema dar gali aptikti, sekti ir neutralizuoti taikinį [2, 4, 5]. Todėl vien fakto, kad taikiny nebuvu neutralizuotas, nepakanka – svarbu ir tai, per kokią laiką bei kokioje zonoje tai įvyko.

Šiame darbe prasiveržimas siejamas su analizės laiko langų T , per kurį vertinamas tiek atakuojančių UAV srautas, tiek sistemos pajėgumas. Atakuojančių UAV skaičius N suprantamas kaip taikinių skaičius per pasirinktą laikotarpį, o sistemos pajėgumas C – kaip maksimalus taikinių skaičius, kurį sistema gali aptarnauti per tą patį intervalą. Jei literatūroje duomenys pateikiami kitais laiko intervalais, jie perskaičiuojami į šiame darbe naudojamą laiko langą [2, 4].

Literatūroje dažnai naudojami tokie rodikliai kaip aptikimo tikimybė, klasifikavimo tikslumas ar neutralizavimo sėkmė [2, 5, 6], tačiau jie savaime dar neparodo, kiek UAV prasiverš per sistemą. Dėl to šiame darbe prasiveržimas laikomas galutiniu sistemos veiksmingumo rezultatu, kuris apjungia tiek perėmimo grandinės nesėkmes, tiek sistemos pajėgumo ribas. Toks požiūris ypač svarbus masinių UAV atakų atveju, kai dalis taikinių gali prasiveržti ne tik dėl nesėkmingo perėmimo, bet ir dėl sistemos prisotinimo [4, 7].

Todėl šiame darbe prasiveržusių UAV skaičius per laikotarpį T laikomas pagrindiniu sistemos veiksmingumo rodikliu. Jis leidžia susieti literatūroje aptariamus C-UAS rodiklius su modelio parametrais ir sudaro pagrindą tolesnei analizei, kurioje atskiriami neaptarnauti taikiniai dėl sistemos prisotinimo ir taikiniai, kurių perėmimas nepavyko dėl tikimybinų priežasčių [2, 4, 7].

1.3.2. C-UAS vertinimo rodikliai: ką realiai matuoja literatūra

C-UAS sistemų literatūroje veiksmingumas vertinamas naudojant įvairius rodiklius, tačiau jie ne visada tiesiogiai atspindi sistemos lygmens rezultata, kuris šiame darbe apibrėžiamas kaip prasiveržusių UAV skaičius. Dažniausiai pateikiami tokie rodikliai kaip aptikimo tikimybė, sekimo tikslumas, identifikavimo patikimumas, neutralizavimo sėkmės tikimybė, klaidingų aptikimų lygis, reagavimo laikas ir sistemos pralaidumas [2, 5, 6]. Šie rodikliai apibūdina atskirų veikimo grandinės etapų kokybę, tačiau savaime dar neparodo, kiek UAV galiausiai bus sustabdyta, o kiek prasiverš per sistemą.

Aptikimo rodikliai nusako sistemos gebėjimą laiku pastebėti UAV tam tikromis sąlygomis. Dažniausiai naudojami aptikimo tikimybė, aptikimo nuotolis, klaidingų aptikimų skaičius ir aptikimo delsa [1, 3, 4]. Tačiau vien aukšta aptikimo tikimybė negarantuoja bendro sistemos veiksmingumo, nes po aptikimo taikinį dar reikia sekti, identifikuoti ir perduoti neutralizavimo grandinei [2, 5].

Sekimo ir identifikavimo rodikliai apibūdina, kaip tiksliai sistema gali išlaikyti taikinį stebėjimo grandinėje ir atskirti jį nuo foninių objektų. Šiai grupei priskiriami sekimo tęstinumas, trajektorijos nustatymo paklaida, klasifikavimo tikslumas ir identifikavimo patikimumas [3–5]. Net ir aptiktas taikiny s gali būti prarastas arba neteisingai įvertintas, todėl šie rodikliai tiesiogiai veikia neutralizavimo galimybe.

Neutralizavimo etape dažniausiai naudojami perėmimo sėkmės rodikliai: neutralizavimo tikimybė, sėkmingų poveikių dalis, reagavimo laikas ir neutralizuojamų taikinių skaičius per tam tikrą laiką [2, 6, 7]. Vis dėlto šie rodikliai dažnai pateikiami kontroliuojamomis bandymų sąlygomis, todėl ne visada atspindi realų masinės UAV atakos scenarijų.

Atskira rodiklių grupė susijusi su sistemos apkrova ir pajėgumu. Tai vienu metu sekamų taikinių skaičius, maksimalus apdorojamų objektų srautas, sprendimų priėmimo delsa ir neutralizavimo priemonių panaudojimo sparta [4, 6, 7]. Šie rodikliai ypač svarbūs masinių UAV atakų atveju, nes leidžia įvertinti sistemos prisotinimą. Tokiu atveju dalis taikinių gali prasiveržti ne dėl nesėkmingo neutralizavimo, o dėl to, kad sistema jų nebespėja aptarnauti.

Todėl šiame darbe pagrindinis galutinis rodiklis yra prasiveržusių UAV skaičius per pasirinktą laiko langą, o literatūroje pateikiami C-UAS rodikliai naudojami kaip tarpiniai parametrai modelio dydžiams P_d , P_k , C , N ir m pagrįsti [2, 4, 7]. Toks požiūris leidžia susieti empirinius duomenis su matematiniu modeliu ir vertinti bendrą sistemos veiksmingumą.

1.3.3. Skaitiniai parametrai, reikalingi modeliui ir palyginimui

Kad „dronų sienos“ veiksmingumas būtų vertinamas kiekybiškai, būtina aiškiai apibrėžti modeliui ir rezultatų palyginimui reikalingus parametrus. Literatūroje pateikiama daug įvairių C-UAS rodiklių, tačiau ne visi jie tiesiogiai tinkami matematiniam modeliavimui. Dėl šios priežasties šiame darbe atrenkami tik tie parametrai, kurie leidžia aprašyti atakuojančių UAV srautą, sistemos pajėgumo ribą ir perėmimo sėkmės tikimybinis aspektus [2, 4, 7].

Pirmasis pagrindinis parametras yra atakuojančių taikinių skaičius N . Jis apibrėžiamas kaip UAV skaičius, patenkantis į sistemą per pasirinktą laiko langą T . Šis parametras nusako bendrą sistemos apkrovą ir yra svarbus vertinant, ar sistema veikia įprastu režimu, ar artėja prie prisotinio ribos.

Literatūroje N gali būti pateikiamas tiesiogiai kaip vienu metu veikiančių UAV skaičius arba netiesiogiai kaip taikinių srautas per laiko vienetą [4, 6, 7].

Antrasis parametras yra sistemos pajėgumas C , nusakantis, kiek taikinių sistema pajėgi aptarnauti per tą patį laiko langą T . Šis dydis apima ne vien neutralizavimo priemonių kiekį, bet ir aptikimo, sekimo, sprendimų priėmimo bei neutralizavimo spartą [6, 7]. Kai $N \leq C$, sistema teoriškai gali aptarnauti visus taikinius, o kai $N > C$, dalis UAV lieka už sistemos pajėgumo ribos [4, 7].

Trečiasis parametras yra aptikimo tikimybė P_d . Ji apibūdina tikimybę, kad taikyns bus laiku aptiktas ir pateks į tolesnę sistemos veikimo grandinę. Literatūroje šis rodiklis gali būti pateikiamas kaip tiesioginė aptikimo tikimybė arba išvestas iš bandymų rezultatų [1, 3, 5]. Šiame darbe P_d apibendrina pradinio sistemos veikimo etapo sėkmę.

Ketvirtasis parametras yra neutralizavimo sėkmės tikimybė P_k . Ji nusako tikimybę, kad iki neutralizavimo etapo patekęs taikyns bus sėkmingai sustabdytas. Literatūroje šis rodiklis gali būti pateikiamas kaip perėmimo sėkmės tikimybė arba neutralizavimo veiksmingumas [2, 6, 7]. Šiame darbe P_k naudojama kaip apibendrintas neutralizavimo etapo veiksmingumo parametras.

Penktasis parametras yra bandymų skaičius m , kuris įtraukiamas tais atvejais, kai taikiniui gali būti taikoma daugiau nei viena perėmimo galimybė. Realiuose scenarijuose vienam UAV gali būti taikomi pakartotiniai neutralizavimo bandymai arba keli poveikio kanalai [2, 4]. Jei nagrinėjamas vienas bandymas vienam taikiniui, laikoma, kad $m = 1$.

Be pagrindinių parametru, rezultatams palyginti naudojami ir išvestiniai rodikliai: prasiveržusių UAV skaičiaus vidurkis, dispersija, standartinis nuokrypis, viršijimo tikimybė bei kvantiliai. Šie rodikliai leidžia vertinti ne tik vidutinį sistemos rezultatą, bet ir blogesnių scenarijų riziką [4, 7, 8].

Šiame darbe pagrindiniai modelio įėjimo parametrai yra N , C , P_d , P_k ir m , o pagrindiniai palyginimo rodikliai – prasiveržusių UAV skaičius ir jo statistinės charakteristikos. Toks parametru rinkinys leidžia suderinti literatūroje pateikiamus empirinius duomenis su tolesniu analitiniu ir simuliaciniu modeliavimu.

1 lentelė. Literatūriniai ir empiriniai duomenys modelio parametrams parinkti

Šaltinis	Scenarijus / sistema	Pirminiai duomenys iš šaltinio	Modeliui naudojamas parametras	Pritaikymas šiame darbe
[14]	FMCW radaras; taikyns - <i>DJI Phantom 4 Pro</i> ; RCS 0,01 m ²	Aptikimas 150 m atstumu, kai siuntimo galia 30 dBm.	Aptikimo nuotolis - 150 m	Tinka konservatyviam mažo efektinio sklaidos ploto taikinio aptikimo scenarijui pagrįsti.
[14]	Ku diapazono fazinė gardelė; taikyns - <i>DJI Phantom 3</i> ; RCS 0,01 m ²	Aptikimo nuotolis - iki 10 km; vienu metu sekama iki 100 taikinių.	Aptikimo nuotolis ir sekimo pajėgumas C	Tinka sistemos pajėgumo ir sekimo kanalų ribos pagrindimui, kai modelyje nagrinėjamas prisotinimas.

Šaltinis	Scenarijus / sistema	Pirminiai duomenys iš šaltinio	Modeliui naudojamas parametras	Pritaikymas šiame darbe
[14]	Skirtingi UAV tipai; 1 km nuotolis; SNR 6-26 dB	Aptikimo tikimybė 1 km nuotolyje kito nuo 0,234 iki 0,997.	Aptikimo tikimybės intervalas P_d in [0,234; 0,997]	Tinka sudaryti konservatyvų, vidutinį ir optimistinį P_d scenarijų rinkinį.
[14]	S diapazono impulsinis radaras; UAV RCS 0,08 m ²	Aptikimo nuotolis 2340 m, kai $P_d = 0,5$.	Atskaitos taškas: $P_d = 0,5$ prie 2340 m	Tinka vidutinio aptikimo scenarijaus atskaitos taškui pagrįsti.
[2]	C-UAS vertinimo sistema ir veikimo rodiklių rinkinys	Vertinami rodikliai: aptikimo tikimybė, sekimo tikslumas, reakcijos laikas, neutralizavimo sėkmė ir sistemos pajėgumas.	Rodiklių rinkinys modeliui ir rezultatams palyginti	Tinka pagrįsti, kad modeliui reikalingi ne tik P_d ir P_k , bet ir sistemos pajėgumo bei reagavimo rodikliai.

Lentelėje pateikti literatūriniai ir empiriniai duomenys šiame darbe naudojami ne kaip tiesioginės galutinės modelio reikšmės, bet kaip pagrindas scenarijų riboms ir parametru intervalams parinkti. Iš šių duomenų formuojami aptikimo tikimybės P_d scenarijai, pagrindžiama sistemos pajėgumo C interpretacija ir nustatomos tolesniam modeliavimui taikomos prielaidos. Tokiu būdu lentelė sujungia literatūros apžvalgą su vėlesniais metodikos ir skaičiavimų skyriais, kuriuose šie parametrai bus naudojami analitiniam ir simuliaciniam vertinimui.

1.3.4. Prasiveržimų kilmė: neaptarnauti taikiniai ir nepavykę perėmimai

Kad prasiveržimų statistika būtų interpretuojama teisingai, būtina atskirti dvi pagrindines prasiveržimų priežastis. Pirmuoju atveju taikiny yra aptarnaujamas sistemos, tačiau jo perėmimas nepavyksta dėl tikimybinų priežasčių. Antruoju atveju taikiny apskritai nepatenka į pilną perėmimo grandinę, nes sistema dėl pajėgumo ribos nebespėja jo aptarnauti. Toks skyrimas svarbus todėl, kad abi prasiveržimų rūšys kyla iš skirtingų fizinių ir operacinių priežasčių [2, 6, 7].

Pirmoji prasiveržimų grupė siejama su tais UAV, kurie buvo įtraukti į sistemos veikimo grandinę, tačiau jų neutralizavimas nebuvo sėkmingas. Tokiu atveju prasiveržimas atsiranda ne dėl to, kad sistema neturėjo galimybės reaguoti, bet dėl nesėkmės viename iš grandinės etapų. Tai gali būti nepakankama aptikimo tikimybė, sekimo praradimas arba nesėkmingas neutralizavimo veiksmas [2, 5, 6]. Šio tipo prasiveržimai šiame darbe laikomi tikimybine modelio dalimi, nes jų atsiradimą lemia parametrai P_d , P_k ir bandymų skaičius m .

Antroji prasiveržimų grupė susijusi su sistemos prisotinimu. Kai per pasirinktą laiko langą atakuojančių taikinių skaičius viršija sistemos pajėgumą, dalis UAV lieka neaptarnauti dar iki pilno perėmimo proceso pradžios. Tokiu atveju prasiveržimas atsiranda ne dėl nesėkmingo perėmimo, o dėl to, kad sistema nebeturi pakankamai resursų visiems taikiniams apdoroti [4, 6, 7]. Šie prasiveržimai tiesiogiai siejami su parametrais N ir C , nusakančiais atakuojančių taikinių skaičių ir sistemos pajėgumą tame pačiame laiko intervale.

Šis atskyrimas svarbus inžineriniu požiūriu, nes leidžia tiksliau interpretuoti rezultatus. Jei bendras prasiveržimų skaičius didėja daugiausia dėl nepavykusių perėmimų, pagrindinis ribojantis veiksnys

yra tikimybinis grandinės veiksmingumas. Tačiau jei prasiveržimų daugėja dėl neaptarnautų taikinių, net ir pagerinus pavienio perėmimo tikimybę bendras rezultatas gali keistis tik ribotai, nes pagrindinė problema yra sistemos pajėgumas [2, 4, 7].

Praktiniu požiūriu tai paaiškina, kodėl vien didelės P_d ir P_k reikšmės negarantuoja mažos prasiveržimų rizikos. Sistema gali būti veiksminga prieš pavienius ar nedidelius taikinių srautus, tačiau masinės atakos sąlygomis prasiveržimų skaičius gali sparčiai augti dėl sistemos prisotinimo. Dėl šios priežasties šiame darbe bendras prasiveržusių taikinių skaičius nagrinėjamas kaip dviejų dedamųjų suma: neaptarnautų taikinių dėl prisotinimo ir aptarnautų, bet nesėkmingai perimtų taikinių [4, 7].

Toks skyrimas sudaro pagrindą tolesniam modelio formalizavimui, nes leidžia aiškiai atskirti modelio dalis, aprašančias pajėgumo ribą ir tikimybinę perėmimo sėkmę.

1.3.5. Modelio parametrų N , C , P_d , P_k ir m nustatymas iš empirinių duomenų

Kad modelis būtų pritaikomas realių scenarijų analizei, būtina parodyti, kaip iš literatūroje ir empiriniuose šaltiniuose pateikiamų duomenų nustatomi šiame darbe naudojami parametrai N , C , P_d , P_k ir m . Šie dydžiai ne visada pateikiami tiesiogiai, todėl daugeliu atvejų jie nustatomi interpretuojant bandymų rezultatus, sistemų technines charakteristikas ir scenarijų aprašymus. Dėl šios priežasties parametrai šiame darbe parenkami ne kaip pavienės reikšmės, bet kaip literatūroje pagrįstų scenarijų ir intervalų rezultatas [2, 4, 7].

Atakuojančių taikinių skaičius N nustatomas pagal nagrinėjamą scenarijų ir pasirinktą laiko langą T . Jei literatūroje pateikiamas vienu metu veikiančių UAV skaičius, jis gali būti tiesiogiai naudojamas kaip N reikšmė. Jei pateikiamas UAV srautas per tam tikrą laikotarpį, šis dydis perskaičiuojamas pagal šiame darbe naudojamą analizės intervalą [4, 6]. Tokiu būdu N visada reiškia konkretų UAV skaičių per pasirinktą laiką.

Sistemos pajėgumas C nustatomas iš duomenų, apibūdinančių, kiek taikinių sistema gali aptarnauti per pasirinktą laikotarpį. Šis parametras gali būti grindžiamas vienu metu sekamų taikinių skaičiumi, apdorojamų objektų srautu arba neutralizavimo priemonių panaudojimo sparta [6, 7]. Kadangi literatūroje šie duomenys dažnai pateikiami skirtingomis formomis, šiame darbe jie interpretuojami kaip bendras sistemos pajėgumo rodiklis.

Aptikimo tikimybė P_d nustatoma iš publikacijų ir bandymų duomenų, kuriuose pateikiami aptikimo dažniai, aptikimo tikimybės arba sistemų veiksmingumas konkrečiomis sąlygomis. Jei P_d pateikiama tiesiogiai, ji naudojama kaip scenarijaus reikšmė arba parametrų intervalo pagrindas. Jei tiesioginė reikšmė nepateikiama, ji nustatoma netiesiogiai, remiantis bandymų rezultatais arba konservatyvia interpretacija [1, 3, 5].

Neutralizavimo sėkmės tikimybė P_k nustatoma panašiu principu. Ji grindžiama duomenimis apie sėkmingų perėmimų dalį, neutralizavimo veiksmingumą ar konkrečių priemonių efektyvumą [2, 6, 7]. Šiame darbe P_k interpretuojama kaip sąlyginė tikimybė, kad iki neutralizavimo etapo patekęs taikinis bus sėkmingai sustabdytas.

Bandymų skaičius m nustatomas pagal tai, kiek kartų vienam taikiniui gali būti taikomas neutralizavimo veiksmas. Jei sistemoje numatytas vienas perėmimo bandymas, laikoma, kad $m = 1$.

Jei scenarijus leidžia pakartotinius bandymus arba kelių priemonių panaudojimą tam pačiam UAV, tuomet m gali būti didesnis už vienetą [2, 4].

Svarbu pabrėžti, kad šiame darbe empiriniai duomenys naudojami ne kaip absoliučios nekintančios reikšmės, bet kaip pagrindas scenarijams formuoti. Dėl to kiekvienas parametras vertinamas kartu su jo fizine prasme, gavimo sąlygomis ir taikymo ribomis. Toks požiūris leidžia išvengti mechaniško skaičių perkėlimo iš literatūros ir sudaro pagrindą tolesniam analitiniam bei simuliaciniam modeliavimui [2, 4, 7].

Modelio parametrų N , C , P_d , P_k ir m nustatymas remiasi nuosekliu literatūrinių ir empirinių duomenų interpretavimu, jų suvienodinimu pagal pasirinktą laiko langą ir pritaikymu šio darbo scenarijams. Toks parametrų parinkimo principas leidžia užtikrinti, kad vėlesniuose skyriuose taikomas modelis būtų pagrįstas realiais C-UAS veikimo duomenimis.

1.3.6. Empirinių duomenų kokybė, šališkumas ir ribotumai.

Nors literatūriniai ir empiriniai duomenys yra būtini modelio parametrų pagrįsti, jų taikymas C-UAS sistemų vertinime susijęs su reikšmingais ribojimais. Šioje srityje publikuojami duomenys dažnai gaunami skirtingomis bandymų sąlygomis, taikant nevienodus vertinimo kriterijus ir naudojant skirtingus UAV tipus. Dėl to net ir formaliai panašūs rodikliai ne visada yra tiesiogiai palyginami tarpusavyje [2, 4, 7]. Ši aplinkybė ypač svarbi tada, kai literatūroje pateikti duomenys naudojami ne tik aprašomajai analizei, bet ir kiekybiniam modeliavimui.

Vienas svarbiausių ribojimų yra tas, kad daugelis C-UAS šaltinių pateikia duomenis, gautus kontroliuojamomis arba dalinai kontroliuojamomis sąlygomis. Tokiais atvejais UAV tipas, skrydžio profilis, meteorologinės sąlygos ir foniniai trukdžiai būna iš anksto apriboti. Dėl to aptikimo ir neutralizavimo rodikliai gali būti geresni negu realiomis operacinėmis sąlygomis [1, 3, 5]. Tai reiškia, kad tiesioginis tokių reikšmių perkėlimas į modelį gali lemti pernelyg optimistinį sistemos veiksmingumo vertinimą.

Kitas svarbus ribojimas susijęs su publikavimo šališkumu. Dalis duomenų skelbiama gamintojų ar institucijų, suinteresuotų parodyti geresnius sistemos rezultatus. Tokiuose šaltiniuose gali būti akcentuojami palankūs scenarijai arba pateikiami tik sėkmingiausi bandymų rezultatai [2, 6]. Dėl šios priežasties tokie duomenys šiame darbe naudojami atsargiai ir vertinami kritiškai.

Empirinių duomenų kokybę taip pat riboja nevienoda rodiklių samprata. Pavyzdžiui, aptikimo tikimybė gali būti apskaičiuojama pagal skirtingus aptikimo atstumus ar nevienodą klaidingų aptikimų toleranciją. Panašiai neutralizavimo sėkmės rodikliai gali reikšti tiek visišką taikinio sunaikinimą, tiek tik laikino veikimo sutrikdymą [2, 5, 7]. Todėl šiame darbe svarbu ne tik perimti skaitinę reikšmę, bet ir įvertinti jos fizinę prasmę modelio kontekste.

Papildomas ribojimas yra duomenų neišsamumas. Literatūroje dažnai pateikiami tik pavieniai rodikliai, tačiau trūksta informacijos apie bandymų skaičių, aplinkos sąlygas ar imties dydį [4, 7]. Tokiais atvejais tenka remtis pagrįstomis prielaidomis arba taikyti konservatyvų interpretavimo principą.

Šiame darbe šie ribotumai mažinami keliais principais. Pirma, skaitinės reikšmės naudojamos ne kaip absoliučios vertės, o kaip scenarijų ribos arba pagrįsti intervalai. Antra, pirmenybė teikiama

šaltiniams, kuriuose aiškiau aprašytos bandymų sąlygos. Trečia, kai duomenys yra neišsamūs arba nevienareikšmiai, pasirenkama konservatyvesnė interpretacija [2, 4, 7].

Empirinių duomenų kokybė C-UAS srityje yra nevienalytė, todėl jų taikymas modeliui reikalauja kritinio vertinimo. Pagrindiniai ribojimai susiję su bandymų sąlygų skirtumais, publikavimo šališkumu, nevienoda rodiklių interpretacija ir duomenų neišsamumu. Dėl to šiame darbe empiriniai duomenys naudojami kaip pagrindas scenarijų ir parametrų riboms nustatyti, o ne kaip absoliuti universali tiesa.

1.3.7. Empirinių duomenų panaudojimas rezultatų palyginimui.

Empiriniai duomenys šiame darbe naudojami ne tik modelio parametrams parinkti, bet ir rezultatų pagrįstumui įvertinti. Kadangi modelis skirtas „dronų sienos“ veiksmingumui vertinti per prasiveržusių UAV skaičių, svarbu patikrinti, ar gauti rezultatai dera su literatūroje aprašomomis C-UAS sistemų veikimo tendencijomis [2, 4, 7].

Rezultatų vertinimas grindžiamas fizinės ir operacinės logikos patikra. Jei didėjant UAV skaičiui N artėjant prie sistemos pajėgumo ribos C modelis rodo spartesnį prasiveržimų augimą, toks elgesys atitinka literatūroje aprašomą prisotinimo reiškinį [4, 6, 7]. Analogiškai, didėjant aptikimo tikimybei P_d ir neutralizavimo tikimybei P_k , prasiveržusių taikinių skaičius turi mažėti. Tokia patikra leidžia įvertinti, ar modelis atspindi realią sistemos veikimo logiką.

Rezultatai taip pat lyginami su literatūroje pateikiamais parametrų intervalais ir scenarijų ribomis. Kadangi C-UAS srityje empiriniai duomenys dažnai pateikiami kaip reikšmių intervalai, modelio rezultatai vertinami ne pagal vieną „teisingą“ reikšmę, bet pagal jų atitikimą realistiniams režiams [2, 4, 7].

Empiriniai duomenys svarbūs ir analizuojant skirtingas prasiveržimų kilmės formas. Jei modelis rodo, kad esant mažesnei apkrovai prasiveržimus daugiausia lemia nesėkmingi perėmimai, o didėjant apkrovai – sistemos prisotinimas ir neaptarnautų taikinių augimas, toks rezultatas atitinka literatūroje aprašomą masinių UAV atakų logiką [4, 6, 7].

Šiame darbe empiriniai duomenys naudojami kaip atskaitos pagrindas modelio rezultatams vertinti. Jie leidžia patikrinti, ar apskaičiuotos prasiveržimų tendencijos atitinka literatūroje aprašomą C-UAS sistemų elgseną ir ar pasirinkti scenarijai gali būti laikomi inžineriškai pagrįstais.

1.4. Tipinių atakos UAV klasių apžvalga

Nepilotuojamųjų orlaivių grėsmė C-UAS sistemų kontekste nėra vienalytė, nes skirtingi UAV tipai pasižymi nevienodomis geometrinėmis, aerodinaminėmis ir eksploatacinėmis savybėmis. Literatūroje dažniausiai išskiriamos kelios tipinės UAV klasės, kurios skiriasi dydžiu, greičiu, skrydžio nuotoliu, manevringumu, aptinkamumu ir kovinio panaudojimo pobūdžiu [1, 2, 6]. Šie skirtumai tiesiogiai veikia aptikimo sudėtingumą, neutralizavimo galimybes ir modelio parametrų parinkimą.

Viena dažniausiai aptariamų grupių yra mažos klasės komerciniai daugiarotoriai UAV. Jie pasižymi nedideliu greičiu, ribotu veikimo nuotoliu ir maža naudinga apkrova, tačiau dėl mažos kainos ir plataus paplitimo kelia didelę praktinę grėsmę [1, 3, 5]. Tokių UAV aptikimą apsunkina mažas fizinis dydis ir mažesnis efektyvus sklaidos plotas [3, 5].

Kita svarbi grupė yra mažieji ir vidutiniai fiksuoto sparno UAV. Jie paprastai skrenda greičiau, veikia didesniu atstumu ir ilgiau išbūna ore negu daugiarotoriai UAV [1, 2]. Didesnis jų greitis trumpina sistemos reakcijos laiką ir didina reikalavimus sekimo bei sprendimų priėmimo grandinei [2, 6, 7].

Atskira grėsmės grupė siejama su vienkartinio panaudojimo atakos UAV ir klaidinančiais taikiniai. Tokie UAV dažnai naudojami sistemos apkrovimui didinti ir prisotinimo efektui sukelti [6, 7]. Tokiu atveju grėsmę lemia ne tik individualios techninės savybės, bet ir jų naudojimo taktika.

Literatūroje taip pat pažymima, kad skirtingos UAV klasės nevienodai aptinkamos skirtingais jutikliais. Mažesni daugiarotoriai UAV sunkiau aptinkami radarais, tačiau geriau pastebimi optinėmis ar akustinėmis priemonėmis. Tuo tarpu didesni fiksuoto sparno UAV dažniau turi aiškesnius radaro požymius, tačiau dėl didesnio greičio mažina sistemos reakcijos rezervą [3–5].

Šiame darbe UAV klasių apžvalga naudojama scenarijų formavimui ir modelio parametrų pagrindimui. Modeliui svarbios tokios savybės kaip UAV dydis, greitis, aptinkamumas, skrydžio trukmė ir vienu metu veikiančių taikinių skaičius [2, 6, 7].

Apibendrinant galima teigti, kad skirtingos UAV klasės kelia nevienodus reikalavimus C-UAS sistemai: mažieji daugiarotoriai UAV dažniau siejami su mažu aptinkamumu ir dideliu skaičiumi, fiksuoto sparno UAV – su didesniu greičiu ir nuotoliu, o vienkartinio panaudojimo atakos UAV ir klaidinantys taikiniai – su sistemos apkrovimo ir prisotinimo didinimu.

1.5. Modeliavimo metodų apžvalga

Literatūroje C-UAS sistemų, masinių UAV atakų ir prasiveržimų rizikos vertinimui taikomi skirtingi modeliavimo metodai, kurie skiriasi detalumo lygiu ir tuo, kokius sistemos veikimo aspektus leidžia įvertinti. Vieni metodai labiau tinkami pavienių įvykių ir perėmimo tikimybių analizei, kiti – grupinių atakų, pajėgumo apribojimų ar sistemos elgsenos prisotinimo sąlygomis vertinimui [4–6]. Todėl metodo pasirinkimas priklauso nuo to, ar siekiama įvertinti pavienio taikinio perėmimo tikimybę, ar visos sistemos rezultatą masinės atakos metu.

Tikimybiniai modeliai dažniausiai taikomi tada, kai sistema gali būti aprašoma per aiškiai apibrėžtus sėkmės ir nesėkmės įvykius. Tokiu atveju vertinamos aptikimo, neutralizavimo ir prasiveržimo tikimybės bei tikimybė, kad iš n taikinių tam tikras skaičius bus sustabdytas arba prasiverš [4, 8]. Šių modelių privalumas – analitinis aiškumas, interpretuojami rezultatai ir galimybė greitai atlikti scenarijų analizę. Tačiau jie dažnai remiasi supaprastinančiomis prielaidomis, tokiomis kaip nepriklausomi bandymai ar pastovios tikimybės.

Grupinių atakų ir salvinio pobūdžio veiksmų analizei taikomi stochastiniai modeliai, leidžiantys vertinti ne tik pavienio taikinio baigtį, bet ir visos atakos rezultatų pasiskirstymą [8–10]. Tokie modeliai naudojami prasiveržimų pasiskirstymui, tikėtiniems nuostoliams ir parametrų įtakai bendram rezultatui vertinti. Jų stiprybė – galimybė susieti atakos mastą su tikimybine baigties struktūra, tačiau praktikoje jie dažnai kuriami kitoms gynybos sritims, todėl C-UAS kontekste reikalauja papildomos adaptacijos.

Pajėgumo ir pralaidumo apribojimų analizei dažnai taikomi eilinių teorijos ir aptarnavimo sistemų modeliai. Jie naudingi tais atvejais, kai svarbu įvertinti ne tik pavienio perėmimo sėkmę, bet ir tai, kiek taikinių sistema gali aptarnauti per tam tikrą laiką [11, 12]. Tokie metodai leidžia formalizuoti apkrovos, laukimo, aptarnavimo kanalų ir neaptarnautų taikinių atsiradimo reiškinius. Ši metodų

grupė svarbi ir šiame darbe, nes padeda paaiškinti prasiveržimus, atsirandančius dėl sistemos prisotinimo.

Sudėtingesnių scenarijų ir daugiaagentės sąveikos analizei taikomas agentinis ir simuliacinis modeliavimas. Šie metodai leidžia modeliuoti UAV, jutiklių, valdymo grandžių ir neutralizavimo priemonių sąveiką laike, todėl tinka vertinant sudėtingų C-UAS architektūrų veikimą prieš spiečiaus tipo grėsmes [4, 13]. Jų privalumas – lankstumas ir realesnių sąlygų modeliavimas, tačiau trūkumai yra didesnės skaičiavimo sąnaudos ir mažesnis analitinis aiškumas.

Atsižvelgiant į tai, šiame darbe pasirinkta derinti du modeliavimo požiūrius. Pirmasis – analitinis tikimybinis modeliavimas, leidžiantis apskaičiuoti prasiveržusių UAV skaičiaus pasiskirstymą ir pagrindinius statistinius rodiklius. Antrasis – Monte Karlo metodas, leidžiantis patikrinti rezultatus sudėtingesnėmis sąlygomis ir įvertinti modelio elgseną tada, kai analitinės prielaidos tampa ribojančios [4, 14]. Toks derinys leidžia suderinti analitinį aiškumą, skaičiavimo paprastumą ir realesnių scenarijų analizę.

1.5.1. Tikimybiniai ir sistemos sėkmės modeliai

Tikimybiniai modeliai literatūroje plačiai taikomi tada, kai sistemos veikimą galima aprašyti per aiškiai apibrėžtus sėkmės ir nesėkmės įvykius. Toks požiūris ypač tinka gynybos ir patikimumo uždaviniams, kuriuose svarbu įvertinti, kokia tikimybė, kad pavienis taikynys bus aptiktas, perimtas arba prasiverš per sistemą. Šių modelių pagrindas paprastai yra Bernulio bandymų logika, kai kiekvieno bandymo baigtis turi dvi galimybes, o bendras rezultatas aprašomas tikimybinio skirstinio. Tokia metodika patraukli tuo, kad leidžia gauti aiškias analitines išraiškas, apskaičiuoti baigčių pasiskirstymą ir interpretuoti rezultatą per statistinius rodiklius, tokius kaip matematinė viltis, dispersija ar viršijimo tikimybė.

Sistemos sėkmės modeliai dažniausiai orientuojasi į klausimą, kokia yra bendroji tikimybė, kad sistema įvykdys jai skirtą funkciją. Gynybos kontekste tai gali reikšti tikimybę, kad taikynys bus sunaikintas, kad tam tikra jų dalis bus sustabdyta arba kad nebus pasiektas kritinis prasiveržimų lygis. Tokiuose modeliuose atskirų etapų sėkmės tikimybės dažnai jungiamos į vieną bendrą veikimo grandinę, todėl jie ypač tinkami sistemoms, kuriose rezultatas priklauso nuo kelių iš eilės einančių veiksmų. C-UAS kontekste tai gerai dera su aptikimo, sekimo, identifikavimo ir neutralizavimo grandine, nes kiekvienas iš šių etapų gali būti interpretuojamas kaip atskiras sėkmės arba nesėkmės šaltinis.

Šių modelių privalumas yra jų aiškumas ir palyginti paprastas taikymas scenarijų analizei. Keičiant įėjimo parametrus galima greitai įvertinti, kaip kinta galutinio rezultato tikimybės, ir nustatyti, kurie sistemos elementai turi didžiausią įtaką rizikai. Dėl to tikimybiniai modeliai ypač tinka jautrumo analizei, alternatyvių konfigūracijų lyginimui ir pradiniam sistemos elgsenos įvertinimui. Tačiau jų ribotumas yra tas, kad jie dažniausiai remiasi supaprastinančiomis prielaidomis, pavyzdžiui, nepriklausomumu tarp bandymų, nekintančiomis tikimybėmis ir ribotu dinaminės sąveikos aprašymu.

Šio darbo kontekste tikimybiniai ir sistemos sėkmės modeliai yra svarbūs todėl, kad jie sudaro teorinį pagrindą prasiveržusių UAV skaičiaus pasiskirstymui vertinti. Būtent ši metodų grupė leidžia pereiti nuo bendro C-UAS veikimo aprašymo prie formalaus matematinio modelio, kuriame nagrinėjamas ne vien pavienio taikinio likimas, bet ir visos atakos baigtis per pasirinktą laiko langą. Dėl šios

priežasties tolesniuose skyriuose šiam darbui kaip bazinis metodas pasirenkamas binominis modelis, kuris yra viena aiškiausių ir interpretuojamiausių tikimybinio vertinimo formų. Tai dera ir su tavo darbo uždaviniais, kuriuose jau aiškiai numatyta sudaryti binominiu skirstiniu pagrįstą modelį ir jį lyginti su Monte Karlo simuliacija.

1.5.2. Grupinių UAV atakų ir sistemos pajėgumo modeliavimo metodai

Kai nagrinėjamos grupinės arba masinės UAV atakos, sistemos veiksmingumo nebeužtenka aprašyti vien pavienio taikinio sėkmės ar nesėkmės tikimybe. Tokiais atvejais svarbi tampa „kiek iš n “ logika: kiek taikinių bus neutralizuota, kiek prasiverš ir kokia tikimybė, kad prasiveržusių UAV skaičius viršys pasirinktą ribą. Dėl šios priežasties literatūroje grupinių atakų analizei taikomi stochastiniai modeliai, leidžiantys vertinti ne vieną baigtį, bet viso taikinių rinkinio rezultatų pasiskirstymą [4, 8, 9].

Tokiuose modeliuose svarbi ne vien pavienio UAV baigtis, bet visos atakos rezultatas per pasirinktą laiko langą. Vertinamas sunaikintų ir prasiveržusių taikinių skaičiaus pasiskirstymas, kritinių slenksčių viršijimo tikimybė, dispersija, kvantiliai ir parametrų įtaka bendram rezultatui [8–10]. Šis požiūris tiesiogiai siejasi su šio darbo problema, nes „dronų sienos“ efektyvumas taip pat vertinamas per prasiveržusių UAV skaičių.

Svarbi šių modelių savybė yra masto efekto vertinimas. Didėjant UAV skaičiui, prasiveržimų pasiskirstymas plėtėja, didėja kraštinių scenarijų tikimybė, o sistemos veiksmingumas tampa jautresnis parametrų pokyčiams [4, 8]. Tai ypač svarbu masinių UAV atakų kontekste, nes net ir nedidelis perėmimo veiksmingumo sumažėjimas gali lemti reikšmingą prasiveržusių taikinių skaičiaus augimą.

C-UAS sistemų veiksmingumas priklauso ne tik nuo perėmimo tikimybės, bet ir nuo sistemos pajėgumo paskirstyti ribotus išteklius dideliame taikinių sraute. Dėl šios priežasties literatūroje taikomi pajėgumo, eilinių teorijos ir simuliacinio modeliavimo metodai, leidžiantys vertinti sistemos apkrovą, aptarnavimo spartą, prisotinimą ir neaptarnautų taikinių atsiradimą [11, 12].

Masinių UAV atakų metu sistema turi ribotą jutiklių, sekimo kanalų, sprendimų priėmimo ir neutralizavimo priemonių pajėgumą, todėl didėjant UAV srautui dalis taikinių gali nepatekti į pilną perėmimo grandinę. Tokiu atveju prasiveržimai atsiranda ne tik dėl nesėkmingų perėmimų, bet ir dėl sistemos prisotinimo [6, 7]. Ši logika šiame darbe naudojama pagrindžiant parametro C įvedimą į matematinį modelį.

Literatūroje taip pat taikomi agentiniai ir simuliaciniai modeliai, leidžiantys modeliuoti UAV, jutiklių, valdymo grandžių ir neutralizavimo priemonių sąveiką laike [4, 13]. Tokie metodai leidžia vertinti sudėtingesnius scenarijus: nevienodus UAV atvykimo momentus, skirtingus taikinių prioritetus, pakartotinius perėmimo bandymus ir sistemos apkrovos pokyčius. Jų pagrindinis privalumas yra lankstumas ir galimybė priartėti prie realesnių masinių UAV atakų scenarijų.

Tačiau simuliaciniai metodai turi ir ribotumų. Jų rezultatai priklauso nuo pasirinktų prielaidų, įėjimo parametrų ir modeliavimo taisyklių, o didėjant modelio detalumui didėja skaičiavimo sąnaudos ir neapibrėžtumas [4, 14]. Be to, simuliacija ne visada taip aiškiai kaip analitinis modelis parodo tiesioginį ryšį tarp parametrų ir galutinio rezultato.

Šiame darbe stochastinių grupinių atakų modelių logika naudojama prasiveržusių UAV skaičiaus pasiskirstymui aprašyti, pajėgumo modeliai – sistemos prisotinimui pagrįsti, o Monte Karlo metodas taikomas kaip analitinio binominio modelio papildinys sudėtingesnių scenarijų vertinimui.

1.5.3. Taikomi rodikliai ir jų ryšys su šio darbo tikslais

Modeliavimo metodų apžvalga šiame darbe nėra savitikslių, todėl svarbu aiškiai apibrėžti, kokie rodikliai naudojami sistemos vertinimui ir kaip jie siejasi su darbo tikslais. C-UAS sistemų literatūroje taikoma daug skirtingų rodiklių: aptikimo tikimybė, sekimo tikslumas, neutralizavimo sėkmės tikimybė, reakcijos laikas, vienu metu sekamų taikinių skaičius ir sistemos pralaidumas. Tačiau šiame darbe pagrindinis dėmesys skiriamas ne pavieniams techniniams parametrų, o galutiniam sistemos rezultatui – prasiveržusių UAV skaičiui per pasirinktą laiko intervalą. Toks pasirinkimas leidžia vertinti sistemą ne tik pagal atskirų komponentų charakteristikas, bet pagal bendrą sistemos veiksmingumą masinės atakos sąlygomis.

Pagrindiniu šio darbo rodikliu laikomas prasiveržusių taikinių skaičius. Šis rodiklis svarbus todėl, kad jis apjungia tiek tikimybinę perėmimo nesėkmę, tiek sistemos pajėgumo ribos poveikį. Kitaip tariant, jis atspindi bendrą „dronų sienos“ sistemos veiksmingumą sistemos lygmeniu. Be to, prasiveržusių UAV skaičius yra praktiškai aiškus rodiklis, leidžiantis tiesiogiai interpretuoti, kokia dalis grėsmės nebuvo sustabdyta.

Vis dėlto vien tik vidutinio prasiveržusių UAV skaičiaus nepakanka. Dėl šios priežasties šiame darbe papildomai nagrinėjami dispersija, standartinis nuokrypis, viršijimo tikimybė ir kvantiliai. Dispersija ir standartinis nuokrypis leidžia įvertinti rezultatų sklaidą apie vidutinę reikšmę, o viršijimo tikimybė parodo tikimybę, kad prasiveržusių UAV skaičius viršys iš anksto nustatytą kritinę ribą. Tokie rodikliai svarbūs todėl, kad dvi sistemos gali turėti panašų vidutinį prasiveržimų skaičių, tačiau labai skirtis pagal rezultatų stabilumą ir blogiausių scenarijų tikimybę.

Kvantiliai šiame darbe naudojami blogesnių nei vidutinis scenarijų vertinimui. Jie leidžia nustatyti ribas, kurios gali būti pasiektos nepalankiomis sąlygomis, tačiau išlieka statistiškai tikėtinos. Toks vertinimas svarbus inžineriniu požiūriu, nes leidžia pereiti nuo vien tik vidutinio dydžio prie praktinio klausimo – kokio masto prasiveržimų galima tikėtis kritiniais atvejais.

Pasirinkti rodikliai tiesiogiai siejasi su šio darbo tikslu – sukurti ir pritaikyti tikimybinį modelį „dronų sienos“ sistemos veiksmingumui ir UAV prasiveržimų rizikai vertinti. Dėl šios priežasties šiame darbe vertinamas ne tik vidutinis rezultatas, bet ir visas prasiveržusių taikinių pasiskirstymas bei iš jo išvesti rizikos rodikliai.

Šie rodikliai taip pat dera su pasirinktais modeliavimo metodais. Jie gali būti apskaičiuojami tiek analitiniu binominio skirstinio modeliu, tiek Monte Karlo metodu, todėl leidžia tiesiogiai palyginti abiejų metodų rezultatus skirtinguose scenarijuose. Toks požiūris leidžia vertinti ne tik vidutinį sistemos veiksmingumą, bet ir parametrų įtaką rezultatų stabilumui bei kraštinių scenarijų rizikai.

Be to, pasirinkti rodikliai leidžia geriau identifikuoti sistemos silpnąsias vietas. Vidutinis prasiveržimų skaičius parodo bendrą sistemos veiksmingumą, o dispersija, kvantiliai ir viršijimo tikimybės leidžia įvertinti blogiausių scenarijų tikimybę bei sistemos artėjimą prie kritinės prisotimo ribos.

Todėl šiame darbe taikomi rodikliai pasirinkti taip, kad leistų vertinti tiek tipinę sistemos rezultatą, tiek blogesnių scenarijų riziką. Toks rodiklių rinkinys yra tinkamas tiek analitiniame binominiam modeliui, tiek Monte Karlo metodui ir sudaro nuoseklų pagrindą tolesnei teorinei bei metodinei darbo daliai.

1.6. Binominio modelio taikymas gynybos sistemų analizėje

Binominis modelis taikomas tais atvejais, kai nagrinėjamas baigtinis nepriklausomų bandymų skaičius, o kiekvieno bandymo baigtis gali būti aprašoma dviem būsenomis – sėkme arba nesėkme. Toks modelis yra vienas paprasčiausių ir praktiškai naudingų tikimybinio modeliavimo būdų, nes leidžia analitiškai įvertinti, kiek kartų iš n bandymų įvyks nagrinėjamas įvykis. Dėl šios priežasties binominio skirstinio principai plačiai taikomi gynybos analizėje, patikimumo inžinerijoje ir kitose srityse, kuriose svarbu vertinti pasikartojančių įvykių baigtį bei jų pasiskirstymą [26, 32].

Gynybos uždaviniuose binominio tipo modeliai ypač aktualūs tada, kai svarbu įvertinti, kiek taikinių iš tam tikro skaičiaus bus sunaikinta arba prasiverš pro gynybos sistemą. Nors praktikoje tokie uždaviniai dažnai papildomi sudėtingesniais stochastiniais modeliais, pagrindinė „kiek iš n “ logika išlieka artima binominio modeliavimo principui [26–29]. Toks požiūris leidžia vertinti ne tik vidutinį rezultatą, bet ir visą galimų baigčių pasiskirstymą.

Vienas iš tokių taikymo pavyzdžių yra priešraketinės gynybos veiksmingumo vertinimas, kai modeliuojama tikimybė, kad tam tikras skaičius atakuojančių objektų bus perimtas arba prasiverš pro sistemą [26]. Tokiuose modeliuose kiekvienam taikiniui priskiriama perėmimo sėkmės tikimybė, o bendras rezultatas aprašomas per sunaikintų arba prasiveržusių objektų skaičiaus pasiskirstymą. Ši logika tiesiogiai siejasi ir su šiuo darbu, nes „dronų sienos“ veiksmingumas taip pat vertinamas per prasiveržusių UAV skaičių.

Artima logika taikoma ir salvinio pobūdžio modeliuose, kuriuose analizuojama, kaip kinta kovos baigtis didėjant atakuojančių taikinių skaičiui ir keičiantis perėmimo efektyvumui [27–29]. Nors tokie modeliai dažnai sudėtingesni už klasikinį binominį modelį, jų pagrindas vis tiek remiasi pakartotinių bandymų ir baigčių pasiskirstymo samprata.

Patikimumo inžinerijoje binominio modelio principai naudojami vertinant, kiek komponentų iš tam tikro skaičiaus veiks arba suges, kai kiekvienam komponentui priskiriama tam tikra gedimo ar sėkmingo veikimo tikimybė [32]. Tokiuose uždaviniuose svarbi ne vien vieno elemento būseną, bet bendras veikiančių arba sugedusių elementų skaičius. Ši samprata artima ir C-UAS uždaviniui, nes čia taip pat nagrinėjamas bendras sėkmingai sustabdytų ir prasiveržusių taikinių skaičius.

Svarbi binominio modelio stiprybė yra jo analitinis aiškumas. Kai modelio prielaidos yra priimtinos, galima tiesiogiai apskaičiuoti prasiveržusių taikinių skaičiaus tikimybę, matematinę viltį, dispersiją ir kitas statistines charakteristikas. Tai leidžia greitai atlikti scenarijų analizę ir įvertinti skirtingų parametrų įtaką rezultatui. Dėl šios priežasties binominis modelis pasirinktas kaip bazinis analitinis metodas.

Tačiau būtina pažymėti ir ribotumus. Binominis modelis remiasi prielaida, kad bandymai yra tarpusavyje nepriklausomi, o sėkmės tikimybė visiems objektams išlieka pastovi. Realiose gynybos sistemose šios prielaidos ne visada tenkinamos, nes masinių atakų metu gali atsirasti prisotinimo

efektai, resursų paskirstymo įtaka ir skirtingas taikinių prioritetizavimas [27, 28, 30]. Todėl binominis modelis šiame darbe naudojamas kaip bazinis analitinis metodas, papildomas Monte Karlo metodu.

Šio darbo kontekste binominio modelio taikymas gynybos ir patikimumo uždaviniuose pagrindžia pasirinkto metodo tinkamumą ir rodo, kad „kiek iš n“ logika turi tvirtą teorinį pagrindą artimose srityse [26, 27, 32].

1.7. Monte Karlo metodo taikymas aviacijoje ir gynyboje

Monte Karlo metodas taikomas tais atvejais, kai sistemos elgsena priklauso nuo atsitiktinių veiksnių, o analitinis sprendimas tampa pernelyg sudėtingas arba nepakankamai lankstus praktinių scenarijų vertinimui. Metodo esmė – daug kartų generuoti atsitiktines įėjimo reikšmes pagal pasirinktus skirstinius, kartoti modelio eigą ir iš gautų realizacijų vertinti dominančių rodiklių pasiskirstymą, vidurkį, dispersiją bei kitus statistinius dydžius [35].

Aviacijos srityje Monte Karlo metodas dažnai taikomas rizikos vertinimui, kai svarbu įvertinti ne vieną galimą rezultatą, bet visą galimų baigčių aibę. Šis metodas naudojamas orlaivių susidūrimų rizikos, avarinių trajektorijų, kritimo vietos pasiskirstymo ir smūgio energijos analizei. Literatūroje Monte Karlo metodas taikytas modeliuojant nepilotuojamųjų orlaivių kritimo trajektorijas ir kritimo vietos tikimybinį pasiskirstymą, kai analitinis vertinimas tampa sudėtingas dėl netiesinių dinamikos savybių ir jautrumo pradinėms sąlygoms [36, 37].

Monte Karlo metodas UAV srityje ypač tinkamas todėl, kad galutinis rezultatas priklauso nuo daugelio vienu metu veikiančių parametru: trajektorijos, aukščio, greičio, masės, meteorologinių sąlygų ir kitų atsitiktinių veiksnių [37, 38]. Tokius parametrus galima modeliuoti kaip atsitiktinius dydžius ir vertinti jų bendrą poveikį sistemos rezultatui.

Gynybos srityje Monte Karlo metodas taikomas sudėtingiems scenarijams, kuriuose vienu metu veikia daug atsitiktinių veiksnių ir tarpusavio sąveikų. Tokiais atvejais analitinis modelis dažnai leidžia aprašyti tik bendrą sistemos veikimo logiką, tačiau nepakanka kraštinių scenarijų ar netolygių atvykimo srautų vertinimui [35, 39]. Monte Karlo metodas leidžia daug kartų pakartoti scenarijų ir nustatyti galimų baigčių pasiskirstymą, todėl gynybos analizėje dažnai naudojamas kaip analitinio modelio papildinys.

Svarbus Monte Karlo metodo privalumas yra galimybė atlikti jautrumo analizę. Keičiant įėjimo parametrus galima vertinti, kaip kinta rezultatai ir kurie veiksniai labiausiai lemia rizikos augimą [35, 36]. Toks požiūris svarbus ir šiame darbe, nes leidžia nagrinėti ne vieną fiksuotą scenarijų, o platesnį galimų „dronų sienos“ veikimo atvejų rinkinį.

Kartu būtina pažymėti ir metodo ribotumus. Monte Karlo simuliacijos rezultatai priklauso nuo pasirinktų įėjimo skirstinių, prielaidų, modelio struktūros ir pakartojimų skaičiaus. Be to, simuliacija nesuteikia tokio analitinio skaidrumo kaip uždaros formos modelis [35, 37].

Šio darbo kontekste Monte Karlo metodas naudojamas kaip papildomas įrankis binominio modelio rezultatams tikrinti ir išplėsti sudėtingesnių scenarijų atvejais [35, 36, 39].

1.8. Literatūros apžvalgos išvada

Literatūros apžvalga parodė, kad C-UAS sistemos vertinimas turi būti atliekamas kaip vientisos veikimo grandinės rezultatas, nes galutinė rizika ginamam objektui apibrėžiama ne pavienių

komponentų techniniais parametrais, o sistemos lygmens baigtimi – prasiveržusių taikinių skaičiumi per apibrėžtą laiko langą [2, 3, 6]. Aptikimo, sekimo, identifikavimo ir neutralizavimo etapai sudaro nuoseklią grandinę, kurioje kiekvieno etapo ribotumai tiesiogiai veikia bendrą rezultatą. Literatūra taip pat rodo, kad šių sistemų rodikliai yra jautrūs aplinkos sąlygoms, taikinių profiliui, jutiklių suderinamumui ir klaidingų aptikimų apkrovai, todėl vieno universalaus parametrų rinkinio, kuris tiktų visiems scenarijams, dažniausiai nėra [2, 4, 5].

Masinių UAV atakų kontekste svarbiausiu veiksnium tampa prisotinimas, kai atakuojančių taikinių intensyvumas viršija sistemos pajėgumą ir atsiranda neaptarnautų taikinių dalis [6, 7]. Literatūros analizė parodė, kad tokiomis sąlygomis bendrą rezultatą lemia ne vien pavienio perėmimo sėkmė, bet ir sistemos pralaidumas, sekimo kanalų skaičius, sprendimų priėmimo sparta, neutralizavimo priemonių naudojimo ciklas ir pakartotinių bandymų įtaka išteklių sunaudojimui [6, 7]. Tai reiškia, kad sistemos veiksmingumo nepakanka vertinti vien per vidutinį efektyvumą – būtina nagrinėti visą prasiveržusių taikinių pasiskirstymą ir jo uodegos riziką.

Literatūros apžvalga taip pat parodė, kad prasiveržimų modeliavimo metodai gali būti suskirstyti į kelias pagrindines grupes: tikimybinis ir sistemos sėkmės modelius, grupinių atakų „kiek iš n “ modelius, pajėgumo ir aptarnavimo modelius bei simuliacinius metodus. Šių metodų analizė rodo, kad šio darbo uždaviniui tinkamiausia jungti du požiūrius: analitinį binominio skirstinio modelį ir Monte Karlo simuliaciją [26, 27, 32, 35]. Binominis modelis suteikia aišką ir interpretuojamą bazinę schemą prasiveržusių UAV skaičiaus pasiskirstymui vertinti, o Monte Karlo metodas leidžia įvertinti sudėtingesnius scenarijus, parametrų sklaidą ir atvejus, kai analitinės prielaidos tampa ribojančios [35, 36, 39].

Empirinių ir literatūrinių duomenų analizė leido suformuoti aiškų šio darbo inžinerinį uždavinį: prasiveržusių taikinių skaičių nagrinėti kaip sistemos pajėgumo ribos ir perėmimo sėkmės tikimybės rezultata, o riziką vertinti ne vien vidutine reikšme, bet ir viršijimo tikimybėmis bei kvantiliais. Ankstesniuose poskyriuose identifikuoti rodikliai ir scenarijų pavyzdžiai naudojami formuojant šio darbo parametrų sritį N, C, P_d, P_k, m , kuri vėliau bus taikoma matematiniam modelyje ir Monte Karlo simuliacijoje. Šį ryšį tarp literatūroje pateikiamų pavyzdžių ir šio darbo rodiklių apibendrina 2 lentelė.

2 lentelė. Literatūroje pateikiami prasiveržimų rizikos vertinimo pavyzdžiai ir jų taikymas šiame darbe

Šaltinis	Scenarijus	N	Pdestroy / Ppassed	Numušta	Prasiveržė / liko	Kaip gauta	Naudojimas
[41]	2D hard-kill anti-swarm, vienas perėmėjas, $R_{min} = 10/20/30/40/50$ m	300	–	16 / 14 / 12 / 11 / 10	284 / 286 / 288 / 289 / 290	Tiesiogiai pateikta šaltinyje; likutis apskaičiuotas kaip 300 – numušta.	Tinka vieno perėmėjo efektyvumo palyginimui prieš 300 taikinių spiečių.
[41]	3D hard-kill anti-swarm, vienas perėmėjas, $R_{min} =$	300	–	9 / 7 / 7 / 7 / 6	291 / 293 / 293 / 293 / 294	Tiesiogiai pateikta šaltinyje; likutis apskaičiuotas	Tinka parodyti, kad 3D atveju efektyvumas mažesnis negu 2D scenarijuje.

Šaltinis	Scenarijus	N	Pdestroy / Ppassed	Numušta	Prasiveržė / liko	Kaip gauta	Naudojimas
	10/20/30/40/50 m					kaip 300 – numušta.	
[23]	Viena gynybos linija, $\lambda = 2$ taik./min, $\mu = 1$ /min, $M0 = 6, n1 = 2$	6	$P_{destroy} = 0,6;$ $P_{passed} = 0,4$	$E[\text{numušta}] = 3,6$	$E[\text{prasiveržė}] = 2,4$	Tiesiogiai pateikta lentelėje.	Tinka baziniam vienos linijos palyginimui.
[23]	Dvi gynybos linijos, $\lambda = 2$ taik./min, $\mu = 1$ /min, $M0 = 6, n1 = 2, n2 = 3$	6	$P_{destroy} = 0,963;$ $P_{passed} = 0,037$	$E[\text{numušta}] = 5,778$	$E[\text{prasiveržė}] = 0,222$	Tiesiogiai pateikta lentelėje.	Tinka parodyti, kaip daugialiniję gynyba mažina prasiveržimą.
[23]	Heterogeninė 2 linijų gynyba, $\lambda = 2$ taik./min, $M0 = 6, \mu1 = 2, \mu2 = 4$	6	$P_{destroy} = 0,863;$ $P_{passed} = 0,137$	$E[\text{numušta}] = 5,178$	$E[\text{prasiveržė}] = 0,822$	Tiesiogiai pateikta lentelėje.	Tinka heterogeninės sistemos palyginimui.
[23]	Heterogeninė 2 linijų gynyba, $\lambda = 2$ taik./min, $M0 = 6, \mu1 = 4, \mu2 = 2$	6	$P_{destroy} = 0,889;$ $P_{passed} = 0,111$	$E[\text{numušta}] = 5,334$	$E[\text{prasiveržė}] = 0,666$	Tiesiogiai pateikta lentelėje.	Tinka parodyti paslaugos spartos išdėstymo įtaką.
[43]	Stochastinis salvo pavyzdys, $A = B = 6, n\alpha = 8, p\alpha = 0,5, n\zeta = 4, p\zeta = 0,5$	6 laivai / 12 nominalių hitų	$P(\text{no survivors}) = 0,54;$ $P(\text{partial survive}) = 0,45; P(\text{no loss}) = 0,01$	$E[\text{numušta}] = 5,12$	$E[\text{išliko}] = 0,88$	Išlikę laivai tiesiogiai pateikti; numušta apskaičiuota kaip $6 - 0,88$.	Tinka stochastinio prasiskirstymo ir ne vien vidurkio palyginimui.
[23]	Monte Carlo verifikacijos scenarijus 6-on-3, $p\alpha = 0,67, p\zeta = 0,67, 50\ 000$ iteracijų	6 puolimo vienetai	$P(\text{loss} = 0) = 0,141$	$E[\text{nuostolis}] = 0,679$	95% kvantilis = 1,499; SD = 0,467	Tiesiogiai pateikta šaltinyje.	Tinka validuoti pasiskirstymo formą, kvantilius ir nulinių nuostolių tikimybę.

Lentelėje pateikti literatūroje randami skaitiniai prasiveržimų rizikos vertinimo pavyzdžiai rodo, kad rezultatas gali būti išreiškiamas ne vien tikimybe, bet ir neutralizuotų bei prasiveržusių taikinių skaičiumi, jų vidurkais arba likučio dydžiu. Šie pavyzdžiai svarbūs tuo, kad jie pagrindžia šiame darbe pasirinktą požiūrį vertinti sistemą per prasiveržusių UAV skaičiaus pasiskirstymą ir iš jo išvestus rizikos rodiklius. Taigi literatūros apžvalga sukuria formalų pagrindą metodinei ir teorinei darbo daliai, kurioje toliau bus aprašyti taikomi modeliai, jų prielaidos ir skaičiuojami rodikliai.

2. Metodinė ir teorinė dalis

Literatūros apžvalgoje nustatyta, kad „dronų sienos“ tipo C-UAS sistemos veiksmingumas turi būti vertinamas kaip vientisos veikimo grandinės rezultatas, o pagrindinis sistemos lygmens rodiklis yra prasiveržusių taikinių skaičius per apibrėžtą laiko langą. Taip pat parodyta, kad masinių UAV atakų sąlygomis bendrą rezultatą lemia ne tik pavienio perėmimo sėkmė, bet ir sistemos pajėgumo riba, dėl kurios atsiranda neaptarnautų taikinių dalis. Dėl šios priežasties tolesnėje darbo dalyje būtina pereiti nuo aprašomosios literatūros analizės prie formalizuoto matematinio aprašo, leidžiančio kiekybiškai įvertinti sistemos elgseną skirtingais scenarijais.

Šiame skyriuje suformuluojamas modeliavimo uždavinys, apibrėžiami pagrindiniai įėjimo ir išėjimo dydžiai, nustatomas analizės laiko langas, įvedama sistemos pajėgumo riba ir pateikiamos pagrindinės prielaidos, kuriomis remiasi tolesnis modeliavimas. Taip pat aptariamas binominio skirstinio taikymas, Monte Karlo metodo vieta šiame darbe ir aiškiai įvardijami pasirinkto modeliavimo ribotumai. Tokia struktūra reikalinga tam, kad vėlesniuose skyriuose pateikiamas matematinis modelis būtų ne tik formaliai taisyklingas, bet ir aiškiai susietas su literatūros apžvalgoje nustatyta problemos logika.

2.1. Modeliavimo uždavinio formalizavimas

Literatūros apžvalga parodė, kad „dronų sienos“ tipo C-UAS sistemos veiksmingumas turi būti vertinamas ne per atskirų technologinių komponentų charakteristikas, o per bendrą sistemos rezultatą – prasiveržusių taikinių skaičių per apibrėžtą laiko langą. Taip pat nustatyta, kad masinių UAV atakų sąlygomis bendrą rezultatą lemia dvi pagrindinės veiksnių grupės: tikimybiniai perėmimo grandinės apribojimai ir sistemos pajėgumo riba. Dėl šios priežasties šiame darbo etape pereinama nuo aprašomosios literatūros analizės prie formalizuoto matematinio uždavinio aprašo, leidžiančio susieti atakos mastą, sistemos pajėgumą, aptikimo ir neutralizavimo tikimybes bei galutinį prasiveržimų rezultatą.

Šiame darbe modeliavimo uždavinys formuluojamas kaip tikimybinis uždavinys, kuriame siekiama įvertinti, kiek nepilotuojamųjų orlaivių per pasirinktą laiko langą gali prasiveržti pro C-UAS sistemą. Vertinimas atliekamas neapsiribojant vien vidutiniu rezultatu. Kadangi aeronautikos ir gynybos uždaviniuose svarbūs ne tik tipiniai, bet ir kritiniai scenarijai, papildomai nagrinėjamos viršijimo tikimybės ir kvantiliai, leidžiantys apibūdinti prasiveržimų pasiskirstymo uodegą. Toks požiūris svarbus inžineriniu požiūriu, nes sprendimų priėmimui nepakanka žinoti vien tikėtiną rezultatą – būtina įvertinti ir nepalankių scenarijų riziką.

Modeliavimo uždavinio formalizavimas grindžiamas keliais pagrindiniais principais. Pirma, visi nagrinėjami dydžiai turi būti apibrėžti tam pačiam analizės intervalui, kad atakuojančių taikinių skaičius ir sistemos pajėgumas būtų tarpusavyje palyginami. Antra, būtina atskirti taikinius, kuriuos sistema spėja aptarnauti, nuo tų, kurie lieka neaptarnauti dėl prisotinimo. Trečia, aptarnautų taikinių baigtis turi būti aprašoma tikimybinio modeliu, leidžiančiu įvertinti sėkmingo perėmimo ir prasiveržimo galimybes. Galutinis rezultatas pateikiamas kaip prasiveržusių UAV skaičiaus pasiskirstymas ir iš jo išvesti rizikos rodikliai.

Formaliai šis uždavinys apima penkis pagrindinius įėjimo parametrus: atakuojančių UAV skaičių per pasirinktą laiko langą, sistemos pajėgumą per tą patį intervalą, aptikimo tikimybę, neutralizavimo sėkmės tikimybę ir galimų perėmimo bandymų skaičių vienam taikiniui. Toks parametrų rinkinys

leidžia aprašyti tiek atakos mastą, tiek sistemos ribotumus ir pavienio taikinio perėmimo logiką. Kartu jis yra pakankamai kompaktiškas, kad galėtų būti naudojamas tiek analitiniame binominiame modeliui, tiek Monte Karlo metodui.

Svarbu pabrėžti, kad šiame darbe atskiriamos dvi prasiveržimų kilmės formos. Pirmoji susijusi su tais atvejais, kai taikiny patenka į perėmimo grandinę, tačiau jo neutralizavimas nepavyksta dėl tikimybinės nesėkmės. Antroji susijusi su tais atvejais, kai sistema dėl riboto pajėgumo apskritai nebespėja taikinio aptarnauti per pasirinktą laiko langą. Toks atskyrimas leidžia parodyti, kokia prasiveržimų dalis atsiranda dėl nepakankamos perėmimo kokybės, o kokia – dėl sistemos prisotinimo. Aeronautikos inžinerijos požiūriu tai svarbu todėl, kad šios dvi priežastys reikalauja skirtingų sistemos tobulinimo sprendimų.

Šio poskyrio tikslas – problemą perkelti į matematiškai apibrėžtą formą. Todėl toliau apibrėžiamas analizės laiko langas, pateikiami modelio įėjimo parametrai, formalizuojama sistemos pajėgumo riba, aprašoma vieno taikinio perėmimo sėkmės tikimybė ir įvardijami pagrindiniai skaičiuojami išėjimo dydžiai. Tokia seka leidžia nuosekliai pereiti nuo uždavinio formulavimo prie konkrečių skirstinių, algoritmų ir matematinio modelio išvedimo.

Šio darbo uždavinys – tikimybiškai įvertinti, kiek UAV per pasirinktą laiko langą prasiverš pro C-UAS („dronų sienos“) sistemą. Vertinimas atliekamas ne vien pagal vidutinę reikšmę, bet ir pagal uodegos riziką – viršijimo tikimybes ir kvantilius (pvz., 95 % ir 99 %), nes masinių atakų sąlygomis būtent pasiskirstymo uodega apibūdina kritinius scenarijus [2, 31, 40].

2.1.1. Laiko langas ir analizės vienetas

Kad modeliavimo uždavinys būtų apibrėžtas nuosekliai, pirmiausia būtina nustatyti analizės laiko langą ir analizės vienetą. Šiame darbe visi pagrindiniai dydžiai apibrėžiami tam pačiam laiko intervalui, nes tik tokiu atveju galima tiesiogiai palyginti atakuojančių taikinių skaičių ir sistemos pajėgumą. Jei vienas dydis būtų nusakomas, pavyzdžiui, per minutę, o kitas per dešimt minučių ar per visą atakos epizodą, jų palyginimas būtų nekorektiškas ir neleistų tvarkingai formalizuoti prisotinimo sąlygos.

Šiame darbe analizės laiko langas žymimas T . Jis apibrėžiamas kaip pasirinktas baigtinis laiko intervalas, per kurį vertinama visa nagrinėjama atakos situacija: kiek UAV per šį laiką patenka į sistemos veikimo zoną, kiek jų sistema pajėgi aptarnauti ir kiek jų galiausiai prasiveržia. Taigi T yra bazinis intervalas, kuriam turi būti suvienodinti visi pagrindiniai modelio parametrai.

Formaliu požiūriu UAV skaičius ir sistemos pajėgumas laiko lange T apibrėžiami pagal (2.1)–(2.2) formules:

$$N = N(T); \tag{2.1}$$

$$C = C(T). \tag{2.2}$$

čia N – per laiko langą T į sistemą patenkančių UAV skaičius; C – maksimalus taikinių skaičius, kurį sistema gali aptarnauti per tą patį laikotarpį.

Kadangi tolesniuose skaičiavimuose naudojami sutrumpinti žymėjimai, darbe taikomi parametrai N ir C , kurie visada interpretuojami kaip funkcijos nuo laiko intervalo T .

Sistemos būsenos sąlygos apibrėžiamos pagal (2.3)–(2.4) nelygybes:

$$N \leq C; \quad (2.3)$$

$$N > C. \quad (2.4)$$

Analizės vienetu šiame darbe laikomas vienas atakuojantis UAV per pasirinktą laiko langą T . Toks pasirinkimas yra patogus todėl, kad leidžia kiekvieną taikinį nagrinėti kaip atskirą modelio elementą, kuriam gali būti priskirta aptikimo, aptarnavimo ir neutralizavimo baigtis. Tuo pačiu galutinis rezultatas vertinamas ne pavienio UAV lygmeniu, bet kaip visų nagrinėjamo intervalo taikinių visuma, t. y. prasiveržusių taikinių skaičius per T . Tokiu būdu išlaikomas ryšys tarp mikrol lygmens įvykio, kai sprendžiama vieno taikinio baigtis, ir sistemos lygmens rezultato, kai vertinama visa ataka.

Svarbu pabrėžti, kad laiko lango pasirinkimas tiesiogiai veikia modelio interpretaciją. Tas pats C -UAS sprendinys gali būti pakankamas, jei UAV srautas į sistemą patenka išskaidytai per ilgesnį laiką, tačiau nepakankamas, jei tas pats taikinių skaičius pasirodo per trumpą, koncentruotą intervalą. Dėl šios priežasties T šiame darbe nėra tik formalus dydis. Jis lemia, kaip interpretuojami pagrindiniai parametrai, kaip vertinamas sistemos pajėgumas ir kaip atsiranda prisotinimo efektas.

Aeronautikos inžinerijos požiūriu toks formalizavimas yra svarbus todėl, kad leidžia pereiti nuo bendro kokybinio teiginio apie „didelį UAV skaičių“ prie kiekybiškai apibrėžto scenarijaus. Vietoje neapibrėžto masinės atakos aprašymo gaunamas konkretus modelio pagrindas: per intervalą T į sistemą patenka N taikinių, o sistema per tą patį intervalą gali aptarnauti daugiausia C taikinių. Tolimesniuose poskyriuose šis pagrindas bus panaudotas formalizuojant įėjimo parametrus, prisotinimo sąlygą ir prasiveržusių UAV skaičiaus modelį.

2.1.2. Modelio įėjimo parametrai

Kad „dronų sienos“ veiksmingumas būtų vertinamas nuosekliai ir kiekybiškai, būtina aiškiai apibrėžti modelio įėjimo parametrus. Šiame darbe pasirenkamas parametru rinkinys, leidžiantis vienoje schemoje aprašyti atakos mastą, sistemos pajėgumo ribą ir pavienio taikinio perėmimo tikimybinę logiką. Remiantis literatūros apžvalgoje aptartais principais, modeliavime naudojami penki pagrindiniai įėjimo parametrai: atakuojančių UAV skaičius per pasirinktą laiko langą, sistemos pajėgumas, aptikimo tikimybė, neutralizavimo sėkmės tikimybė ir galimų bandymų skaičius vienam taikiniui.

Pirmasis parametras yra atakuojančių UAV skaičius N . Jis apibrėžiamas kaip taikinių skaičius, patenkantis į sistemos veikimo zoną per pasirinktą analizės laiko langą T . Šis dydis nusako bendrą atakos mastą ir yra vienas svarbiausių veiksnių vertinant, ar sistema veikia nominaliu režimu, ar artėja prie prisotinimo ribos. Didėjant N reikšmei didėja sistemos apkrova ir tikimybė, kad dalis taikinių liks neaptarnauti.

Antrasis parametras yra sistemos pajėgumas C . Jis nusako maksimalų taikinių skaičių, kurį sistema gali aptarnauti per tą patį laiko langą T . Šis dydis apima ne vien neutralizavimo priemonių kiekį, bet ir visos grandinės galimybes: aptikimo, sekimo, identifikavimo, sprendimų priėmimo ir neutralizavimo spartą. Todėl C šiame darbe interpretuojamas kaip bendras sistemos pralaidumo rodiklis.

Trečiasis parametras yra aptikimo, identifikavimo ir teisingo taikinio priskyrimo tikimybė P_d . Ji nusako tikimybę, kad atakuojantis UAV bus laiku aptiktas, teisingai identifikuotas ir perduotas į tolimesnę sistemos veikimo grandinę.

Ketvirtasis parametras yra neutralizavimo sėkmės tikimybė P_k . Ji nusako tikimybę, kad taikiny, patekęs į neutralizavimo etapą, bus sėkmingai sustabdytas. Ši tikimybė interpretuojama kaip apibendrintas neutralizavimo etapo veiksmingumo rodiklis, apimantis fizinio poveikio ar kitų perėmimo priemonių efektyvumą. Kartu su P_d ji sudaro pagrindinę tikimybinę modelio dalį.

Penktasis parametras yra galimų bandymų skaičius m . Šis dydis įvedamas tam, kad modelyje būtų galima įvertinti situacijas, kai vienam taikiniui gali būti taikomas ne vienas, o keli neutralizavimo bandymai. Jei nagrinėjamoje schemoje taikomas vienas perėmimo bandymas, laikoma, kad $m = 1$. Jei sistema leidžia pakartotinius bandymus arba kelių poveikio priemonių panaudojimą tam pačiam UAV, m gali būti didesnis už vienetą.

Taigi šiame darbe modelio įėjimo parametrų rinkinys apibrėžiamas taip:

N – atakuojančių UAV skaičius per laiko langą T ;

C – sistemos pajėgumas per tą patį laiko langą T ;

P_d – aptikimo tikimybė;

P_k – neutralizavimo sėkmės tikimybė;

m – galimų bandymų skaičius vienam taikiniui.

Šie parametrai sudaro pagrindą tolesniam modeliavimo uždavinio formalizavimui. Jie leidžia vienoje schemoje susieti atakos mastą, sistemos pajėgumo ribą ir pavienio taikinio perėmimo logiką. Tolesniuose poskyriuose iš šio parametrų rinkinio bus išvedama prisotinimo sąlyga, aptarnautų ir neaptarnautų taikinių skaičius bei prasiveržusių UAV skaičiaus pasiskirstymas

2.1.3. Sistemos pajėgumo riba ir prisotinimo sąlyga

Vienas svarbiausių šio darbo modeliavimo elementų yra sistemos pajėgumo ribos formalizavimas. Literatūros apžvalgoje parodyta, kad masinių UAV atakų atveju prasiveržimų skaičių lemia ne tik pavienio perėmimo sėkmės tikimybė, bet ir tai, ar sistema apskritai spėja aptarnauti visus taikinius per pasirinktą laiko langą. Dėl šios priežasties šiame darbe sistemos pajėgumas laikomas savarankišku modelio parametru, kuris apibrėžia viršutinę aptarnaujamų taikinių ribą per analizės intervalą T .

Kaip jau nurodyta ankstesniame poskyryje, per laikotarpį T į sistemos veikimo zoną patenka N atakuojančių UAV, o sistema per tą patį laiką gali aptarnauti daugiausia C taikinių. Čia aptarnavimas suprantamas plačiąja prasme, t. y. kaip taikinio įtraukimas į veikimo grandinę nuo aptikimo ir sekimo iki sprendimo dėl neutralizavimo. Todėl parametras C nusako ne vien neutralizavimo priemonių kiekį, bet bendrą visos sistemos pralaidumą.

Tuomet sistemos pajėgumo ribos sąlygomis aptarnautų taikinių skaičius žymimas N_a , o neaptarnautų taikinių skaičius – N_u . Šie dydžiai naudojami kaip tarpiniai modelio kintamieji, o bendras

prasiveržusių taikinių skaičius darbe žymimas B . Tarpiniai dydžiai apibrėžiami pagal (2.5)–(2.6) formules:

$$N_a = \min(N, C); \quad (2.5)$$

$$N_u = \max(0, N - C). \quad (2.6)$$

čia N_a – aptarnautų taikinių skaičius; N_u – neaptarnautų taikinių skaičius; N – atakuojančių UAV skaičius; C – sistemos pajėgumas.

Šios išraiškos reiškia, kad jei atakuojančių taikinių skaičius neviršija sistemos pajėgumo, t. y. tenkinama sąlyga (2.7), visi taikiniai gali būti aptarnauti, kaip parodyta (2.8)–(2.9) formulėse:

$$N \leq C; \quad (2.7)$$

$$N_a = N; \quad (2.8)$$

$$N_u = 0. \quad (2.9)$$

Tačiau jei atakuojančių taikinių skaičius viršija sistemos pajėgumą, tenkinama sąlyga (2.10):

$$N > C. \quad (2.10)$$

tokiu atveju sistema per nagrinėjamą laiko langą pajėgi aptarnauti tik C taikinių, o likusi dalis tampa neaptarnautais taikiniais, kaip apibrėžta (2.11)–(2.12) formulėse:

$$N_a = C; \quad (2.11)$$

$$N_u = N - C. \quad (2.12)$$

Ši situacija šiame darbe laikoma sistemos prisotinimo režimu. Ji reiškia, kad per pasirinktą laiko langą į sistemą patenka daugiau taikinių, negu sistema pajėgi aptarnauti. Tokiu atveju dalis UAV lieka už pilnos perėmimo grandinės ribų, todėl jų prasiveržimas tampa galimas nepriklausomai nuo aptiktų ir aptarnautų taikinių perėmimo tikimybių. Dėl to bendrą prasiveržusių taikinių skaičių lemia dvi dedamosios: neaptarnauti taikiniai dėl pajėgumo stokos ir aptarnauti, bet nesėkmingai perimti taikiniai.

Svarbu pabrėžti, kad sistemos pajėgumo riba C šiame darbe interpretuojama kaip apibendrintas sistemos veikimo rodiklis. Praktikoje ją gali riboti sekimo kanalų skaičius, informacijos apdorojimo delsa, sprendimų priėmimo sparta, operatorių apkrova ar neutralizavimo priemonių parengtis. Tačiau siekiant išlaikyti modelio aiškumą, visi šie ribojimai sujungiami į vieną parametą C .

Toks formalizavimas leidžia aiškiai atskirti režimą, kuriame sistema dar gali aptarnauti visus taikinius, nuo režimo, kuriame pradeda formuotis neaptarnautų UAV dalis. Šis atskyrimas būtinas tolesniam matematiniam modeliui, nes tik apibrėžus N_a ir N_u galima korektiškai apskaičiuoti bendrą prasiveržusių UAV skaičių.

Taigi sistemos pajėgumo riba šiame darbe laikoma vienu pagrindinių veiksnių, lemiančių „dronų sienos“ veiksmingumą masinės atakos sąlygomis. Prisotinimo sąlyga $N > C$, aprašyta formule (2.10), žymi perėjimą į režimą, kuriame dalis UAV prasiveržia jau vien dėl sistemos resursų stokos.

2.1.4. Vieno taikinio perėjimo sėkmės tikimybė

Apibrėžus sistemos pajėgumo ribą ir atskyrus aptarnautus bei neaptarnautus taikinius, toliau būtina formalizuoti vieno aptarnauto taikinio baigtį perėmimo grandinėje. Šiame darbe laikoma, kad aptarnautas UAV gali arba būti sėkmingai sustabdytas, arba prasiveržti dėl nesėkmingo aptikimo ir (arba) neutralizavimo. Kadangi nagrinėjama „dronų sienos“ tipo sistema sudaryta iš nuoseklios veikimo grandinės, vieno taikinio baigtis siejama su pagrindinių grandinės etapų sėkme.

Paprasčiausiu atveju vieno taikinio sėkmingas sustabdymas priklauso nuo dviejų pagrindinių tikimybinių veiksnių: aptikimo tikimybės P_d ir neutralizavimo sėkmės tikimybės P_k . Šiame darbe laikoma, kad neutralizavimo etapas vykdomas tik tada, kai taikiny buvo aptiktas ir perduotas tolesniam apdorojimui. Tuomet vieno aptarnauto taikinio sėkmingo sustabdymo tikimybė žymima P_s ir apibrėžiama pagal (2.13) formulę:

$$P_s = P_d \times P_k. \quad (2.13)$$

Formulė (2.13) reiškia, kad sėkmingam perėmimui būtina abiejų etapų sėkmė: taikiny turi būti aptiktas ir po to sėkmingai neutralizuotas. Toks užrašymas yra tinkamas baziniam modeliui, kai perėmimo grandinė supaprastinama iki dviejų pagrindinių tikimybinių etapų. Aeronautikos ir gynybos sistemų kontekste toks formalizavimas yra priimtinas tada, kai siekiama išlaikyti modelio aiškumą ir kartu aprašyti pagrindinį fizinį procesą.

Tuomet vieno aptarnauto taikinio prasiveržimo tikimybė žymima P_b . Kadangi nagrinėjamos tik dvi galimos baigtys – sėkmingas sustabdymas arba prasiveržimas, ši tikimybė apskaičiuojama kaip papildinys iki vieneto:

$$P_b = 1 - P_s. \quad (2.14)$$

Įstatant formulę (2.13) į formulę (2.14), gaunama:

$$P_b = 1 - P_d \times P_k. \quad (2.15)$$

Formulė (2.15) nusako vieno aptarnauto taikinio prasiveržimo tikimybę tuo atveju, kai vertinamas vienas perėmimo bandymas. Tai reiškia, kad net jei sistema taikinių aptarnauja, prasiveržimas vis tiek gali įvykti dėl dviejų priežasčių: taikiny gali nebūti aptiktas arba, būdamas aptiktas, gali nebūti sėkmingai neutralizuotas. Tokiu būdu šiame darbe vieno aptarnauto taikinio prasiveržimas interpretuojamas kaip tikimybinė perėmimo grandinės nesėkmė.

Tais atvejais, kai vienam taikiniui gali būti taikoma daugiau negu viena neutralizavimo galimybė, modelyje įvedamas bandymų skaičius m . Jei laikoma, kad kiekvienas bandymas turi tą pačią sėkmės tikimybę P_s , o bandymai tarpusavyje nepriklausomi, tuomet tikimybė, kad visi m bandymai bus nesėkmingi, apskaičiuojama taip:

$$P_b^{(m)} = (1 - P_s)^m. \quad (2.16)$$

Kadangi pagal formulę (2.13), gaunama:

$$P_b^{(m)} = (1 - P_d \times P_k)^m. \quad (2.17)$$

Formulė (2.17) nusako vieno aptarnauto taikinio prasiveržimo tikimybę, kai sistema gali atlikti m nepriklausomų bandymų. Ši išraiška rodo, kad didėjant bandymų skaičiui, bendro prasiveržimo tikimybė mažėja. Vis dėlto praktikoje bandymų skaičiaus didinimas nėra neribotas, nes kiekvienas papildomas bandymas sunaudoja sistemos laiką ir resursus, todėl gali mažinti bendrą pajėgumą kitų taikinių atžvilgiu. Dėl šios priežasties šiame darbe m interpretuojamas kaip ribotas ir scenarijui priklausantis parametras.

Atitinkamai vieno aptarnauto taikinio sėkmingo sustabdymo tikimybė, kai galimi m bandymai, apskaičiuojama kaip papildinys iki vieneto:

$$P_s^{(m)} = (1 - P_b)^m. \quad (2.18)$$

Įstatant formulę (2.17), gaunama:

$$P_s^{(m)} = 1 - (1 - P_d \times P_k)^m. \quad (2.19)$$

Formulė (2.19) leidžia vieno taikinio perėmimo sėkmės tikimybę išreikšti per aptikimo tikimybę P_d , neutralizavimo tikimybę P_k ir galimų bandymų skaičių m . Toks užrašymas yra pakankamai paprastas analitiniam taikymui ir kartu tinkamas Monte Karlo metodo realizacijai.

Svarbu pabrėžti, kad šiame poskyryje nagrinėjama tik aptarnauto taikinio baigtis. Todėl formulės (2.13)–(2.19) taikomos tik aptarnautų taikinių skaičiui N_a . Neaptarnauti taikiniai N_u , atsirandantys dėl sistemos prisotinimo, šiame modelio etape nėra vertinami kaip tikimybinio perėmimo objektai, nes jų prasiveržimą lemia sistemos pajėgumo trūkumas.

Taigi šiame darbe vieno taikinio perėmimo sėkmė formalizuojama kaip nuoseklios perėmimo grandinės rezultatas. Vieno bandymo atveju ji aprašoma formule (2.13), o kelių bandymų atveju – formule (2.19). Šis formalizavimas sudaro pagrindą tolesniam etapui, kuriame nuo pavienio aptarnauto taikinio pereinama prie visų aptarnautų taikinių pasiskirstymo ir bendro prasiveržusių UAV skaičiaus modelio.

2.1.5. Modelio išėjimo dydžiai

Apibrėžus analizės laiko langą, modelio įėjimo parametrus, sistemos pajėgumo ribą ir vieno aptarnauto taikinio perėmimo sėkmės tikimybę, būtina nustatyti pagrindinius modelio išėjimo dydžius. Kadangi šiame darbe vertinamas „dronų sienos“ veiksmingumas masinės UAV atakos sąlygomis, išėjimo dydžiai turi aprašyti ne pavienio taikinio, o visos atakos rezultatą per pasirinktą laiko langą T .

Pagrindinis modelio išėjimo dydis yra bendras prasiveržusių UAV skaičius B . Šis dydis nusako, kiek atakuojančių taikinių per nagrinėjamą laikotarpį nebuvo sėkmingai sustabdyta ir pasiekė prasiveržimo būseną. Kadangi prasiveržimai gali atsirasti dėl dviejų skirtingų priežasčių, B šiame darbe skaidomas į dvi dedamąsias: neaptarnautus taikinius dėl sistemos prisotinimo ir aptarnautus, bet nesėkmingai perimtus taikinius.

Neaptarnautų taikinių skaičius jau buvo apibrėžtas formule (2.6).

Tuo tarpu aptarnautų, bet prasiveržusių taikinių skaičius žymimas. Šis dydis nusako, kiek iš aptarnautų taikinių N_a nebuvo sėkmingai sustabdyti dėl tikimybinės perėmimo grandinės nesėkmės. Tuomet bendras prasiveržusių taikinių skaičius apskaičiuojamas taip:

$$B = N_u - B_a. \quad (2.20)$$

Formulė (2.20) yra viena svarbiausių šiame darbe, nes ji sujungia abi prasiveržimų kilmės formas į vieną bendrą sistemos lygmens rezultata. Ji reiškia, kad galutinis prasiveržusių UAV skaičius susidaro iš taikinių, kurių sistema neaptarnavo dėl riboto pajėgumo, ir taikinių, kuriuos sistema aptarnavo, bet nesėkmingai perėmė.

Kadangi ankstesniame poskyryje vieno aptarnauto taikinio prasiveržimo tikimybė, kai galimi m bandymai, buvo apibrėžta formule, aptarnautų, bet prasiveržusių taikinių skaičius gali būti nagrinėjamas kaip atsitiktinis dydis, priklausantis nuo aptarnautų taikinių skaičiaus N_a ir vieno aptarnauto taikinio prasiveržimo tikimybės $P_b^{(m)}$. Taigi:

$$B_a \sim Bin(N_a, P_b^{(m)}). \quad (2.21)$$

Čia $Bin(*)$ reiškia binominį skirstinį. Formulė (2.21) rodo, kad iš N_a aptarnautų taikinių kiekvienas turi tą pačią prasiveržimo tikimybę $P_b^{(m)}$, todėl aptarnautų prasiveržusių taikinių skaičius yra binomiškai pasiskirstęs atsitiktinis dydis. Būtent ši išraiška sudaro pagrindą tolesniam binominio modelio taikymui.

Atsižvelgiant į formules (2.20) ir (2.21), bendras prasiveržusių UAV skaičius taip pat tampa atsitiktiniu dydžiu. Jo vidutinė reikšmė apskaičiuojama taip:

$$E[B] = N_u + E[B_a]. \quad (2.22)$$

Kadangi binominio skirstinio matematinė viltis yra lygi bandymų skaičiaus ir sėkmės tikimybės sandaugai, gaunama:

$$E[B_a] = N_a \times P_b^{(m)}. \quad (2.23)$$

Todėl

$$E[B] = N_u + N_a \times P_b^{(m)}. \quad (2.24)$$

Formulė (2.24) nusako tikėtiną bendrą prasiveržusių UAV skaičių per pasirinktą laiko langą. Ji ypač svarbi scenarijų palyginimui, nes leidžia įvertinti, kaip vidutinis rezultatas kinta keičiantis atakos mastui, sistemos pajėgumui, aptikimo tikimybei, neutralizavimo sėkmei ir bandymų skaičiui.

Tačiau vien vidutinės reikšmės nepakanka, nes šiame darbe svarbu vertinti ir riziką. Dėl šios priežasties papildomais modelio išėjimo dydžiais laikomi prasiveržusių taikinių skaičiaus dispersija, standartinis nuokrypis, viršijimo tikimybė ir pasirinkti kvantiliai. Kadangi šiame modelio etape N_u laikomas determinuotu dydžiu, o atsitiktinumas susijęs su aptarnautų, bet prasiveržusių taikinių skaičiumi B_a , bendro prasiveržusių taikinių skaičiaus dispersija lygi:

$$Var(B_a) = N_a \times P_b^{(m)} \times (1 - P_b^{(m)}). \quad (2.25)$$

Todėl

$$Var(B) = N_a \times P_b^{(m)} \times (1 - P_b^{(m)}). \quad (2.26)$$

Atitinkamai standartinis nuokrypis apskaičiuojamas taip:

$$\sigma_B = \sqrt{Var(B)}. \quad (2.27)$$

Be vidurkio ir dispersijos, šiame darbe svarbi ir viršijimo tikimybė, nes ji leidžia vertinti, kokia yra tikimybė, kad prasiveržusių taikinių skaičius bus lygus arba didesnis už pasirinktą kritinį slenkstį t . Šis rodiklis apibrėžiamas taip:

$$P(B \geq t). \quad (2.28)$$

Formulė (2.28) yra svarbi todėl, kad ji leidžia pereiti nuo vidutinio sistemos veiksmingumo prie rizikos vertinimo. Aeronautikos ir gynybos uždaviniuose dažnai svarbu ne vien tai, kiek taikinių prasiverš vidutiniškai, bet ir kokia tikimybė, kad jų skaičius viršys gynybos požiūriu nepriimtina lygį.

Taigi šiame etape modeliavimo uždavinys suformuluotas per pagrindinius įėjimo parametrus N , C , P_d , P_k ir m , o vertinami išėjimo rodikliai yra bendras prasiveržusių UAV skaičius, jo matematinė viltis, dispersija, standartinis nuokrypis, viršijimo tikimybė ir pasirinkti kvantiliai.

2.1.6. Galutinė modeliavimo uždavinio formulė

Apibendrinant ankstesniuose poskyriuose apibrėžtus parametrus, šiame darbe C-UAS sistemos veiksmingumo vertinimo uždavinys formuluojamas kaip prasiveržusių UAV skaičiaus modeliavimas per pasirinktą analizės laikotarpį T . Vertinama ne pavienio taikinio perėmimo baigtis, bet bendras sistemos rezultatas, kai dalį taikinių riboja sistemos pajėgumas, o dalis aptarnautų taikinių gali būti neperimti dėl tikimybinio neutralizavimo pobūdžio [2, 31, 40].

Todėl galutinis modeliavimo uždavinys formuluojamas taip: duoti analizės laiko langą T , atakuojančių UAV skaičių N , sistemos pajėgumą C , aptikimo tikimybę P_d , neutralizavimo tikimybę P_k ir neutralizavimo bandymų skaičių m , reikia nustatyti atsitiktinio dydžio B , nusakančio prasiveržusių UAV skaičių per T , pasiskirstymą ir iš jo apskaičiuoti rodiklius $E[B]$, $Var(B)$, $P(B \geq t)$, $Q_{0,95}$ ir $Q_{0,99}$ kad būtų įvertinta sistemos prasiveržimų rizika prisotinimo sąlygomis. [2, 31, 40].

Čia t yra pasirenkamas kritinis slenkstis, nusakanantis leistiną prasiveržusių UAV skaičių, o $Q_{0,95}$ ir $Q_{0,99}$ yra kvantiliai, apibūdinantys blogesniųjų atvejų riziką [31]. Tokia uždavinio formulė sudaro pagrindą kitame poskyryje pereiti prie binominio modelio sudarymo ir jo taikymo prielaidų.

2.2. Binominio modelio sudarymas ir taikymo prielaidos

Šiame darbe binominis modelis pasirenkamas kaip bazinis analitinis metodas prasiveržusių UAV skaičiui vertinti pasirinktame analizės laiko lange. Toks pasirinkimas grindžiamas tuo, kad nagrinėjamoje sistemoje dalis taikinių per laikotarpį T gali būti laikomi aptarnautais, o kiekvieno aptarnauto taikinio baigtis gali būti aprašoma dviem galimomis išeitimis – sėkmingu neutralizavimu

arba prasiveržimu. Tokia schema atitinka Bernulio bandymų logiką ir leidžia taikyti binominį skirstinį neutralizuotų bei prasiveržusių taikinių skaičiaus pasiskirstymui aprašyti [26, 27, 29, 32].

Binominio modelio taikymo tikslas šiame darbe yra ne vien apskaičiuoti vidutinį prasiveržusių UAV skaičių, bet ir gauti visą galimų baigčių pasiskirstymą. Tai leidžia nustatyti ne tik matematinę viltį ir dispersiją, bet ir praktiniu požiūriu svarbias viršijimo tikimybes bei kvantilius, kurie reikalingi C-UAS sistemos rizikai vertinti [2, 31, 40]. Tokiu būdu binominis modelis šiame darbe naudojamas kaip pirmojo lygmens metodas, leidžiantis greitai ir skaidriai įvertinti sistemos elgseną fiksuotų parametrų atveju, o vėliau šie rezultatai lyginami su Monte Karlo simuliacija [31, 35].

2.2.1. Binominio modelio prielaidos

Kad binominis modelis būtų taikomas korektiškai, šiame darbe priimamos kelios esminės prielaidos.

Pirma, laikoma, kad per pasirinktą analizės laiko langą į ginamą erdvę patenka baigtinis UAV skaičius N , o sistema per tą patį laiką gali aptarnauti ne daugiau kaip C taikinių. Tai reiškia, kad jei $N \leq C$, visi taikiniai teoriškai gali būti perduoti neutralizavimo grandinei, o jei $N > C$, dalis jų lieka neaptarnauti vien dėl sistemos pajėgumo stokos [2, 40]. Tokia prielaida leidžia aiškiai atskirti dvi prasiveržimų kilmės dalis: neaptarnautus taikinius dėl prisotinimo ir aptarnautų taikinių neutralizavimo nesėkmės [2, 6, 7].

Antra, laikoma, kad kiekvieno aptarnauto taikinio neutralizavimo baigtis nagrinėjama kaip nepriklausomas Bernulio bandymas su ta pačia sėkmės tikimybe. Ši sėkmės tikimybė apima visą grandinę nuo aptikimo iki neutralizavimo ir supaprastintu atveju grindžiama aptikimo tikimybe P_d ir neutralizavimo tikimybe P_k [2, 40]. Jei vienam taikiniui gali būti skiriama daugiau kaip viena neutralizavimo priemonė, įvedamas bandymų skaičius m , kuris leidžia modelyje įvertinti pakartotinių bandymų įtaką bendram rezultatui [2, 4, 40].

Trečia, laikoma, kad nagrinėjamame laiko lange modelio parametrai yra pastovūs. Tai reiškia, kad P_d , P_k , m ir C pasirinkto scenarijaus ribose nekinta, o visi aptarnauti taikiniai nagrinėjami tomis pačiomis sąlygomis. Tokia prielaida būtina analitiniam modeliui sudaryti, tačiau kartu ji reiškia, kad modelis neaprašo sistemos būsenos kitimo laike, išteklių užimtumo ar parametrų sklaidos [31, 35].

Ketvirta, modelyje laikoma, kad neaptarnauti taikiniai nepriskiriami tikimybinei perėmimo daliai. Jie laikomi prasiveržusiais vien dėl to, kad sistema dėl riboto pajėgumo jų neįtraukė į pilną perėmimo grandinę. Todėl binominis atsitiktinumas šiame modelyje taikomas tik aptarnautų taikinių daliai [2, 40].

2.2.2. Binominio modelio formulavimas

Tarkime, kad per pasirinktą analizės laikotarpį į saugomą erdvę patenka N UAV, o sistema gali aptarnauti ne daugiau kaip C taikinių. Toliau naudojami anksčiau formulėmis (2.5) ir (2.6) apibrėžti aptarnautų ir neaptarnautų taikinių skaičiai N_a ir N_u . Šie dydžiai leidžia atskirti taikinius, kurie perduodami neutralizavimo grandinei, nuo taikinių, liekančių neaptarnautų dėl pajėgumo stokos [2, 6, 7, 40].

Vieno aptarnauto taikinio sėkmingo neutralizavimo tikimybė apibrėžiama formule (2.19) ir žymima $P_s^{(m)}$.

Kadangi kiekvieno aptarnauto taikinio neutralizavimo baigtis aprašoma Bernulio bandymu, neutralizuotų taikinių skaičius X modeliuojamas binominiu skirstiniu:

$$X \sim \text{Bin}(N_a, P_s^{(m)}). \quad (2.29)$$

Iš čia gaunamos pagrindinės statistinės charakteristikos:

$$E[X] = N_a \times P_s^{(m)}; \quad (2.30)$$

$$\text{Var}(X) = N_a \times P_s^{(m)} \times (1 - P_s^{(m)}); \quad (2.31)$$

$$\sigma_X = \sqrt{\text{Var}(X)}. \quad (2.32)$$

Čia X žymi neutralizuotų aptarnautų taikinių skaičių, o bendras sistemos rezultatas išreiškiamas per prasiveržusių taikinių skaičių B . Šios išraiškos atitinka klasikinę binominio skirstinio logiką ir leidžia apskaičiuoti neutralizuotų taikinių vidurkį, dispersiją bei standartinį nuokrypį [26, 32].

Kadangi bendras prasiveržusių UAV skaičius susideda iš neaptarnautų taikinių ir aptarnautų, bet neneutralizuotų taikinių, jis apibrėžiamas taip:

$$B = N - X. \quad (2.33)$$

Atsižvelgiant į anksčiau apibrėžtus dydžius N_u ir N_a , formulė (2.30) lygiaverčiai perrašoma taip:

$$B = N_u + (N_a - X). \quad (2.34)$$

Formulė (2.34) parodo, kad bendras prasiveržusių UAV skaičius susideda iš dviejų dalių: pajėgumo stokos sukeltų prasiveržimų ir nesėkmingo neutralizavimo sukeltų prasiveržimų [2, 6, 7].

Kadangi B yra atsitiktinis dydis, iš jo apskaičiuojami pagrindiniai rizikos rodikliai: matematinė viltis, dispersija, standartinis nuokrypis, viršijimo tikimybė ir kvantiliai. Viršijimo tikimybė apibrėžiama taip:

$$P(B \geq t). \quad (2.35)$$

čia t yra pasirinktas kritinis prasiveržusių UAV skaičiaus slenkstis. Iš pasiskirstymo taip pat nustatomi kvantiliai $Q_{0.95}$ ir $Q_{0.99}$, apibūdinantys blogesniųjų scenarijų ribas [2, 31, 40].

2.2.3. Binominio modelio taikymo ribos

Nors binominis modelis yra analitiškai paprastas ir aiškus, jo taikymas remiasi keliomis idealizuojančiomis prielaidomis. Pirmiausia daroma prielaida, kad visi aptarnauti taikiniai yra statistiškai nepriklausomi ir turi tą pačią sėkmingo neutralizavimo tikimybę. Realiame C-UAS scenarijuje ši sąlyga ne visada tenkinama, nes taikinių baigtys gali būti susijusios dėl bendrų aplinkos sąlygų, jutiklių apkrovos, trukdžių, prioritizavimo ar operatoriaus sprendimų [2, 40]. Dėl to realus prasiveržimų pasiskirstymas gali skirtis nuo idealizuoto binominio modelio.

Antra, modelis neaprašo laiko dinamikos. Jame daroma prielaida, kad per pasirinktą analizės langą taikiniai gali būti nagrinėjami kaip vienas rinkinys, tačiau realybėje svarbu ne tik kiek taikinių patenka į sistemą, bet ir kada jie patenka bei kaip paskirstomi sistemos resursai [2, 40]. Dėl šios priežasties

binominis modelis negali tiksliai atspindėti eilių formavimosi, užimtumo ir prisotinimo plėtos laike. Šis ribotumas ypač aktualus grupinių arba banginių UAV atakų atvejais [6, 7].

Trečia, modelyje neįvertinami papildomi praktiniai veiksniai, tokie kaip klaidingi aptikimai, klaidinga klasifikacija, skirtingi taikinių prioritetai ar aktyvios elektroninės kovos priemonės [2, 40]. Dėl šios priežasties binominis modelis šiame darbe traktuojamas kaip bazinis pirmojo lygmens vertinimo įrankis, o sudėtingesniems scenarijams papildomai taikomas Monte Karlo metodas [31, 35, 39].

Svarbu pabrėžti, kad realiose sistemose aptikimo ir neutralizavimo tikimybės dažnai priklauso nuo sistemos apkrovos, taikinių skaičiaus ir jų pasiskirstymo laike. Todėl P_d ir P_k praktikoje gali būti dinaminės, o jų pastovumo prielaida laikytina supaprastinimu.

Binominis modelis yra tinkamas tada, kai siekiama greitai ir skaidriai įvertinti prasiveržusių UAV skaičiaus pasiskirstymą esant fiksuotiems parametrams ir supaprastintoms sąlygoms. Jo pagrindinis privalumas yra analitinis aiškumas ir galimybė tiesiogiai apskaičiuoti pagrindinius rizikos rodiklius [26, 32]. Tačiau kai būtina įtraukti laiko dinamiką, koreliacijas, prioritetizavimą ar sudėtingesnę sistemos elgseną prisotinimo režime, vien binominio modelio nebepakanka. Dėl šios priežasties šiame darbe jis naudojamas kaip bazinis analitinis įrankis, o sudėtingesnėms situacijoms analizuoti papildomai taikomas Monte Karlo metodas [31, 35, 39].

2.3. Monte Karlo metodo metodika

2.3.1. Monte Karlo metodo taikymo logika

Nors binominis modelis leidžia analitiškai įvertinti prasiveržusių UAV skaičiaus pasiskirstymą, jo taikymas remiasi supaprastinančiomis prielaidomis apie parametrų pastovumą, bandymų nepriklausomumą ir laiko dinamikos nebuvimą [31, 35]. Dėl šios priežasties šiame darbe papildomai taikomas Monte Karlo metodas, leidžiantis tą pačią problemą spręsti generuojant daugkartines atsitiktines scenarijaus realizacijas [35, 36, 39].

Monte Karlo metodo esmė šiame darbe yra tokia: naudojant tuos pačius parametrus kaip ir binominiame modelyje – atakuojančių UAV skaičių N , sistemos pajėgumą C , aptikimo tikimybę P_d , neutralizavimo tikimybę P_k ir bandymų skaičių m – daug kartų atkuriamas galimas sistemos veikimas [2, 31, 40]. Kiekvienos iteracijos metu nustatoma, kiek taikinių lieka neaptarnauti dėl pajėgumo stokos ir kiek aptarnautų taikinių konkrečioje realizacijoje neutralizuojama. Vienos iteracijos rezultatas yra prasiveržusių UAV skaičius B_i .

Jeigu bendra iteracijų imtis žymima R , gaunama atsitiktinio dydžio B empirinių realizacijų seka:

$$B_1, B_2, \dots, B_R. \quad (2.36)$$

Iš šių realizacijų apskaičiuojami pagrindiniai statistiniai rodikliai. Empirinis vidurkis nustatomas pagal formulę:

$$\bar{B} = \frac{1}{R} \sum_{i=1}^R B_i. \quad (2.37)$$

o empirinė dispersija apskaičiuojama pagal išraišką:

$$s_B^2 = \frac{1}{R-1} \sum_{i=1}^R (B_i - \bar{B})^2. \quad (2.38)$$

Šios formulės leidžia Monte Karlo būdu įvertinti tuos pačius rodiklius, kurie binominiame modelyje buvo gauti analitiškai, t. y. prasiveržusių UAV skaičiaus vidurkį ir sklaidą [35, 36]. Be to, iš simuliacijos rezultatų galima tiesiogiai apskaičiuoti ir viršijimo tikimybę, kuri empiriškai nustatoma kaip santykinė iteracijų dalis, kuriose prasiveržusių UAV skaičius viršija pasirinktą kritinį slenkstį t :

$$\hat{P}(B \geq t) = \frac{1}{R} \sum_{i=1}^R I(B_i \geq t). \quad (2.39)$$

kur $I(B_i \geq t)$ yra indikatorinė funkcija, įgyjanti reikšmę 1, jei sąlyga tenkinama, ir 0, jei netenkinama.

Toks vertinimo būdas šiame darbe svarbus todėl, kad leidžia gauti ne tik vidutinę prasiveržimų reikšmę, bet ir visą galimų baigčių pasiskirstymą, iš kurio gali būti nustatomi kvantiliai, kraštinių scenarijų ribos ir uodegos rizika [31, 35, 39]. Aeronautikos inžinerijos požiūriu tai svarbu todėl, kad C-UAS sistemos efektyvumas turi būti vertinamas ne tik pagal tipinį scenarijų, bet ir pagal blogesnius atvejus, kai dėl atsitiktinių veiksnių ir sistemos apkrovos prasiveržusių taikinių skaičius viršija priimtina ribą.

Monte Karlo metodas šiame darbe naudojamas kaip binominio modelio papildinys. Binominis modelis suteikia aiškią analitinę struktūrą, o Monte Karlo metodas leidžia empiriškai įvertinti sudėtingesnius scenarijus ir blogesniųjų atvejų riziką [31, 35, 39]. Abu metodai taikomi tiems patiems scenarijams, todėl jų rezultatai gali būti tiesiogiai lyginami pagal prasiveržusių UAV skaičiaus vidurkį, dispersiją, viršijimo tikimybes ir kvantilius.

2.3.2. Simuliacijos algoritmo schema

Monte Karlo simuliacijos algoritmo paskirtis šiame darbe yra realizuoti prasiveržusių UAV skaičiaus modeliavimo eigą, naudojant tuos pačius įėjimo parametrus kaip ir binominiame modelyje: atakuojančių UAV skaičių N , sistemos pajėgumą C , aptikimo tikimybę P_d , neutralizavimo tikimybę P_k ir bandymų skaičių m [2, 31, 40].

Kiekvienos iteracijos pradžioje pagal sistemos pajėgumo ribą apskaičiuojamas aptarnautų taikinių skaičius:

$$N_a = \min(N, C). \quad (2.40)$$

Tuo pačiu nustatomas neaptarnautų taikinių skaičius:

$$N_u = \max(N - C, 0). \quad (2.41)$$

Toliau pagal formulę (2.19) nustatoma vieno aptarnauto taikinio sėkmingo neutralizavimo tikimybė $P_s^{(m)}$. Kiekvienam iš N_a aptarnautų taikinių sugeneruojama atsitiktinė neutralizavimo baigtis, pagal kurią nustatomas neutralizuotų taikinių skaičius X_i .

Tuomet prasiveržusių UAV skaičius i -ojoje iteracijoje apskaičiuojamas:

$$B_i = N_u + (N_a - X_i). \quad (2.42)$$

Formulė (2.42) atspindi bendrą modelio logiką: prasiveržusių UAV skaičius susideda iš neaptarnautų taikinių dėl sistemos pajėgumo stokos ir aptarnautų, bet nesėkmingai neutralizuotų taikinių.

Aprašyta procedūra kartojama R kartų, gaunant realizacijų seką B_1, B_2, \dots, B_R . Po to realizacijų imtis statistiškai apdorojama pagal formules (2.37)–(2.39), apskaičiuojant empirinius vidurkio, dispersijos, viršijimo tikimybės ir kvantilių įverčius [31, 35, 39].

Monte Karlo algoritmo eiga šiame darbe gali būti apibendrinta tokia seka:

1. Nustatomi įėjimo parametrai N, C, P_d, P_k, m ir iteracijų skaičius R .
2. Pagal formules (2.40) ir (2.41) apskaičiuojami aptarnautų ir neaptarnautų taikinių skaičiai.
3. Pagal formulę (2.42) apskaičiuojama vieno aptarnauto taikinio sėkmingo neutralizavimo tikimybė.
4. Kiekvienam aptarnautam taikiniui sugeneruojama atsitiktinė neutralizavimo baigtis.
5. Suskaičiuojamas neutralizuotų taikinių skaičius X_i .
6. Pagal formulę (2.42) apskaičiuojamas prasiveržusių UAV skaičius B_i .
7. Procedūra kartojama R kartų.
8. Gauti rezultatai statistiškai apdorojami pagal formules (2.37)–(2.39).

Ši algoritmo schema leidžia teorinį Monte Karlo metodo aprašymą tiesiogiai susieti su tolesniuose skyriuose pateikiamais skaitiniais rezultatais [35, 36].

2.3.3. Monte Karlo metodo taikymo ribos

Nors Monte Karlo metodas leidžia lanksčiau negu binominis modelis vertinti prasiveržusių UAV skaičiaus pasiskirstymą, jis taip pat turi aiškias taikymo ribas. Simuliacijos rezultatai tiesiogiai priklauso nuo pasirinktų įėjimo parametrų, jų skirstinių ir taikomų prielaidų. Tai reiškia, kad Monte Karlo metodas pats savaime nepašalina modelio neapibrėžtumo, o tik leidžia jį analizuoti daugkartinių realizacijų pagrindu [35, 36, 39]. Jei parametrai N, C, P_d, P_k ar m parinkti nepakankamai pagrįstai, net ir techniškai taisyklinga simuliacija gali pateikti mažai vertingus arba pernelyg optimistinius rezultatus.

Monte Karlo metodas šiame darbe remiasi ta pačia fizine logika kaip ir binominis modelis: atskiriami aptarnauti ir neaptarnauti taikiniai, o aptarnautų taikinių neutralizavimo baigtys generuojamos pagal pasirinktą sėkmės tikimybę. Todėl simuliacija išplečia analitinį vertinimą, tačiau nekeičia bazinės modelio struktūros. Jei modelyje neįtraukiami tokie veiksniai kaip klaidingi aptikimai, taikinių prioritetizavimas, perėmimo priemonių nevienalytiškumas ar elektroninės kovos poveikis, šie ribotumai išlieka ir Monte Karlo metode [2, 31, 40].

Metodo tikslumas priklauso nuo realizacijų skaičiaus R . Kuo didesnė iteracijų imtis, tuo stabilesni tampa empirinis vidurkis, dispersija ir viršijimo tikimybės įverčiai, tačiau kartu didėja ir skaičiavimo sąnaudos [35, 36]. Todėl praktikoje būtina parinkti pakankamą realizacijų skaičių, užtikrinantį rezultatų stabilumą ir skaičiavimo efektyvumą.

Skirtingai nuo binominio modelio, kuriame pagrindiniai rodikliai gaunami tiesiogiai iš uždaru formulių, Monte Karlo metode rezultatai nustatomi statistiškai apdorojant realizacijų imtį pagal formules (2.37)–(2.39). Dėl to metodas geriau tinka sudėtingesnių scenarijų vertinimui, tačiau ne visada taip aiškiai kaip analitinis modelis parodo, kuris konkretus parametras lemia rezultatą [35, 37, 39].

Svarbu ir tai, kad šiame darbe Monte Karlo metodas vis dar remiasi supaprastintu scenarijaus aprašymu per pasirinktą laiko langą. Nors metodas leidžia generuoti daug realizacijų, jis dar nereikia pilnos dinaminės sistemos simuliacijos. Detalesniam UAV atvykimo laiko, eilių formavimosi, resursų atsilaisvinimo ar skirtingų taikinių klasių sąveikos modeliavimui reikėtų sudėtingesnio simuliacinio arba agentinio modelio [25, 35, 39].

Todėl Monte Karlo metodas šiame darbe naudojamas kaip binominio modelio papildinys, leidžiantis lanksčiau įvertinti prasiveržusių UAV skaičiaus pasiskirstymą, viršijimo tikimybes ir blogesniųjų scenarijų riziką [31, 35, 39].

2.4. Matematinis modelis

2.4.1. Sistemos pajėgumo apribojimo įvedimas

Vienas svarbiausių šio darbo modelio elementų yra sistemos pajėgumo apribojimas. Masinių UAV atakų atveju „dronų sienos“ veiksmingumą lemia ne tik pavienio taikinio aptikimo ar neutralizavimo sėkmė, bet ir sistemos gebėjimas per pasirinktą laiko langą aptarnauti visą atakuojančių taikinių srautą [2, 6, 7, 40]. Todėl sistemos pajėgumas į modelį įtraukiamas kaip savarankiškas ribojantis veiksnys.

Kaip parodyta 2.3.2 poskyryje, aptarnautų taikinių skaičius apskaičiuojamas pagal formulę (2.40), o neaptarnautų taikinių skaičius – pagal formulę (2.41). Šie dydžiai kartu sudaro visą į sistemą patekusį UAV srautą, todėl modelyje tenkinama tapatybė

$$N = N_a + N_u. \quad (2.43)$$

Formulė (2.43) reiškia, kad bendras UAV skaičius suskaidomas į aptarnautus taikinius N_a ir neaptarnautus taikinius N_u . Toks skaidymas leidžia neaptarnautus taikinius tiesiogiai priskirti prisotinimo sukeltai prasiveržimų daliai, o aptarnautiems taikiniams taikyti tikimybinį perėmimo modelį.

Todėl neutralizavimo logika taikoma ne visam UAV skaičiui N , o tik aptarnautiems taikiniams N_a . Tuo tarpu N_u į bendrą prasiveržusių UAV skaičių įtraukiamas deterministiškai. Taip sistemos pajėgumo apribojimas tampa pirmuoju modelio sluoksniu, nusakančiu, kokia taikinių dalis apskritai gali patekti į pilną perėmimo grandinę.

Šis formalizavimas leidžia tiesiogiai įtraukti prisotinimo efektą ir išvengti pernelyg optimistinio sistemos veiksmingumo vertinimo. Vertinant tik pavienio taikinio neutralizavimo tikimybę būtų implicitiniu būdu daroma prielaida, kad sistema visada gali apdoroti visus taikinius. Tačiau masinių UAV atakų sąlygomis tokia prielaida nėra pagrįsta [6, 7, 25].

Todėl sistemos pajėgumo apribojimas šiame modelyje laikomas pirminiu filtru: pirmiausia nustatoma, kokia UAV dalis gali būti aptarnauta, o tik po to šiai daliai taikomas sėkmingo perėmimo tikimybės modelis.

2.4.2. Sėkmingo perėmimo tikimybės modelis

Po sistemos pajėgumo apribojimo įvedimo kitas modelio elementas yra sėkmingo aptarnauto taikinio perėmimo tikimybės aprašymas. Ši tikimybė nusako, kokia aptarnautų UAV dalis bus sėkmingai neutralizuota, o kokia, nors ir patekusi į perėmimo grandinę, vis tiek prasiverš dėl nesėkmingo perėmimo [2, 31, 40].

Kaip parodyta 2.2.2 ir 2.3.2 poskyriuose, vieno aptarnauto taikinio sėkmingo neutralizavimo tikimybė priklauso nuo aptikimo tikimybės P_d , neutralizavimo tikimybės P_k ir galimų bandymų skaičiaus m . Todėl formulė (2.19) šiame darbe naudojama kaip bazinė aptarnautų taikinių perėmimo modelio išraiška.

Matematinio modelio požiūriu formulė (2.19) jungia fizinę C-UAS veikimo logiką su tikimybinio vertinimu. Ji leidžia pavienio aptarnauto taikinio baigtį susieti su trimis pagrindiniais parametrais: aptikimo kokybe, neutralizavimo veiksmingumu ir pakartotinių bandymų galimybe. Dėl to sėkmingo perėmimo tikimybė modelyje nėra laikoma pastovia konstanta, bet apskaičiuojama iš anksčiau apibrėžtų parametrų.

Ši išraiška rodo, kad didėjant P_d ir P_k bendroji perėmimo tikimybė didėja. Analogiškai, didėjant bandymų skaičiui m , sėkmingo perėmimo tikimybė taip pat auga, tačiau jos prieaugis nėra tiesinis, nes rezultatas artėja prie ribinės reikšmės. Tai leidžia vertinti parametrų tarpusavio sąveiką bendrame modelyje [2, 4, 40].

Svarbu pabrėžti, kad ši tikimybė taikoma tik aptarnautų taikinių aibei N_a . Tai reiškia, kad neutralizavimo logika šiame etape taikoma ne visam UAV srautui N , o tik tai jo daliai, kuri patenka į pilną perėmimo grandinę. Tokiu būdu sėkmingo perėmimo modelis tampa antruoju bendro modelio sluoksniu po sistemos pajėgumo apribojimo.

Toks formalizavimas leidžia tiesiogiai susieti sistemos techninius parametrus su galutiniu perėmimo rezultatu. Mažėjant P_d , net ir aukšta P_k reikšmė negali pilnai kompensuoti veiksmingumo praradimo, nes dalis taikinių nepatenka į neutralizavimo grandinę. Tuo tarpu papildomų bandymų skaičius m leidžia įvertinti, kaip pakartotiniai bandymai mažina prasiveržimo riziką, nors kartu gali didinti sistemos apkrovą [2, 6, 7].

Todėl sėkmingo perėmimo tikimybės modelis šiame darbe naudojamas kaip pagrindas tolesniam prasiveržusių UAV skaičiaus modelio sudarymui.

2.4.3. Prasiveržusių taikinių skaičiaus modelis

Po sistemos pajėgumo apribojimo ir sėkmingo perėmimo tikimybės modelio apibrėžimo galima sudaryti bendrą prasiveržusių taikinių skaičiaus modelį. Šiame darbe pagrindinis sistemos lygmens rezultatas yra prasiveržusių UAV skaičius B , nusakantis, kiek taikinių per pasirinktą laiko langą nebuvo sustabdyta C-UAS sistemos [2, 31, 40].

Kaip parodyta ankstesniuose poskyriuose, bendras UAV srautas pirmiausia suskaidomas į aptarnautus ir neaptarnautus taikinius. Neaptarnauti taikiniai atsiranda dėl sistemos pajėgumo stokos, o aptarnautiems taikiniams taikomas tikimybinis neutralizavimo modelis. Todėl bendras prasiveržusių UAV skaičius apima dvi prasiveržimų kilmės formas: prisotinimo sukeltus prasiveržimus ir nesėkmingo perėmimo sukeltus prasiveržimus [2, 6, 7].

Bendras prasiveržusių UAV skaičius šiame darbe apibrėžtas formulėmis (2.33) ir (2.34). Formulė (2.33) nusako ryšį tarp bendro atakuojančių taikinių skaičiaus ir neutralizuotų taikinių skaičiaus, o formulė (2.34) išskaido prasiveržimus į dvi fiziškai skirtingas dedamąsias. Būtent formulė (2.34) laikoma pagrindine prasiveržimų modelio išraiška.

Modelio požiūriu ši išraiška sujungia abu ankstesnius modelio sluoksnius. Parametras N_u , apskaičiuojamas pagal formulę (2.41), aprašo deterministinę prasiveržimų dalį, atsirandančią dėl sistemos pajėgumo ribos. Tuo tarpu narys $(N_a - X)$ aprašo atsitiktinę prasiveržimų dalį, susijusią su nesėkmingu aptarnautų taikinių neutralizavimu. Kadangi neutralizuotų taikinių skaičius X aprašomas binominiu skirstiniu pagal formulę (2.29), bendras prasiveržusių UAV skaičius B taip pat tampa atsitiktiniu dydžiu, priklausančiu nuo N , C , P_d , P_k ir m .

Toks formalizavimas leidžia aiškiai parodyti, kaip skirtingi sistemos parametrai veikia bendrą rezultatą. Jei prasiveržimų augimą daugiausia lemia N_u , tai rodo sistemos artėjimą prie prisotinimo ribos. Jei didesnę įtaką turi narys $(N_a - X)$, tai reiškia, kad sistema taikinius aptarnauja, tačiau bendrą rezultatą blogina nepakankama aptikimo arba neutralizavimo sėkmė.

Svarbu ir tai, kad toks modelis leidžia tiesiogiai lyginti binominio ir Monte Karlo metodų rezultatus. Binominiame modelyje formulės (2.33) ir (2.34) sudaro analitinį pagrindą, o Monte Karlo metode analogiška logika realizuojama formule (2.42), kai kiekvienoje iteracijoje apskaičiuojama atskira realizacija B_i [31, 35, 39].

Todėl prasiveržusių taikinių skaičiaus modelis šiame darbe remiasi formule (2.34), kuri apjungia neaptarnautų ir nesėkmingai neutralizuotų taikinių dalis į vieną bendrą sistemos rezultatą. Šis dydis toliau naudojamas pagrindiniams rizikos rodikliams apskaičiuoti.

2.4.4. Rizikos rodikliai

Sudarius prasiveržusių taikinių skaičiaus modelį, iš jo pasiskirstymo apskaičiuojami pagrindiniai rizikos rodikliai, naudojami C-UAS sistemos efektyvumui vertinti. Kadangi pagrindinis atsitiktinis dydis šiame darbe yra prasiveržusių UAV skaičius B , jo statistinės charakteristikos leidžia vertinti tiek tipinį sistemos veikimą, tiek blogesniųjų scenarijų riziką [2, 31, 40].

Pirmasis rodiklis yra prasiveržusių UAV skaičiaus matematinė viltis, parodanti vidutinį prasiveržusių taikinių skaičių per pasirinktą analizės laikotarpį. Šis dydis naudojamas kaip bazinis sistemos veiksmingumo įvertis ir leidžia palyginti skirtingus scenarijus pagal tipinį rezultatą.

Antras svarbus rodiklis yra dispersija ir standartinis nuokrypis. Jie apibūdina prasiveržusių UAV skaičiaus sklaidą apie vidutinę reikšmę. Kuo šie rodikliai didesni, tuo mažiau stabilus sistemos veikimas ir tuo didesnė tikimybė, kad realioje situacijoje rezultatas reikšmingai nukryps nuo tikėtino vidurkio. Binominiame modelyje šie rodikliai apskaičiuojami analitiškai, o Monte Karlo metode – empiriškai pagal formules (2.37) ir (2.38) [31, 35, 39].

Trečiasis rodiklis yra viršijimo tikimybė, nusakanti tikimybę, kad prasiveržusių UAV skaičius viršys pasirinktą kritinį slenkstį. Binominiame modelyje ši tikimybė apskaičiuojama formule (2.35), o Monte Karlo metode – formule (2.39). Praktiniu požiūriu šis rodiklis svarbus vertinant kritinių scenarijų tikimybę [2, 31, 40].

Ketvirtasis rodiklis yra kvantiliai, ypač $Q_{0.95}$ ir $Q_{0.99}$. Jie apibūdina blogesniųjų scenarijų ribas ir leidžia įvertinti, kokio masto prasiveržimų galima tikėtis nepalankiomis, tačiau tikėtinomis sąlygomis [31, 35, 39].

Visi šiame darbe naudojami rizikos rodikliai apskaičiuojami iš to paties prasiveržusių taikinių skaičiaus modelio. Tai leidžia tiesiogiai palyginti binominio modelio ir Monte Karlo metodo

rezultatus pagal vieningą rodiklių sistemą: matematinę viltį, dispersiją, standartinį nuokrypį, viršijimo tikimybę ir kvantilius [31, 35, 39].

Svarbu pažymėti, kad šiame darbe taikomas binominis modelis yra statinis ir nagrinėja sistemą kaip momentinę („snapshot“) būseną. Modelyje nėra tiesiogiai vertinamas UAV atvykimo srautas λ , taikinių pasiskirstymas laike ar eilių formavimasis sistemoje. Dėl to apskaičiuoti rizikos rodikliai atspindi konkretaus scenarijaus įvertį, o ne pilną dinaminę sistemos elgseną laiko eigoje. Dinaminiai scenarijai šiame darbe papildomai nagrinėjami taikant Monte Karlo metodą.

3. Rezultatai ir jų analizė

3.1. Binominio modelio rezultatai

Šiame poskyryje pateikiami binominio modelio skaičiavimo rezultatai baziniam scenarijui ir scenarijų analizei. Vertinami pagrindiniai rizikos rodikliai: prasiveržusių UAV skaičiaus vidurkis, standartinis nuokrypis, viršijimo tikimybė ir kvantiliai. Rezultatai pateikiami lentelėmis ir grafikais, o toliau analizuojama, kaip jie kinta keičiantis parametrams N , C , P_d , P_k ir m .

Pirmiausia pateikiamas bazinis scenarijus, kuriame nagrinėjama pasirinkta atakuojančių UAV srauto ir sistemos pajėgumo kombinacija. Šio scenarijaus tikslas – parodyti, kaip esant fiksuotiems parametrams pasiskirsto prasiveržusių UAV skaičius ir kokie pagrindiniai rizikos rodikliai gaunami pagal binominį modelį. Prieš pateikiant bazinio scenarijaus parametrus, tikslinga apibrėžti scenarijų analizėje taikytas pagrindinių modelio parametų ribas. Šios ribos sudarytos remiantis literatūros apžvalgoje aptartais literatūriniais ir empiriniais duomenimis bei šiame darbe priimtomis modeliavimo prielaidomis.

3 lentelė. Scenarijų analizėje taikytos parametų ribos

Parametras	Žymėjimas	Mažiausia reikšmė	Didžiausia reikšmė	Matavimo vienetas / tipas	Pastaba
Atakuojančių UAV skaičius	N	20	200	vnt.	Apima mažesnio ir didesnio intensyvumo atakos scenarijus
Sistemos pajėgumas	C	20	200	vnt. / kanalai	Apibūdina vienu metu aptarnaujamų arba perimamų taikinių ribą
Aptikimo tikimybė	P_d	0,50	0,95	-	Atitinka konservatyvų–optimistinių aptikimo scenarijų diapazoną
Neutralizavimo tikimybė	P_k	0,50	0,90	-	Atitinka konservatyvų–optimistinių perėmimo efektyvumo diapazoną
Perėmimo bandymų skaičius	m	1	3	kartai	Nagrinėjamas vienas, du ir trys galimi bandymai
Kritinis prasiveržusių UAV slenkstis	t	10	30	vnt.	Naudojamas viršijimo tikimybei $P(B \geq t)$ vertinti

Svarbu pažymėti, kad šiame darbe naudojamos reikšmės $P_d = 0,95$ ir $P_k = 0,90$ nėra konkrečios sistemos empiriškai nustatyti parametrai, o pasirinktos kaip scenariinės prielaidos. Literatūroje nurodoma, kad šie parametrai gali kisti priklausomai nuo technologijų, aplinkos sąlygų ir sistemos apkrovos, todėl dažniausiai vertinami intervalais, o ne kaip fiksuotos reikšmės [2, 4, 6].

Dėl šios priežasties šiame darbe pagrindinis dėmesys skiriamas ne vien konkrečioms reikšmėms, o rezultatų kitimo tendencijoms keičiantis N , C , P_d , P_k ir m , atliekant jautrumo analizę.

Iš 3 lentelėje pateiktų parametų ribų baziniam scenarijui buvo parinktas konkretus parametų derinys, naudojamas tolesniems binominio modelio skaičiavimams. Toks pateikimas leidžia atskirti bendrą nagrinėjamų scenarijų parametrinę sritį nuo vieno reprezentatyvaus bazinio scenarijaus, kuris

naudojamas detalesnei rezultatų analizei ir vėlesniam palyginimui su Monte Karlo simuliacijos rezultatais. Bazinio scenarijaus įėjimo parametrai pateikiami 4 lentelėje.

4 lentelė. Bazinio scenarijaus binominio modelio įėjimo parametrai

Rodiklis	Reikšmė
Atakuojančių UAV skaičius N	200
Sistemos pajėgumas C	200
Aptikimo tikimybė P_d	0,95
Neutralizavimo tikimybė P_k	0,90
Perėmimo bandymų skaičius m	1
Kritinis prasiveržusių UAV slenkstis t	10

Lentelėje 5 pateikti modeliavimo rezultatai binominiam modeliui. Modeliavimo rezultatai rodo, kad esant nagrinėjamiems parametrų, prasiveržusių UAV skaičiaus kvantilis $P(N_{pass} \geq t)$ išlieka reikšmingas, konverguoja į reikšmę apie 10. Šis t visada > 0 , nes net ir esant dideliame perėmėjų draugiškumui m , UAV prasiveržimo tikimybė uodega išlieka nenulinė dėl didelio N . Sistemos efektyvumas turėtų būti vertinamas naudojant uodegos rizikos rodiklį, o ne vien vidutinę vertę. Padidinus perėmėjų skaičių vienam taikiniui, žymiai sumažėja numatomas UAV prasiveržimų skaičius. Tačiau dėl didelio atakuojančių UAV skaičiaus binominis prasiveržimų pasiskirstymas išlaiko nežymią viršutinę ribą. Dėl to 95% kvantilė t , kuriai esant $P(N_{pass} \geq t)$ išlieka virš fiksuotos ribos, konverguoja į baigtinę vertę (mūsų atveju į 10), o ne į nulį.

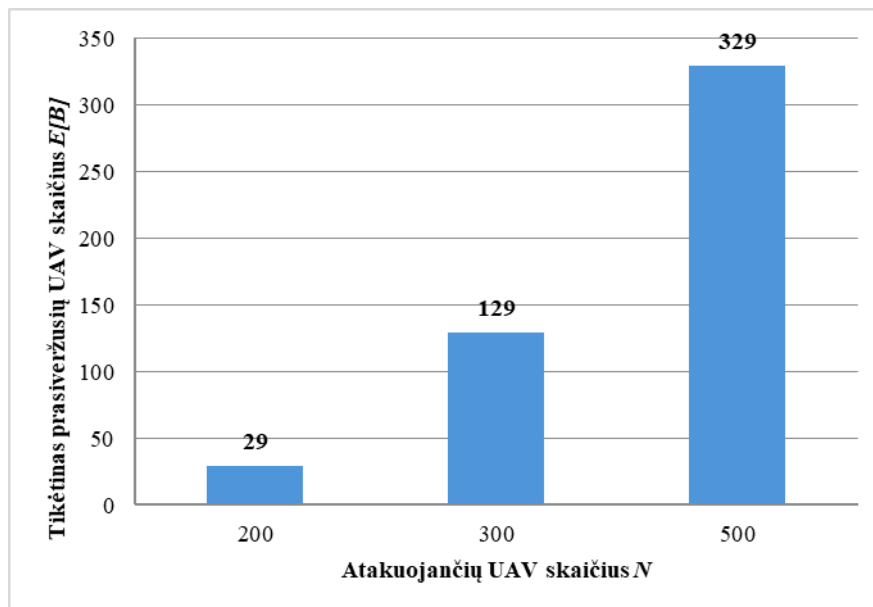
5 lentelė. Binominio modelio rezultatų suvestinė baziniam scenarijui

Parametrai	Vertės				
	1	2	3	4	5
m	1	2	3	4	5
P_{succ}	0.855	0.9405	0.94905	0.949905	0.9499905
P_{ef}	0.9	0.99	0.999	0.9999	0.99999
μ	171	188.1	189.81	189.981	189.9981
N_{pass}	29	11.9	10.19	10.019	10.0019
σ	4.979457802	3.345437191	3.109794125	3.084979448	3.082484385
$P(0)$	1	1	1	1	1
$P(N_{pass} \geq 10)$	0.999995408	0.756730835	0.56943422	0.5477267	0.54553405
$P(N_{pass} \geq 20)$	0.976362153	0.016548012	0.00329061	0.0027223	0.0026703
$P(N_{pass} \geq 30)$	0.450677972	3.16111E-06	1.3024E-07	9.071E-08	8.7449E-08
$P(N_{pass} \geq 40)$	0.020706494	1.41798E-11	1.1615E-13	6.786E-14	6.4268E-14
$P(N_{pass} \geq 50)$	6.46365E-05	2.98834E-18	4.8055E-21	2.352E-21	2.1884E-21
$P(N_{pass} \geq 100)$	2.34304E-32	5.9226E-67	2.654E-73	5.341E-74	4.5423E-74

Iš bazinio scenarijaus rezultatų matyti, kad net ir esant pakankamai aukštomis aptikimo ir neutralizavimo tikimybėms, bendras prasiveržusių UAV skaičius išlieka nenulinis. Tai paaiškinama tuo, kad bendrą rezultatą lemia ne vien pavienio taikinio perėmimo sėkmė, bet ir bendras atakuojančių UAV skaičius bei sistemos pajėgumo apribojimas. Jei atakos mastas yra didelis, net ir palyginti nedidelė vieno taikinio prasiveržimo tikimybė gali lemti apčiuopiamą bendrą prasiveržusių taikinių

skaičių. Dėl šios priežasties sistemos efektyvumas šiame darbe vertinamas ne vien pagal vidutinę reikšmę, bet ir pagal uodegos rizikos rodiklius.

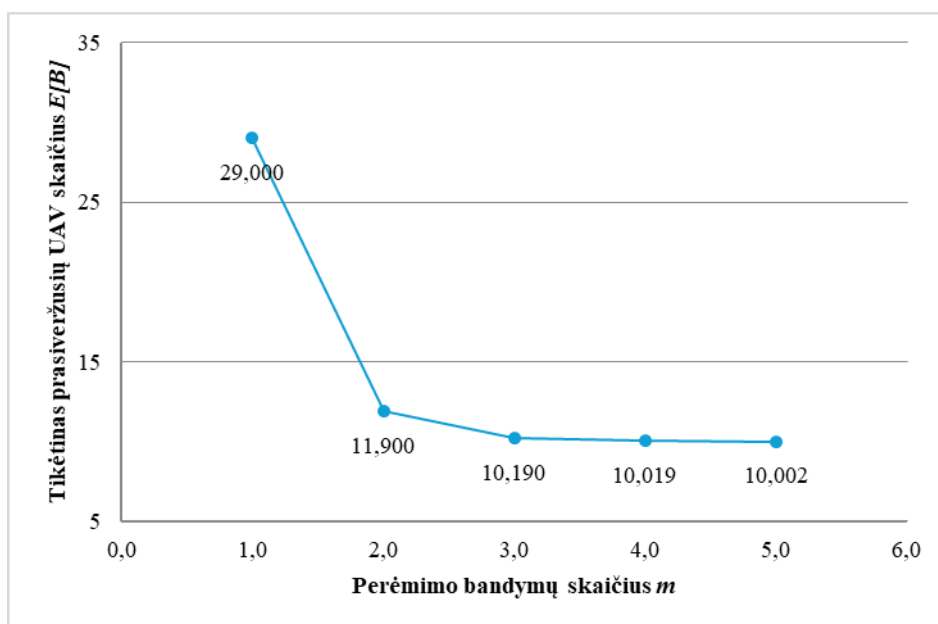
Toliau pateikiama parametrų jautrumo analizė, leidžianti įvertinti, kaip skirtingi modelio parametrai veikia prasiveržusių UAV skaičių ir susijusius rizikos rodiklius. Pirmiausia analizuojama atakos masto įtaka (1 pav.).



1 pav. Prasiveržusių UAV skaičiaus priklausomybė nuo atakuojančių UAV skaičiaus N

Iš grafiko matyti, kad didėjant N prasiveržusių UAV skaičius sparčiai didėja. Tai rodo, kad sistemos efektyvumas stipriai priklauso nuo atakos masto.

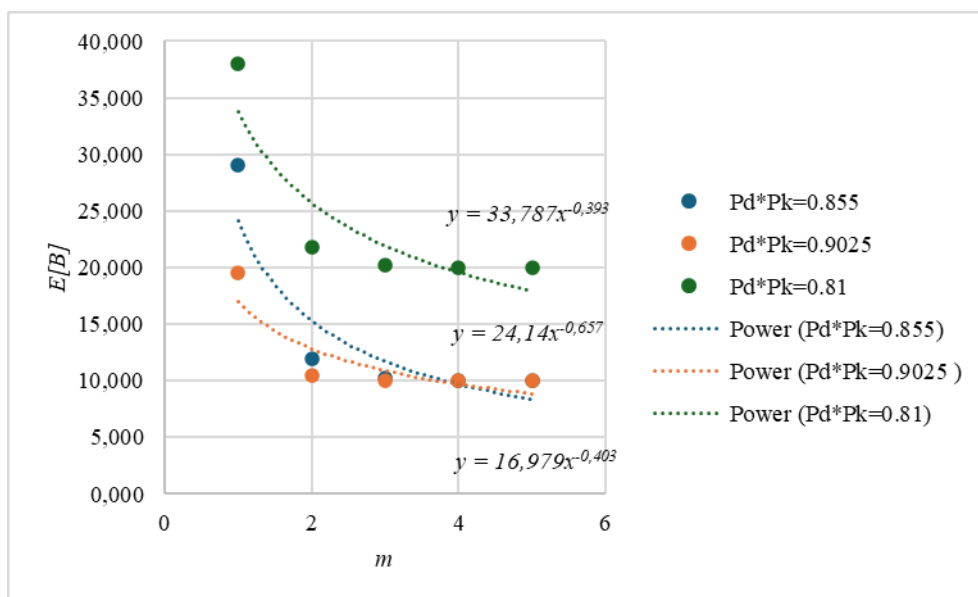
Toliau nagrinėjama perėmimo bandymų skaičiaus m įtaka (2 pav.).



2 pav. Prasiveržusių UAV skaičiaus priklausomybė nuo perėmimo bandymų skaičiaus m

Didinant m prasiveržusių UAV skaičius mažėja, tačiau efektas nėra tiesinis – didžiausias sumažėjimas stebimas esant mažoms m reikšmėms, o vėliau kreivė plokštėja. Tai rodo ribotą papildomų bandymų naudą.

Toliau vertinama bendro perėmimo efektyvumo įtaka (3 pav.).



3 pav. Prasiveržusių UAV skaičiaus priklausomybė nuo perėmėjų skaičiaus m esant skirtingoms $P_d \times P_k$ reikšmėms

Didesnės $P_d \times P_k$ reikšmės lemia mažesnę prasiveržusių UAV skaičių, tačiau net ir esant aukštam efektyvumui papildomų perėmėjų įtaka mažėja. 3 pav. pateikta prasiveržusių pro gynybą UAV skaičiaus priklausomybė nuo perėmėjų skaičiaus vienam taikiniui m . Prasiveržusių UAV skaičius N_{pass} , kaip matome, kinta pagal laipsnio rodiklio dėsningumą, ir gali būti aprašytas tokia lygtimi:

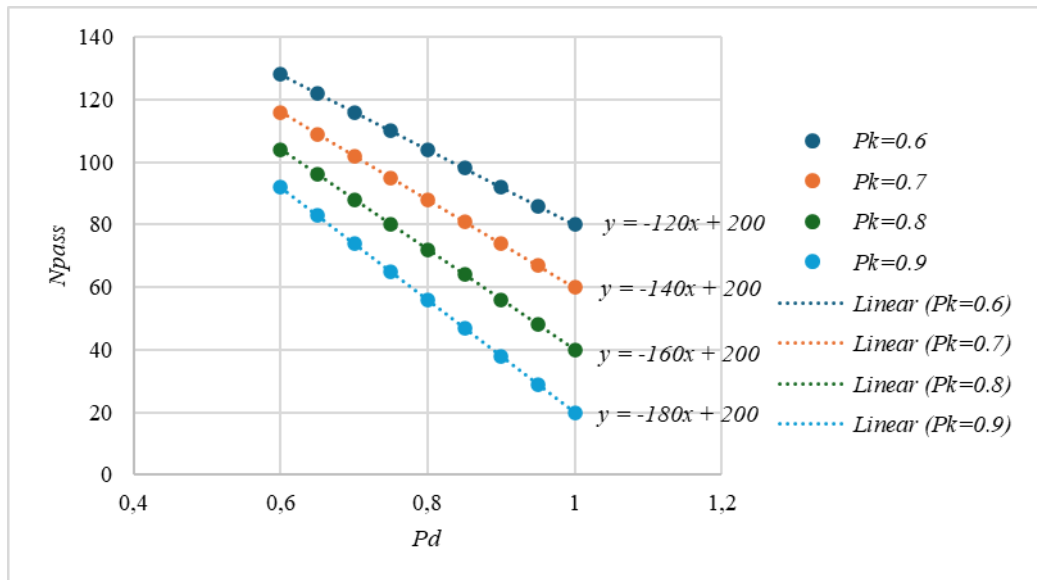
$$N_{pass} = 24.14m^{-0.657}. \quad (3.1)$$

Didinant m nuo 1 iki 3, stebimas staigus prasiveržusių UAV skaičiaus sumažėjimas, kas rodo didelį daugkartinio perėmimo efektyvumą pradinėje srityje. Tačiau toliau didinant m , kreivė pastebimai išsilygina, o papildomas sistemos efektyvumo prieaugis tampa nežymus.

Šis efektas paaiškinamas binominio modelio prigimtimi: net ir labai sumažinus individualią UAV prasiveržimo tikimybę, didelis atakuojančių UAV skaičius N lemia tai, kad kolektyvinė prasiveržimo rizika išlieka nenulinė. Dėl šios priežasties prasiveržimų skaičiaus pasiskirstymas išlaiko viršutinę uodegą, o kvantilis t , kuriam $P(N_{pass} \geq t)$ išlieka virš pasirinktos ribos, konverguoja į baigtinę reikšmę, o ne į nulį.

Praktiniu požiūriu tai reiškia, kad perėmėjų skaičiaus didinimas virš tam tikros ribos nebesuteikia proporcingos naudos, todėl sistemos projektavime tikslinga ieškoti kompromiso tarp perėmimo gylio ir ekonominių bei technologinių sąnaudų.

Toliau analizuojama aptikimo tikimybės P_d įtaka (4 pav.).

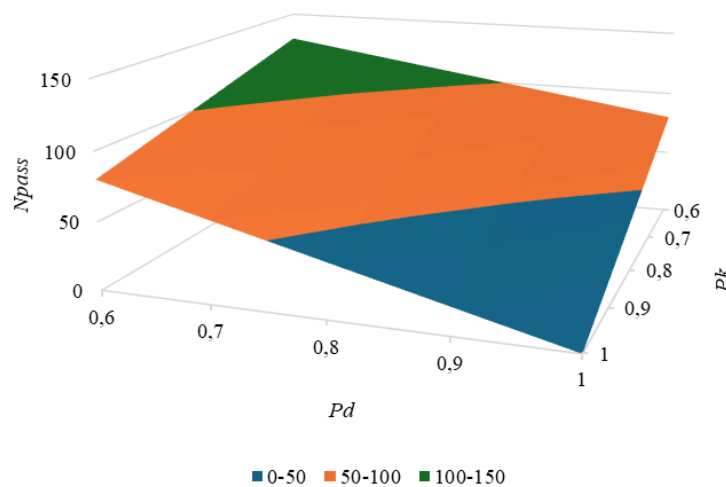


4 pav. Prasiveržusių UAV skaičiaus priklausomybė nuo aptikimo tikimybės P_d esant skirtingoms P_k reikšmėms

4 pav. pateikti rezultatai parodo aptikimo tikimybės P_d įtaką prasiveržusių UAV skaičiui esant skirtingoms sunaikinimo tikimybės P_k reikšmėms. Matyti, kad mažos P_d reikšmės turi disproporciškai didelį neigiamą poveikį sistemos efektyvumui, lyginant su analogišku P_k sumažėjimu.

Tai paaiškinama tuo, kad neaptiktas taikinys apskritai neperduodamas perėmimo grandinei, todėl jo prasiveržimas tampa deterministinis. Tuo tarpu net ir ne visiškai patikimas sunaikinimas gali būti kompensuojamas pakartotiniais perėmimo bandymais. Dėl šios priežasties aptikimo grandis yra kritinis visos „dronų sienos“ elementas, o jos patikimumas daro didesnę įtaką bendrai sistemos veiklai nei pavienio perėmimo efektyvumas.

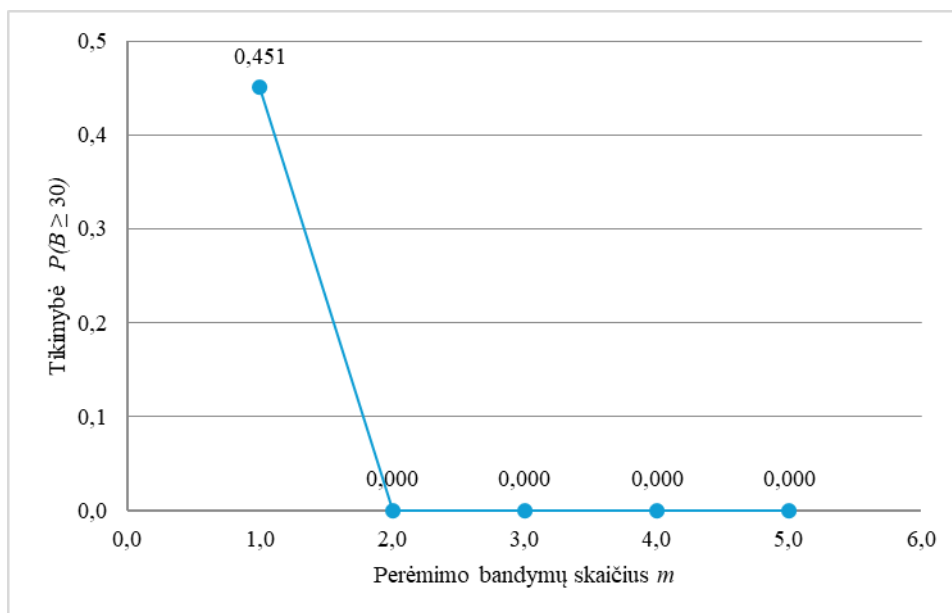
Remiantis rezultatais, pavaizduotais 4 pav., galima įvertinti aptikimo ir sunaikinimo (pažeidimo) tikimybių tarpusavio efektą. 5 pav. iliustruoja aptikimo P_d ir sunaikinimo P_k tikimybių tarpusavio sąveiką.



5 pav. Kombinuotas P_d ir P_k poveikio prasiveržusių UAV skaičiui atvaizdavimas

Grafikas rodo, kad šie parametrai nėra tarpusavyje visiškai pakeičiami: aukštas sunaikinimo efektyvumas negali kompensuoti prasto aptikimo, tuo tarpu aukštas aptikimo patikimumas leidžia pasiekti priimtina sistemą efektyvumą net esant vidutinėms P_k reikšmėms. Tai patvirtina išvadą, kad daugiasluoksnės C-UAS sistemos projektavime pirmenybė turėtų būti teikiama jutiklių tinklo patikimumui ir duomenų sintezės kokybei.

Papildomai vertinama blogesniųjų scenarijų rizika (6 pav.).



6 pav. Viršijimo tikimybės $P(B \geq t)$ priklausomybė nuo perėmimo bandymų skaičiaus m

Matyti, kad didinant m sparčiai mažėja tikimybė viršyti kritinį prasiveržimų slenkstį. Tai rodo, kad papildomi bandymai ypač efektyvūs mažinant kraštinių scenarijų riziką.

Apibendrinant galima teigti, kad binominis modelis leidžia identifikuoti pagrindinius sistemos veikimo dėsningumus: atakos mastas N stipriai veikia rezultatą, perėmimo bandymų skaičiaus didinimas turi ribotą efektą, o aptikimo tikimybė P_d yra vienas svarbiausių sistemos efektyvumą lemiančių veiksnių.

Svarbu pažymėti, kad binominis modelis yra tinkamas kaip bazinis, pirmo lygmens vertinimo metodas, kai siekiama įvertinti bendrą prasiveržimo tikimybę esant fiksuotam UAV skaičiui ir vidutinėms aptikimo bei neutralizavimo tikimybėms (pvz., $P_d = 0,95$, $P_k = 0,90$). Šis modelis yra skaičiavimo požiūriu paprastas ir intuityvus, tačiau neatsižvelgia į sistemos užimtumą laike, t. y. į tai, kad jutikliai ir perėmimo kanalai gali būti laikinai neprieinami. Dėl to intensyvių ar masinių UAV atakų atvejais (pvz., $N \geq C$) jis gali pervertinti sistemos efektyvumą.

Nustatyta, kad vien tik vidutinės reikšmės (pvz., $E[B] \approx 29$ baziniame scenarijuje) nėra pakankamos realioms gynybos užduotims vertinti. Praktikoje svarbiau įvertinti viršijimo tikimybes, pavyzdžiui, $P(B \geq 30) \approx 0,45$ ar $P(B \geq 40) \approx 0,02$, nes būtent tokie scenarijai lemia sistemos veikimo nesėkmę.

Binominis modelis gali būti efektyviai naudojamas kaip greitas planavimo įrankis, leidžiantis preliminariai įvertinti reikiamą perėmėjų ar jutiklių skaičių esant žinomoms P_d ir P_k reikšmėms.

Tačiau jis neturėtų būti taikomas izoliuotai, ypač esant dideliame apkrovimui, nes neįvertina sistemos dinamikos ir gali sudaryti pernelyg optimistinę sistemos efektyvumo įvertį.

3.2. Monte Karlo simuliacijos rezultatai

Šiame poskyryje pateikiami Monte Karlo simuliacijos rezultatai tiems patiems scenarijams, kurie buvo nagrinėti binominio modelio atveju. Gauti rodikliai lyginami pagal tas pačias metrikas: prasiveržusių UAV skaičiaus vidurkį, standartinį nuokrypį, viršijimo tikimybę ir kvantilius. Toliau pateikiama, kaip šie rodikliai kinta keičiantis parametrams ir kiek Monte Karlo rezultatai sutampa su analitinio modelio įverčiais.

Monte Karlo skaičiavimams šiame darbe naudojami tie patys bazinio scenarijaus parametrai kaip ir 4.1 poskyryje: atakuojančių UAV skaičius N , sistemos pajėgumas C , aptikimo tikimybė P_d , neutralizavimo tikimybė P_k , perėmimo bandymų skaičius m ir kritinis prasiveržusių UAV slenkstis t . Toks parametų suvienodinimas reikalingas tam, kad skirtumai tarp binominio modelio ir Monte Karlo simuliacijos būtų susiję ne su nevienodomis pradinėmis sąlygomis, o su pačių metodų pobūdžiu. Kadangi Monte Karlo metodas šiame darbe taikomas analogiškiems scenarijams kaip ir binominis modelis, gauti rezultatai gali būti tiesiogiai lyginami pagal tuos pačius rodiklius.

Pirmiausia Monte Karlo metodu buvo apskaičiuotas bazinio scenarijaus prasiveržusių UAV skaičiaus empirinis pasiskirstymas ir pagrindiniai statistiniai rodikliai. Kiekviena simuliacijos iteracija atitinka vieną galimą nagrinėjamo scenarijaus realizaciją, o galutinis rezultatas gaunamas apdorojus didelę realizacijų imtį R . Tokiu būdu šiame etape vertinama ne viena deterministinė reikšmė, bet visas galimų baigčių spektras, iš kurio apskaičiuojamas empirinis vidurkis, dispersija, viršijimo tikimybės ir kvantiliai. Toks vertinimo principas yra svarbus todėl, kad C-UAS sistemos efektyvumas turi būti vertinamas ne vien pagal tipinį rezultatą, bet ir pagal blogesnius atvejus, kai dėl sistemos apkrovos ir atsitiktinių veiksnių prasiveržusių taikinių skaičius tampa didesnis už priimtina ribą.

6 lentelė. Monte Karlo simuliacijos įėjimo parametrai baziniam scenarijui

Rodiklis	Reikšmė
Atakuojančių UAV skaičius N	200
Sistemos pajėgumas C	200
Aptikimo tikimybė P_d	0,95000
Neutralizavimo tikimybė P_k	0,90000
Perėmimo bandymų skaičius m	1
Kritinis prasiveržusių UAV slenkstis t	30
Iteracijų skaičius R	20000

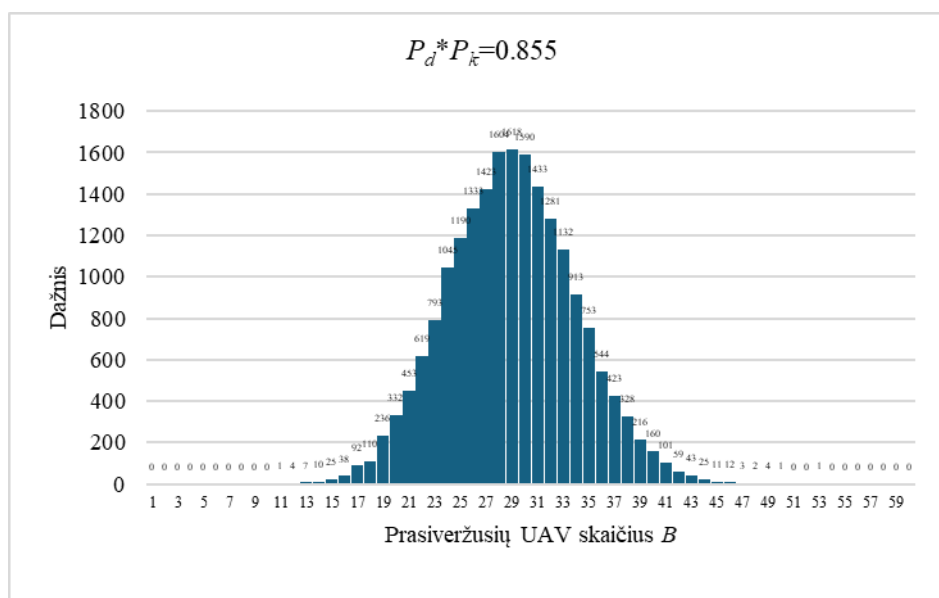
Bazinio scenarijaus atveju atlikta $R = 20\,000$ realizacijų. Kiekviena realizacija atitinka vieną galimą sistemos veikimo baigtį, kurioje pagal nustatytas P_d ir P_k reikšmes įvertinama, kiek UAV yra sėkmingai perimama ir kiek jų prasiveržia. Gauti rezultatai pateikiami 7 lentelėje.

7 lentelė. Monte Karlo simuliacijos rezultatų suvestinė baziniam scenarijui

Rodiklis	Reikšmė
Empirinis vidurkis \bar{B}	29,004
Empirinė mediana	29,000
Empirinis standartinis nuokrypis σ	4,991
Mažiausia realizacijos reikšmė	10
Didžiausia realizacijos reikšmė	51
$P(B \geq 10)$	1,00000
$P(B \geq 20)$	0,97635
$P(B \geq 30)$	0,45340
$P(B \geq 40)$	0,02105
$P(B \geq 50)$	0,00010
$Q0,95$	37,000
$Q0,99$	41,000
Bazinis scenarijus: $N = 200$, $C = 200$, $P_d = 0,95$, $P_k = 0,90$, $m = 1$, $R = 20\ 000$	

Iš 7 lentelės matyti, kad empiriškai gautas prasiveržusių UAV skaičiaus vidurkis yra $\bar{B} = 29,004$, o standartinis nuokrypis $\sigma = 4,991$. Tai rodo, kad tipinis Monte Karlo rezultatas yra artimas binominio modelio įverčiui, tačiau simuliacija papildomai leidžia matyti realizacijų sklaidą ir kraštines reikšmes. Baziniame scenarijuje mažiausia gauta reikšmė yra 10, didžiausia – 51, o 95 % ir 99 % kvantiliai atitinkamai lygūs 37 ir 41. Kvantiliai leidžia įvertinti blogiausių scenarijų ribas, todėl yra svarbūs vertinant sistemos patikimumą ir prasiveržimų riziką.

Toliau pateikiamas empirinio prasiveržusių UAV skaičiaus pasiskirstymo grafikas (7 pav.).

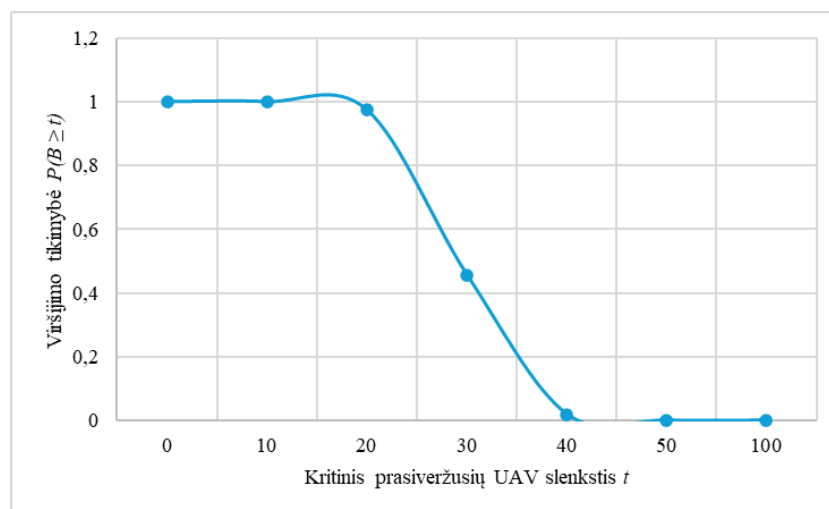


7 pav. Monte Karlo simuliacijos būdu gauto prasiveržusių UAV skaičiaus empirinis pasiskirstymas baziniam scenarijui

Iš grafiko matyti, kad dauguma realizacijų koncentruojasi apie vidutinę reikšmę, tačiau pasiskirstymas turi ir viršutinę uodegą. Tai reiškia, kad net esant toms pačioms įėjimo sąlygoms

galimi nepalankesni scenarijai, kai prasiveržusių UAV skaičius viršija vidutinę reikšmę. Todėl Monte Karlo metodas leidžia vertinti ne tik tipinį rezultatą, bet ir blogesniųjų scenarijų riziką.

Svarbiausias Monte Karlo analizės rezultatas yra viršijimo tikimybės (8 pav.).

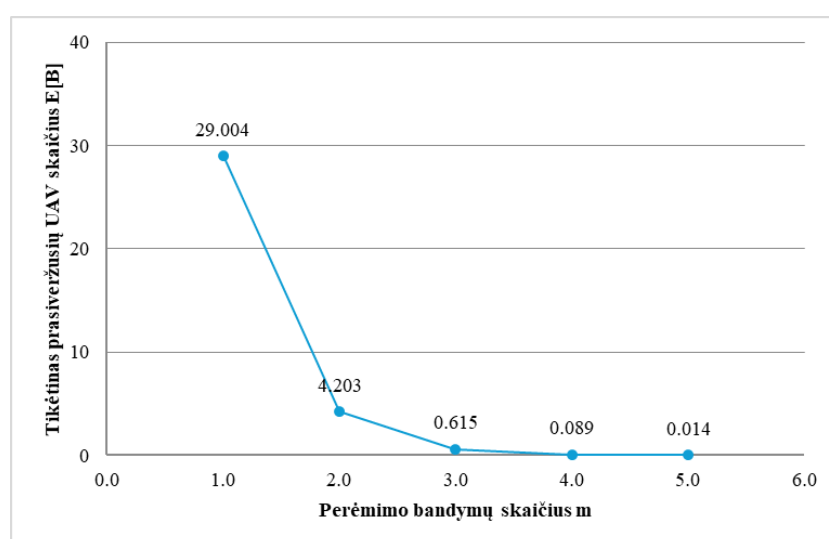


8 pav. Monte Karlo būdu gauta viršijimo tikimybės $P(B \geq t)$ priklausomybė nuo kritinio prasiveržusių UAV slenkščio t

Iš grafiko matyti, kad esant mažoms t reikšmėms viršijimo tikimybė yra artima 1, tačiau didėjant slenkščiu ji sparčiai mažėja. Pavyzdžiui, kai $t = 30$, tikimybė yra apie 0,45, o ties $t = 40$ ji jau tampa labai maža. Tai rodo, kad nors vidutinis prasiveržusių UAV skaičius yra apie 29, egzistuoja reikšminga tikimybė viršyti šią ribą, tačiau labai dideli prasiveržimai yra mažai tikėtini.

Šis rezultatas yra ypač svarbus praktiniu požiūriu, nes leidžia vertinti sistemos patikimumą pagal tikimybę viršyti kritinį slenkstį, o ne tik pagal vidutinę reikšmę.

Papildomai analizuota, kaip kinta prasiveržusių UAV skaičius didėjant perėmimo bandymų skaičiui m (9 pav.).



9 pav. Monte Karlo būdu gauto prasiveržusių UAV skaičius priklausomybė nuo perėmimo bandymų skaičiaus m

Iš grafiko matyti, kad didinant m prasiveržusių UAV skaičius mažėja, tačiau šis mažėjimas nėra tiesinis. Didžiausias efektas pasiekiamas pereinant nuo $m = 1$ prie $m = 2$, o toliau kreivė plokštėja. Tai rodo, kad papildomų bandymų nauda mažėja, todėl egzistuoja racionali perėmimo gylio riba.

Apibendrinant galima teigti, kad Monte Karlo simuliacija leidžia empiriškai įvertinti ne tik prasiveržusių UAV skaičiaus vidurkį, bet ir rezultatų sklaidą, viršijimo tikimybes bei kraštinių scenarijų riziką. Gauti rezultatai patvirtina binominio modelio tendencijas, tačiau papildomai parodo visą galimų realizacijų spektrą, todėl Monte Karlo metodas šiame darbe naudojamas kaip analitinio modelio patikra ir išplėtimas.

3.3. Binominio modelio ir Monte Karlo rezultatų palyginimas

Šiame poskyryje pateikiamas binominio modelio ir Monte Karlo simuliacijos rezultatų palyginimas, naudojant tuos pačius bazinio scenarijaus įėjimo parametrus. Toks palyginimas šiame darbe yra svarbus todėl, kad leidžia įvertinti, kiek analitiniu būdu gauti binominio modelio rezultatai sutampa su empiriniais Monte Karlo simuliacijos įverčiais ir kiek pagrįstai binominis modelis gali būti taikomas kaip bazinis C-UAS sistemos efektyvumo vertinimo metodas.

Kadangi abiem metodams taikomi tie patys bazinio scenarijaus parametrai, jų rezultatai gali būti tiesiogiai lyginami pagal prasiveržusių UAV skaičiaus vidurkį, standartinį nuokrypį ir viršijimo tikimybes. Toks suvienodinimas leidžia užtikrinti, kad skirtumai tarp metodų būtų susiję ne su nevienodomis pradinėmis sąlygomis, o su pačių metodų pobūdžiu ir rezultatų gavimo būdu.

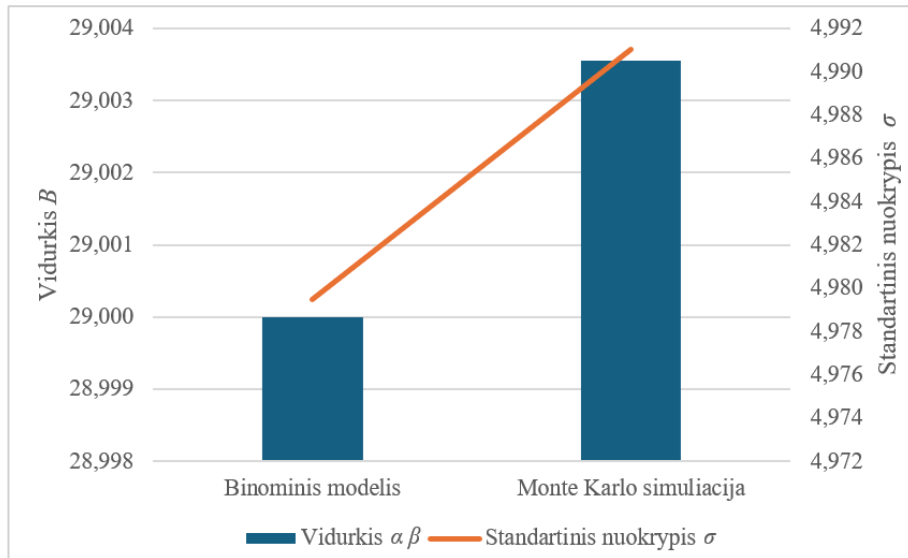
8 lentelė. Binominio modelio ir Monte Karlo rezultatų palyginimas baziniam scenarijui

Rodiklis	Binominis modelis	Monte Karlo simuliacija	Absoliutus skirtumas	Santykinis skirtumas, %
Vidurkis \bar{B}	29	29,004	0,004	0,012
Standartinis nuokrypis σ	4,979	4,991	0,012	0,233
$P(B \geq 10)$	1,00000	1,00000	0,00000	0,000
$P(B \geq 20)$	0,97636	0,97635	0,00001	0,001
$P(B \geq 30)$	0,45068	0,45340	0,00272	0,604
$P(B \geq 40)$	0,02071	0,02105	0,00034	1,659
$P(B \geq 50)$	0,00006	0,00010	0,00004	54,711
Bazinis scenarijus: $N = 200$, $C = 200$, $P_d = 0,95$, $P_k = 0,90$, $m = 1$				

Pagal 8 lentelėje pateiktus duomenis matyti, kad abiejų metodų rezultatai yra labai artimi. Binominio modelio apskaičiuotas prasiveržusių UAV skaičiaus vidurkis yra 29, o Monte Karlo simuliacijos būdu gautas vidurkis – 29,004. Absoliutus skirtumas tarp šių reikšmių sudaro tik 0,004, o santykinis skirtumas yra 0,012 %. Tai rodo, kad nagrinėjamo bazinio scenarijaus atveju abu metodai pateikia praktiškai sutampantį tipinio sistemos veikimo įvertį.

Panaši tendencija matoma ir lyginant standartinį nuokrypį. Binominio modelio atveju jis lygus 4,979, o Monte Karlo simuliacijos atveju – 4,991. Absoliutus skirtumas sudaro 0,012, o santykinis skirtumas – 0,233 %. Tai rodo, kad ne tik vidutinė reikšmė, bet ir rezultatų sklaida abiem metodais įvertinama labai panašiai. Inžineriniu požiūriu tai svarbu todėl, kad panašus standartinis nuokrypis rodo panašią blogesniųjų scenarijų pasiskirstymo struktūrą.

Toliau tikslinga vizualiai palyginti pagrindinius statistinius rodiklius.

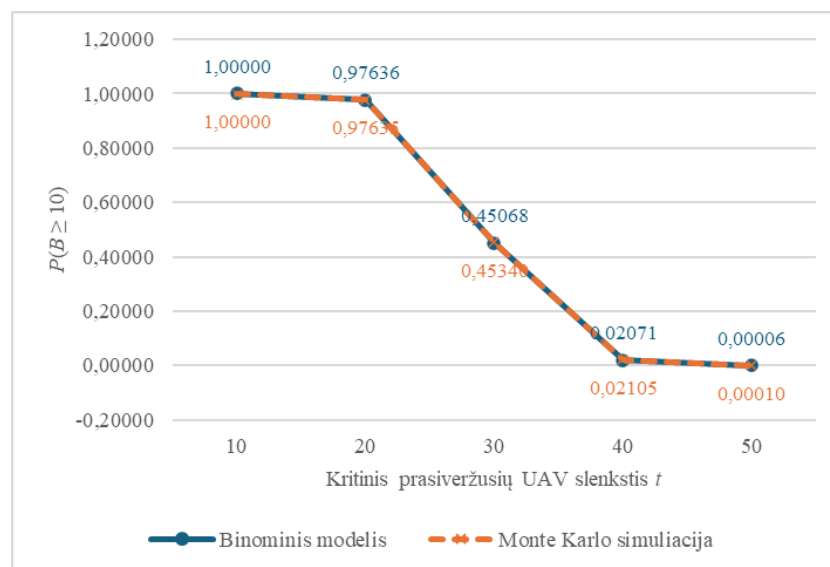


10 pav. Pagrindinių statistinių rodiklių palyginimas

Iš 10 paveiksle pateikto grafiko aiškiai matyti, kad binominio modelio ir Monte Karlo simuliacijos gauti vidurkio bei standartinio nuokrypio rodikliai beveik sutampa. Grafikas patvirtina, kad bazinio scenarijaus atveju Monte Karlo simuliacija iš esmės atkartoja tą patį rezultatą, kuris gaunamas analitiniu binominio modelio būdu. Tai reiškia, kad, esant pasirinktomis prielaidoms ir fiksuotam parametų rinkiniui, binominis modelis pakankamai tiksliai aprašo nagrinėjamą sistemą.

Svarbus palyginimo aspektas yra ir viršijimo tikimybės. 7 lentelėje matyti, kad tikimybė viršyti 10 ir 20 prasiveržusių UAV ribas abiem metodais praktiškai sutampa. Pavyzdžiui, kai $t = 20$, binominio modelio reikšmė yra 0,97636, o Monte Karlo simuliacijos – 0,97635. Kai $t = 30$, atitinkamos reikšmės yra 0,45068 ir 0,45340. Net ir didesnių slenksčių atveju skirtumai išlieka nedideli absoliučia prasme, nors santykinis skirtumas gali padidėti tada, kai pačios tikimybės tampa labai mažos.

Šią tendenciją aiškiai parodo ir viršijimo tikimybių grafikas.



11 pav. Viršijimo tikimybių palyginimas

Iš 11 paveiksle pateikto grafiko matyti, kad binominio modelio ir Monte Karlo simuliacijos kreivės beveik persidengia visame nagrinėjamame slenksčių intervale. Tai rodo, kad abiejų metodų išvados dėl blogesniųjų scenarijų rizikos yra nuoseklios. Didžiausias matomas skirtumas išryškėja ties didesniais slenksčiais, kai pačios viršijimo tikimybės tampa labai mažos. Tačiau ir šiuo atveju absoliučios skirtumo reikšmės išlieka nedidelės, todėl praktinei interpretacijai šie neatitikimai nėra esminiai.

Svarbu pažymėti, kad didžiausias santykinis skirtumas 7 lentelėje gaunamas ties $P(B \geq 50)$, kur binominio modelio reikšmė yra 0,00006, o Monte Karlo simuliacijos – 0,00010. Nors santykinis skirtumas čia atrodo didelis, jis susidaro todėl, kad lyginamos labai mažos absoliučios reikšmės. Praktiniu požiūriu tai reiškia, kad abu metodai sutaria, jog tokio lygio prasiveržimų scenarijus yra labai mažai tikėtinas.

Bazinio scenarijaus atveju binominio modelio ir Monte Karlo simuliacijos rezultatai yra labai artimi. Abu metodai pateikia beveik sutampančius prasiveržusių UAV skaičiaus vidurkio, sklaidos ir viršijimo tikimybių įverčius. Tai leidžia daryti išvadą, kad esant fiksuotoms prielaidoms ir tolygiam parametrų rinkiniui binominis modelis gali būti laikomas tinkamu baziniu analitiniu metodu C-UAS sistemos efektyvumui vertinti, o Monte Karlo simuliacija šiuo atveju veikia kaip jo empirinė patikra. Toks rezultatas svarbus todėl, kad parodo, jog paprastesnis analitinis modelis nagrinėjamosiomis sąlygomis suteikia pakankamai tikslų ir inžineriškai interpretuojamą rezultatą.

Kadangi šiame darbe nėra galimybės atlikti tiesioginės validacijos su realiais eksperimentiniais duomenimis, papildomai taikomas vadinamasis eilės dydžio („order-of-magnitude“) palyginimas. Šio metodo esmė – lyginti rezultatus ne pagal tikslią jų skaitinę reikšmę, o pagal tai, kuriai dešimtainės sistemos eilei (pvz., 10^0 , 10^1 , 10^2) jie priklauso.

Analizuojant skirtingus literatūros šaltinius matyti, kad mažų mastų sistemose, kai $N \approx 6$, prasiveržusių taikinių skaičius yra apie 0,2–2,4, t. y. vienetų eilės dydžio (10^0) [23, 43]. Tuo tarpu didelio masto spiečiaus scenarijuje, kai $N = 300$, prasiveržusių taikinių skaičius siekia apie 284–294, t. y. šimtų eilės dydžio (10^2) [41].

Šiame darbe nagrinėjamu baziniu scenarijumi, kai $N = 200$, gautas rezultatas $E[B] \approx 29$ atitinka dešimčių eilės dydį (10^1) ir natūraliai patenka tarp mažo ir didelio masto scenarijų. Toks rezultatas yra nuoseklus pagal mastą ir atitinka literatūroje stebimą tendenciją, kad didėjant atakuojančių taikinių skaičiui ir sistemos apkrovai, prasiveržimų skaičius didėja ne tik absoliučiai, bet ir pagal eilės dydį [23]. Todėl galima teigti, kad modelio rezultatai yra pagrįsti ir suderinami su literatūroje pateikiamais empiriniais ir simuliaciniais duomenimis.

3.4. Dinaminės Monte Karlo simuliacijos modelis su apkrovos priklausomybe

Šiame poskyryje pateikiamas išplėstas Monte Karlo simuliacijos modelis, kuriame įvedama sistemos apkrovos priklausomybė ir laiko dinamika. Skirtingai nei ankstesniuose skyriuose nagrinėtas binominis modelis, šiame modelyje UAV atvykimas traktuojamas kaip atsitiktinis srautas, o sistemos efektyvumas priklauso nuo jos užimtumo konkrečiu laiko momentu.

UAV atvykimas modeliuojamas naudojant Puasono procesą su intensyvumu λ (UAV per minutę), o laiko tarpai tarp atvykimų generuojami pagal eksponentinį skirstinį:

$$\Delta t \sim \text{Exp}(\lambda). \quad (3.2)$$

Kiekvienu laiko momentu sistemos būseną apibrėžiama aktyvių UAV skaičiumi $N_{active}(t)$, kuris parodo, kiek taikinių tuo metu yra sistemoje. Sistemos apkrova apibrėžiama kaip aktyvių UAV ir sistemos pajėgumo santykis:

$$\rho = \frac{N_{active}}{c}. \quad (3.3)$$

Kai $\rho \geq 1$, sistema laikoma perkrauta, ir naujai atvykstantys UAV nėra aptarnaujami bei laikomi prasiveržusiais.

Skirtingai nuo binominio modelio, šiame modelyje aptikimo ir neutralizavimo tikimybės nėra konstantos – jos priklauso nuo apkrovos. Ši priklausomybė modeliuojama eksponentine forma:

$$P_d = P_{d0} \cdot \exp\left(-\alpha \cdot \frac{N_{active}}{c}\right); \quad (3.4)$$

$$P_k = P_{k0} \cdot \exp\left(-\beta \cdot \frac{N_{active}}{c}\right). \quad (3.5)$$

kur P_{d0} ir P_{k0} yra bazinės tikimybės, o α ir β apibrėžia, kaip greitai blogėja aptikimo ir neutralizavimo efektyvumas didėjant apkrovai. Didėjant aktyvių UAV skaičiui, abi tikimybės mažėja, kas atspindi realių sistemų elgseną esant perkrovai.

Kiekvienam UAV simuliacijoje taikoma sprendimų seka: jei sistema yra perkrauta, UAV laikomas prasiveržusiu; jei UAV neaptiktas arba aptiktas, bet nesėkmingai neutralizuotas, jis taip pat laikomas prasiveržusiu; tik sėkmingai aptiktas ir neutralizuotas UAV laikomas perimtu. Tokiu būdu kiekvienam UAV priskiriamas rezultatas X_i , o bendras prasiveržusių UAV skaičius apskaičiuojamas kaip:

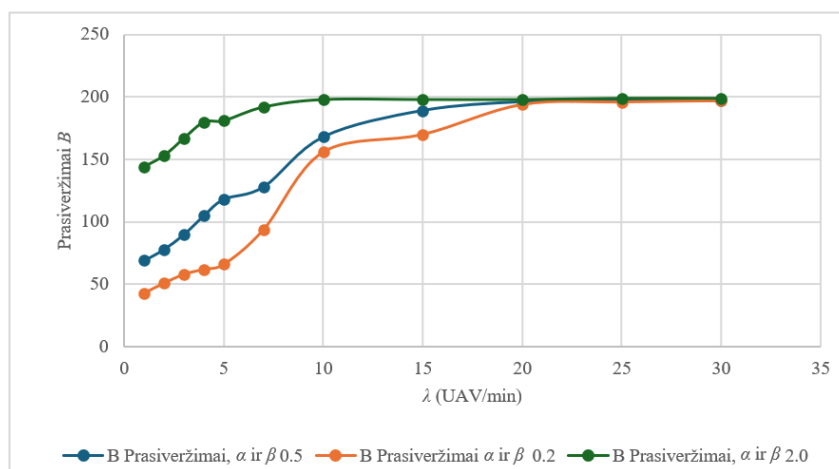
$$B = \sum(1 - X_i). \quad (3.6)$$

tliekant Monte Karlo simuliaciją, vertinamas ne vienas deterministinis rezultatas, o daugybė realizacijų. Todėl pagrindinis rodiklis yra empirinis prasiveržusių UAV skaičiaus vidurkis:

$$\bar{B} = \frac{1}{R} \sum_{i=1}^R B_i. \quad (3.7)$$

kur R – simuliacijos iteracijų skaičius. Šis rodiklis leidžia įvertinti tipinį sistemos veikimą esant konkrečiam UAV srauto intensyvumui.

Siekiant įvertinti sistemos elgseną esant skirtingoms apkrovos sąlygoms, analizuojama priklausomybė tarp UAV atvykimo intensyvumo λ ir prasiveržusių UAV skaičiaus. Rezultatai pateikiami grafike, kuriame taip pat įvertintas degradacijos parametru α poveikis.



12 pav. Prasiveržusių UAV skaičiaus priklausomybė nuo UAV atvykimo intensyvumo λ esant skirtingiems α ir β

Iš pateikto grafiko matyti, kad didėjant UAV atvykimo intensyvumui λ , prasiveržusių UAV skaičius sparčiai didėja ir artėja prie bendro UAV skaičiaus. Esant mažoms λ reikšmėms sistema dar geba efektyviai apdoroti UAV srautą, nes sistemos pajėgumas C ir vieno UAV aptarnavimo trukmė τ leidžia aptarnauti atvykstančius taikinius neperkeliant sistemos į perkrovos būseną. Tačiau artėjant prie sistemos pralaidumo ribos ($\lambda \approx C/\tau$), kai UAV atvykimo intensyvumas tampa artimas maksimaliam sistemos apdorojimo pajėgumui, prasiveržimų skaičius ženkliai išauga. Toliau didinant λ , sistema tampa visiškai perkrauta ir beveik visi UAV prasiveržia.

Taip pat aiškiai matomas degradacijos parametru α ir β poveikis. Kadangi šiame darbe nagrinėjami scenarijai, kuriuose $\alpha = \beta$, šie parametrai kartu apibrėžia, kaip greitai blogėja tiek aptikimo, tiek neutralizavimo efektyvumas didėjant apkrovai. Esant didesnėms α ir β reikšmėms, abi tikimybės mažėja greičiau, todėl prasiveržusių UAV skaičius tampa didesnis net esant mažesniai UAV atvykimo intensyvumui λ . Tuo tarpu mažesnės α ir β reikšmės atitinka optimistiškesnį scenarijų, kai sistema ilgiau išlaiko efektyvumą esant augančiai apkrovai. Tokiu būdu grafikas parodo ne tik UAV srauto intensyvumo įtaką, bet ir sistemos jautrumą apkrovai, kuris yra apibrėžiamas degradacijos parametrais.

Šis modelis papildo binominį modelį, nes leidžia įvertinti sistemos veikimą esant dinaminei apkrovai ir ribotam pajėgumui. Skirtingai nuo statinio požiūrio, čia atsiranda kritinė riba, kai sistema nebesugeba apdoroti UAV srauto, todėl prasiveržimų skaičius tampa artimas bendram UAV skaičiui. Tai rodo, kad binominis modelis gali būti taikomas tik kaip pirmo lygio įvertis, o dinaminis Monte Karlo modelis leidžia tiksliau atspindėti realias sistemos veikimo sąlygas.

Šiame darbe dinaminis modelis interpretuojamas kaip sistemos elgsenos įvertinimas trumpame laiko intervale (apie 10 min.), kai UAV atvykimo intensyvumas gali reikšmingai viršyti sistemos pajėgumą. Toks požiūris leidžia įvertinti kritinius trumpalaikius scenarijus, kurie negali būti tiksliai aprašyti statiniu binominiu modeliu.

Išvados

1. Darbe apibrėžta „dronų sienos“ tipo C-UAS sistemos veikimo logika ir suformuluotas modeliavimo uždavinys, kuriame sistemos efektyvumas vertinamas pagal prasiveržusių UAV skaičių per pasirinktą laiko intervalą. Parodyta, kad masinės atakos sąlygomis galutinis rezultatas priklauso ne tik nuo pavienio taikinio perėmimo sėkmės, bet ir nuo sistemos pajėgumo ribos, todėl prasiveržimų rizika turi būti vertinama kaip visos sistemos veikimo pasekmė.
2. Nustatyti pagrindiniai modelio įėjimo parametrai ir jų tarpusavio ryšiai: atakuojančių UAV skaičius N , sistemos pajėgumas C , aptikimo tikimybė P_d , neutralizavimo tikimybė P_k ir perėmimo bandymų skaičius m . Baziniame scenarijuje taikyta $N = 200$, $C = 200$, $P_d = 0,95$, $P_k = 0,90$, $m = 1$. Tai rodo, kad net esant aukštomis P_d ir P_k reikšmėms masinės atakos metu tikėtinas prasiveržusių UAV skaičius išlieka reikšmingas.
3. Sudaryta prasiveržusių taikinių skaičiavimo schema, įvertinanti sistemos pajėgumo ribojimą per dydžius $N_a = \min(N, C)$ ir $N_u = \max(0, N - C)$. Nustatyta, kad kai $N > C$, dalis UAV lieka neaptarnauti vien dėl riboto sistemos pajėgumo, todėl jų prasiveržimo rizika atsiranda nepriklausomai nuo aptikimo ir neutralizavimo kokybės. Tai rodo, kad prisotinimo režime sistemos pajėgumo riba tampa vienu svarbiausių prasiveržimų rizikos veiksnių.
4. Pritaikius binominį modelį baziniam scenarijui nustatyta, kad tikėtinas prasiveržusių UAV skaičius yra apie 29 UAV, o standartinis nuokrypis σ – apie 4,98 UAV. Taip pat apskaičiuotos viršijimo tikimybės: $P(B \geq 20) = 0,97636$, $P(B \geq 30) = 0,45068$, $P(B \geq 40) = 0,02072$. Kvantilių analizė parodė, kad 95 % blogiausių scenarijų riba siekia apie 37 UAV, o 99 % riba – apie 41 UAV. Nustatyta, kad vien vidutinės reikšmės nepakanka sistemos patikimumui vertinti, nes blogiausių scenarijų metu prasiveržusių UAV skaičius gali reikšmingai viršyti vidutinį lygį.
5. Atlikta scenarijų analizė parodė, kad prasiveržimų rizika labiausiai didėja augant atakuojančių UAV skaičiui N ir artėjant prie sistemos pajėgumo ribos C . Nustatyta, kad mažėjant P_d ir P_k reikšmėms sparčiai didėja tiek vidutinis prasiveržusių UAV skaičius, tiek viršijimo tikimybės ir blogiausių scenarijų ribos. Taip pat nustatyta, kad didinant perėmimo bandymų skaičių m prasiveržimų rizika mažėja netiesiškai: didžiausias efektyvumo prieaugis gaunamas didinant m nuo 1 iki 3, tačiau toliau didinant m papildomas efektas tampa vis mažesnis. Tai rodo sistemos efektyvumo prisotinimo reiškinį.
6. Parengtas Monte Karlo modeliavimo algoritmas ir atliktas rezultatų palyginimas su binominio modelio skaičiavimais. Monte Karlo modeliavimas, atliktas su $C = 20,000$ realizacijų, pateikė labai artimus rezultatus: empirinis vidurkis $\bar{B} = 29,004$, mediana – 29, standartinis nuokrypis $\sigma = 4,991$. Kai kritinis prasiveržusių UAV slenkstis $t = 20$, binominio modelio viršijimo tikimybė lygi 0,97636, o Monte Karlo metodo – 0,97635; kai $t = 30$ – atitinkamai 0,45068 ir 0,45340. Nustatyta, kad esant fiksuotoms prielaidoms ir pastovioms tikimybėms binominis modelis yra pakankamai tikslus bazinis analitinis metodas.
7. Monte Karlo modeliavimas parodė, kad vien analitinio binominio modelio nepakanka vertinant kraštinius scenarijus ir dinaminį UAV srautą. Simuliacijos metu nustatyta, kad baziniame scenarijuje prasiveržusių UAV skaičius gali svyruoti nuo 10 iki 51 UAV, nors vidutinė reikšmė siekia tik apie 29 UAV. Dinaminio modeliavimo rezultatai taip pat parodė, kad sistemos efektyvumas stipriai priklauso nuo UAV atvykimo laiko struktūros: didėjant srauto intensyvumui sistema pereina į perkrovos režimą, kuriame prasiveržusių UAV skaičius sparčiai didėja dėl mažėjančio P_d ir P_k efektyvumo. Todėl Monte Karlo metodas yra tikslingas vertinant sudėtingus scenarijus, kuriuose sistemos pajėgumo riba ir laiko dinamika daro didelę įtaką rezultatui.

Literatūros sąrašas

1. Kang, H.; et al. (2020). Protect Your Sky: A Survey of Counter Unmanned Aerial Vehicle Systems. IEEE Access. [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://koasas.kaist.ac.kr/bitstream/10203/276871/1/000572981300001.pdf>.
2. De Cubber, G.; et al. (2025). Standardized Evaluation of Counter-Drone Systems: Methods, Technologies and Performance Metrics. Drones (MDPI). [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/2504-446X/9/5/354/pdf>.
3. Lykou, G.; et al. (2020). Defending Airports from UAS: A Survey on Cyber-Attacks and Counter-Drone Sensing Technologies. Sensors (MDPI). [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/12/3537/pdf>.
4. European Commission, Joint Research Centre (2024). C-UAS detection, tracking and identification technology. JRC report. [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC140692/JRC140692_01.pdf.
5. European Commission, Joint Research Centre (2024). Counter-drone systems and data fusion. JRC report. [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC139587/JRC139587_01.pdf.
6. JAPCC (2021). A Comprehensive Approach to Countering Unmanned Aircraft Systems. Manual. [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://www.japcc.org/wp-content/uploads/A-Comprehensive-Approach-to-Countering-Unmanned-Aircraft-Systems.pdf>.
7. U.S. Department of the Army (2025). ATP 3-01.81 Counter-Unmanned Aircraft System (C-UAS) Techniques. Army techniques publication. [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: https://rdl.train.army.mil/catalog-ws/view/100.ATSC/B6A1625F-6975-4367-82C8-E67E901218C7-1753193840461/ATP3_01x81.pdf.
8. Hotters, D.; et al. (2025). A Novel Approach to Quantifying Counter-Drone System Effectiveness Against UAS Swarms. DLR eLib. [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://elib.dlr.de/219989/1/FINAL%20-%20A%20Novel%20Approach%20to%20Quantifying%20Counter-Drone%20System%20Effectiveness%20Against%20UAS%20Swarms.pdf>.
9. Mohamoud, A.; et al. (2024). An Objective-Driven Test Method for Comparative Assessment of Drone DTI Systems. arXiv. [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://arxiv.org/pdf/2405.04477>.
10. Svanstrom, F.; et al. (2022). Drone Detection and Tracking in Real-Time by Fusion of Different Sensing Modalities. arXiv. [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://arxiv.org/pdf/2207.01927>.
11. (2024). Survey on Detection, Classification, and Tracking of UAVs. arXiv. [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://arxiv.org/pdf/2402.05909>.
12. Ganganath, G.; et al. (2025). Radar and Acoustic Sensor Fusion using a Transformer Encoder for Robust Drone Detection and Classification. arXiv. [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://arxiv.org/pdf/2507.19785>.
13. Gong, J.; et al. (2023). Introduction to Drone Detection Radar with Emphasis on Automatic Target Recognition (ATR). arXiv. [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://arxiv.org/pdf/2307.10326>.
14. Fang, Y.; et al. (2025). CubeDN: Real-time Drone Detection in 3D Space from Dual mmWave Radar Cubes. arXiv. [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://arxiv.org/pdf/2508.17831>.

15. Bernardini, A.; et al. (2017). Drone detection by acoustic signature identification. *Electronic Imaging*. [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://library.imaging.org/admin/apis/public/api/ist/website/downloadArticle/ei/29/10/art00009>.
16. Paszkowski, W.; et al. (2024). Acoustic-Based Drone Detection Using Neural Networks. *ASTRJ*. [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://www.astrj.com/pdf-175863-102771?filename=Acoustic-Based-Drone-Dete.pdf>.
17. Yang, B. (2019). UAV Detection System with Multiple Acoustic Nodes Using Machine Learning Models. Purdue University (thesis). [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: https://hammer.purdue.edu/articles/thesis/UAV_DETECTION_SYSTEM_WITH_MULTIPLE_ACOUSTIC_NODES_USING_MACHINE_LEARNING_MODELS/7975991/files/14869244.pdf.
18. Kondratenko, Y. (2025). Identification of UAVs using RF features. *CEUR Workshop Proceedings*. [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://ceur-ws.org/Vol-4004/paper23.pdf>.
19. Cetin, E.; et al. (2021). Improving real-time drone detection for counter-UAS. *UPC repository*. [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://upcommons.upc.edu/bitstreams/627b01da-7ada-4155-bb32-8cf90b6a6128/download>.
20. NATO STO (2019). Counter Unmanned Aircraft Systems. Meeting proceedings. [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://publications.sto.nato.int/publications/STO%20Meeting%20Proceedings/STO-MP-MSG-SET-183/%24MP-MSG-SET-183-KN-1P.pdf>.
21. NATO STO (2019). New Generation of Counter UAS Systems. Meeting proceedings. [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://publications.sto.nato.int/publications/STO%20Meeting%20Proceedings/STO-MP-MSG-SET-183/%24MP-MSG-SET-183-KN-2.pdf>.
22. Zong, J.; Gao, X.; Zhang, Y.; Hou, Z. (2024). Research on Target Allocation for Hard-Kill Swarm Anti-Unmanned Aerial Vehicle Swarm Systems. *Drones*, 8(11), 666. [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/2504-446X/8/11/666/pdf>.
23. Ma, Z.; et al. (2022). Multi-ship cooperative air defense model based on queuing theory. *arXiv*. [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://arxiv.org/pdf/2205.07820>.
24. Yao, H. (2017). Air Defense Missile Weapon System Based on Queuing Theory. Atlantis Press. [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://www.atlantispress.com/article/25886061.pdf>.
25. Nikolic, N. (2010). Military Queueing Systems in Saturation Regime and Monte Carlo Modelling. *VTI*. [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://www.vti.mod.gov.rs/ntp/rad2010/1-10/6/6.pdf>.
26. Wilkening, D. A. (1999). A Simple Model for Calculating Ballistic Missile Defense Effectiveness. *Science & Global Security*. [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: https://fsi9-prod.s3.us-west-1.amazonaws.com/s3fs-public/Simple_Model_for_BMD.pdf.
27. Armstrong, M. J. (2005). A Stochastic Salvo Model for Naval Surface Combat. *Operations Research*, 53(5), 830-841. [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://brocku.scholaris.ca/bitstreams/83869e20-0506-4a3d-b328-e1b23772f76b/download>.
28. Armstrong, M. J. (2011). A Verification Study of the Stochastic Salvo Combat Model. *Annals of Operations Research*, 186(1), 23-38. [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://scispace.com/pdf/a-verification-study-of-the-stochastic-salvo-combat-model-ahw357tygk.pdf>.

29. Armstrong, M. J. (2005). A Stochastic Salvo Model Analysis of the Battle of the Coral Sea. Carleton University (working paper). [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: https://www3.carleton.ca/csds/docs/working_papers/ArmstrongWP03.pdf.
30. Kesler, G.; et al. (2019). A Data Farming Analysis of a Simulation of Armstrong's Stochastic Salvo Model. Winter Simulation Conference. [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://www.informs-sim.org/wsc19papers/238.pdf>.
31. Dowling, A. (2021). A Multi-agent Stochastic Control Model for Adversarial Planning in Naval Operations. Princeton University (report). [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: https://castlelab.princeton.edu/wp-content/uploads/2021/03/Dowling-A_Multi_agent_Stochastic_Control_Model_for_Adversarial_Planning_in_Naval_Operations_reduced.pdf.
32. Zeng, G. (2003). Two Common Properties of the Erlang-B Function. Mathematical and Computer Modelling. [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895717703900409/pdf?isDTMRedir=true&download=true>.
33. Wong, E.; et al. (2012). Computation of blocking probability for large circuit switched networks. City University of Hong Kong (paper). [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://www.ee.cityu.edu.hk/~ewong/papers/41.pdf>.
34. Shafik (2018). Erlang B and blocking probability tutorial paper. Yazd University (paper). [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://pws.yazd.ac.ir/matinkhah/publications/2018/shafik/2.pdf>.
35. L'Ecuyer, P. (2015). Stochastic Simulation and Monte Carlo Methods. Book (University of Montreal). [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://www-labs.iro.umontreal.ca/~lecuyer/ift6561/book.pdf>.
36. Rudnick-Cohen, E.; et al. (2019). Modeling UAS Risks via Monte Carlo Simulation. ICUAS proceedings. [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://user.eng.umd.edu/~jwh2/papers/Rudnick-Cohen-a-ICUAS-2019.pdf>.
37. Lum, C.; et al. (2011). Assessing and Estimating Risk of Operating Unmanned Aircraft Systems in Populated Areas via Monte Carlo. University of Washington (report/paper). [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: https://www.aa.washington.edu/sites/aa/files/research/afsl/publications/lum_risk_for_uavs_monte_carlo.pdf.
38. Wang, J. C. H. (2020). Three-Dimensional Monte-Carlo Modeling for UAS Collision Risk Management in Restricted Airport Airspace. Nanyang Technological University (thesis/report). [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://dr.ntu.edu.sg/bitstream/10356/144331/2/Three-Dimensional%20%283D%29%20Monte-Carlo%20Modeling%20for%20UAS%20Collision%20Risk%20Management%20in%20Restricted%20Airport%20Airspace.pdf>.
39. Izadi Moud, H.; et al. (2018). Monte Carlo based Risk Analysis of UAV flights over construction job sites. SciTePress. [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://www.scitepress.org/papers/2018/68688/68688.pdf>.
40. Ushakov, I. A. (ed.) (2012). Probabilistic Reliability Engineering. Book. [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://www.gnedenko.net/library/Ushakov/Probabilistic%20Reliability%20Engineering.pdf>

41. (2019). Probability Distributions Used in Reliability Engineering. Open eBook. [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://crr.umd.edu/sites/crr.umd.edu/files/Free%20Ebook%20Probability%20Distributions%20Used%20in%20Reliability%20Engineering.pdf>.
42. Singh, C. (2016). Reliability Mathematics - Chapter 2. Lecture notes. [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://people.engr.tamu.edu/c-singh/enggreliability/Chap2.pdf>.
43. Fitrikananda, B. P.; et al. (2023). Risk Assessment Method for UAV's Sense and Avoid System. Aerospace (MDPI). [Interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://www.mdpi.com/2226-4310/10/9/781/pdf>.