

GENEROLO JONO ŽEMAIČIO LIETUVOS KARO AKADEMIJA



Doc. dr. Albertas Pincevičius

**MATEMATINIO MODELIAVIMO TAIKYMAS  
SPRENDŽIANT IMITACINIUS KARYBOS  
UŽDAVINIUS IR PUSLAIDININKINIŲ PRIETAISŲ  
TECHNOLOGINES PROBLEMAS**

Mokslinių darbų visumos,  
teikiamos ekspertinio patikrinimo procedūrai  
profesoriaus pareigoms eiti, apžvalga  
Fiziniai mokslai. Matematika (01P)

Vilnius 2014

# TURINYS

1. MOKSLINIŲ DARBŲ TIKSLAS IR UŽDAVINIAI .....	4
1.1. Įvadas .....	4
1.2. Mokslinių tyrimų tikslas ir uždaviniai.....	5
2. MATEMATINIO MODELIAVIMO TAIKYMAS SPRENDŽIANT IMITACINIUS KARYBOS UŽDAVINIUS IR PUSLAIDININKINIŲ PRIETAISŲ TECHNOLOGINES PROBLEMAS .....	7
2.1. Pėstininkų kovos veiksmų realioje vietovėje modeliavimas ir efektyvumo įvertinimas [3, 5, 7, 11, 12, 13, 16, 18] .....	7
2.2. Artilerijos ugnies valdymas realiu laiku [6, 8, 9, 10, 17, 19] .....	12
2.3. Skrendančių objektų stebėjimo sistemos modeliavimas ir tobulinimas [2, 14, 15] .....	16
2.4. Didelės varžos GaAs gilių lygmenų parametrų nustatymo technologijų modeliavimas ir tobulinimas [1, 22] .....	20
2.5. Šotkio diodų srovės mechanizmų barjere modeliavimas ir prietaisų tobulinimas [4, 20, 21, 23] .....	24
3. APIBENDRINAMOSIOS IŠVADOS .....	27
4. DARBŲ AKTUALUMAS, MOKSLINĖ IR PRAKTINĖ REIKŠMĖ, AUTORIAUS INDĖLIS .....	29
4.1. Darbų aktualumas, mokslinė ir praktinė reikšmė .....	29
4.2. Autoriaus indėlis.....	30
Ekspertinio patikrinimo procedūrai atlikti teikiamų mokslo darbų ir vadovėlių sąrašas .....	31

## 1. MOKSLINIŲ DARBŲ TIKSLAS IR UŽDAVINIAI

### 1.1. Įvadas

Apžvalgos 2.1, 2.2 ir 2.3 skyriuose aptariamas imitacinių karybos uždavinių sprendimas. Gauti rezultatai skirti padalinio vado informacinei sistemai kurti. 2.4 ir 2.5 skyriuose aptariamos puslaidininkinių prietaisų tobulinimo problemos. Darbai buvo panaudoti gaminant prietaisus *GaAs* pagrindu.

Darbų [3, 5, 7, 11, 12, 13, 16, 18] tikslas – naudojantis stochastiniais modeliais aprašyti pėstininkų kovos veiksmus. Šiuo atveju modeliuojami kiekvieno kario veiksmai kovos lauke, įvertinama atsitiktinių faktorių įtaka ir atliekamas būsimo puolimo „skaitmeninis eksperimentas“. Matematinio modeliavimo panaudojimas leidžia įvertinti kovinio dalinio galimybes kovojant konkrečioje vietovėje ir numatyti būdus nuostoliams vykdant kovos užduotį sumažinti. Parengtos programos leidžia analizuoti daugelio atsitiktinių faktorių įtaką mūšio eigai. Galima įvertinti vietovės, karių individualios taktikos (karių judėjimo mūšio lauke įvairių būdų) įtaką mūšio eigai. Skaitmeninių žemėlapių panaudojimas leidžia atlikti efektyvią kovos lauko analizę. Tikslus ir laiku atliktas inžinerinis vietovės įvertinimas sukuria efektyvaus šiuolaikinių greitų karinių operacijų valdymo prielaidas. Panaudota moderni sąsajų (*glyph*) technologija leidžia atvaizduoti skaitmeniniame žemėlapyje kovos veiksmų rezultatus. Galima tirti atskirų mūšio elementų įtaką galutiniam rezultatui ir naudoti programas mokant kariūnus auditorijose ir pratybose poligone.

Apžvalgoje pristatomi darbai [6, 8, 9, 10, 17, 19], kuriuose nagrinėjamos minosvaidžių valdymo realiu laiku tobulinimo galimybės. Minosvaidis – artimojo mūšio pabūklas, pritaikytas šaudyti iškiliosiomis trajektorijomis ( $\alpha = 45^\circ - 85^\circ$ ) ir naudojamas kaip mobili, galinga „pėstininkų artilerija“. Šio ginklo privalumai: galimybė sunaikinti priešo karius ir ugnies pozicijas, paslėptas kalvų, gyvenvietėje, nesudėtinga konstrukcija ir paprastas naudojimas (priežiūra), maža masė ir mobilumas (juos galima pervežti džipu, gali per-

nešti kariai). Dėl šių savybių minosvaidžiai efektyviai gali būti naudojami kalnuotose vietovėse, galimas netikėtumo efektas. Šiuos ginklus iki šiol naudoja NATO, taip pat Lietuvos kariuomenės.

Darbuose [2, 14, 15] pateikiamas skrendančių objektų aptikimo sistemos modelis. Parenkamas radiolokacinių stočių išdėstymo būdas, jų parametrai ir aptariamas skrendančio objekto aptikimo procesas. Skaičiuojamos skrendančio objekto aptikimo tam tikru nuotoliu naudojant vieną radiolokacinę stotį ar jų sistemą tikimybės, braižomos tikimybinių laukų diagramos. Atliekamas tokios sistemos kiekybinis įvertinimas, atsižvelgiant į naudojamų radarų technines charakteristikas, meteorologines sąlygas.

Puslaidininkinių prietaisų ir jų elementinės bazės modeliavimo darbai buvo atliekami dviem kryptimis. Pirmoji – modeliuojama fotolaidumo relaksacija plačiame laiko ir temperatūrų intervale, lyginami eksperimentų ir skaičiavimų rezultatai, surandami gilių lygmenų krūvininkų pagavimo skerspjūviai, koncentracijos ir kiti puslaidininkinės medžiagos parametrai [1, 22].

Antroji kryptis – sukurtos programos, kurios leidžia modeliuoti SAD prietaisų charakteristikas [4, 20, 21, 23]. Lyginant skaičiavimų ir eksperimentų rezultatus plačiame temperatūrų intervale galima rasti optimalius puslaidininkinės struktūros parametrus, kad gaminami prietaisai turėtų norimas charakteristikas.

### 1.2. Mokslinių tyrimų tikslas ir uždaviniai

1.2.1. *Sukurti programų sistemą, leidžiančią imituoti ir aprašyti pėstininkų kovos veiksmus konkrečioje vietovėje. Vykdam tokią užduotį reikia:*

1) Sudaryti galimybę pasinaudoti GIS (geografinių informacinių sistemų) bazėmis ir atlikti vietovės inžinerinę žvalgą.

2) Sukurti imitacines programas, kurias naudojant galima įvertinti patikimo tikimybes, kai kariai juda kovos lauke naudodami įvairias taktikas.

3) Sukurti programas, leidžiančias pasirinkus įvairius kovos taktikos variantus prognozuoti galimus mūšio rezultatus.

4) Sudaryti galimybes žvalgybos ir galimų mūšio baigmių rezultatus atvaizduoti (matyti) skaitmeniniame žemėlapyje.

1.2.2. *Sukurti programų sistemą, leidžiančią modeliuoti grupinio taikinio kovimą panaudojant minosvaidžius:*

1) Sukurti metodiką, leidžiančią gauti netiesinių diferencialinių lygčių sistemos apytikslį analizinį sprendinį, aprašantį minos judėjimą veikiant aplinkos pasipriešinimo jėgai.

2) Skaičiavimuose įvertinti ir minimizuoti išorės faktorių (vėjo, temperatūros ir atmosferos drėgmės) pokyčių įtaką apšaudymo rezultatams.

3) Sukurti programas, leidžiančias optimizuoti grupinio taikinio naikinimą.

4) Sukurti galimybes panaudoti skaitmeninį žemėlapi taikinių vietai nustatyti ir apšaudymo rezultatams atvaizduoti.

1.2.3. *Atlikti skrendančių objektų stebėjimo sistemos modeliavimą.*

1) Sukurti programą, leidžiančią įvertinti skrendančio objekto aptikimo tikimybę.

2) Pateikti programas radarų sistemos darbo įvertinimui.

3) Atvaizduoti skaičiavimų rezultatus.

1.2.4. *Sukurti programas, leidžiančias modeliuoti GaAs sluoksnių fotolaidumo savybes.*

1) Sukurti programas, aprašančias GaAs sluoksnio fotolaidumo kinetiką plačiame laiko ir temperatūrų intervale.

2) Lyginant eksperimentų ir skaičiavimų rezultatus nustatyti GaAs sluoksnio fotolaidumą lemiančių gilių lygmenų parametrus.

1.2.5. *Sukurti programas, leidžiančias modeliuoti metalo kontakto, sudaryto ant įvairiai paruošto GaAs paviršiaus, savybes ir voltamperinių bei voltfaradinių charakteristikų ypatumus.*

1) Sukurti programas, leidžiančias surasti GaAs Šotkio diodų voltampe-

rines ir voltfaradines charakteristikas esant sudėtingam aktyviųjų centrų pasiskirstymui priekontaktyje.

2) Įvertinti krūvininkų lėkio pro barjerą GaAs Šotkio dioduose mechanizmus.

3) Derinant teorinių skaičiavimų duomenis su eksperimentinių voltamperinių ir voltfaradinių charakteristikų matavimų rezultatais, išaiškinti Šotkio diodų aktyviųjų centrų pasiskirstymą priekontaktyje.

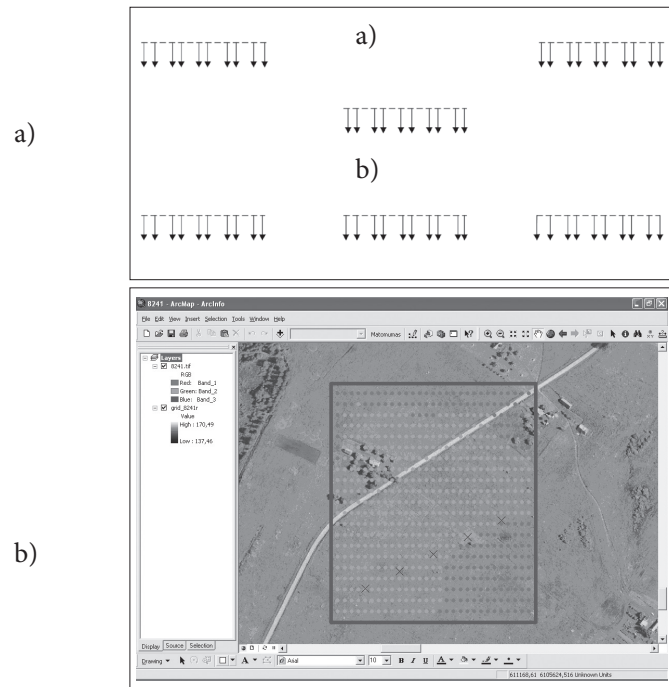
## **2. MATEMATINIO MODELIAVIMO TAIKYMAS SPRENDŽIANT IMITACINIUS KARYBOS UŽDAVINIUS IR PUSLAIDININKINIŲ PRIETAISŲ TECHNOLOGINES PROBLEMAS**

### **2.1. Pėstininkų kovos veiksmų realioje vietovėje modeliavimas ir efektyvumo įvertinimas [3, 5, 7, 11, 12, 13, 16, 18]**

Šiuo metu dažniausiai vyksta lokalūs mūšiai, besipriešinantys rengia pasalas, kuriose dalyvauja 10–30 kovotojų, o joms likviduoti siunčiama apie 30–100 karių. Darosi reikšmingi kiekvieno kario veiksmai. Žinoma, kad kovos veiksmus labai veikia daugelis atsitiktinių faktorių, kuriuos aprašyti sunku, o dažnai tiesiog neįmanoma. Atskirų taktikos elementų įtakos mūšio eigai tikrinimas labai sudėtingas. Kovos taisyklėms, lemiančioms mūšio eigą, patvirtinti arba paneigti reikia statistinių duomenų, nes kiekvienu konkrečiu atveju veikia daug „atsitiktinių faktorių“, kurie iškreipia galutinį rezultatą. Tik daug kartų kartojant eksperimentą galima išskirti ir atmesti nereikšmingus veiksmus. Pagrįstą atsakymą galima rasti tik naudojant matematinio modeliavimo metodus. Atsitiktinių faktorių įtaką geriausia tirti naudojantis stochastiniais aprašymo metodais. Tokie metodai leidžia, kai nežinomi arba labai sudėtingi ryšiai tarp modeliuojamų objektų, nustatyti jų sąveikos rezultatą. Tada yra modeliuojami pagrindiniai puolančiųjų karių veiksmai mūšio metu: judėjimas priešininko link, stebėjimas ir jo ap-

tikimas, šaudymas ir priešininko kovimas. Modeliuojami analogiški priešininko veiksmai.

Būrys puolime užima apie 300 m ilgio juostą ir kariai, išlaikydami  $d \approx 8 \div 12$  m atstumą vienas nuo kito, juda priešininko link. Jei kariai šuoriui (nedideliame perbėgime atakos metu, kad priešininkas nespėtų prisitaikyti, pakyla  $\Delta t_1 \approx 3-4$  s atsitiktiniu laiko momentu  $\Delta t_2 \approx 14-16$  s, judėjimą galima nagrinėti keičiant laiką nedideliais intervalais ( $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 \approx 18-20$  s) ir aprašyti kaip kario perbėgimą iš vieno stačiakampio į kitą (stačiakampio kraštinės  $\approx 8 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ ). Puolimas gali vykti pagal įvairias schemas, pavyzdžiui, pagal schemą, parodytą 1 pav. a.



**1 pav. a)** Perbėgimui pakyla vidurinė grandis: a) dvi likusios grandys ją pridengia ugnimi, puolimo linija išlyginama; b) tada pridengia ugnimi vidurinė grandis; **b)** „Matomumo įrankio“ darbo rezultatai: matomi plotai pažymėti žaliais taškais, nematomi – raudonais. Kryželiais pažymėtos spėjamos besiginančių įsitvirtinimo vietos.

GIS bazėse sukaupti objektų aukščio vietovėje duomenys. Sukurtas matomumo įrankis, kuris, nurodžius norimos tirti vietovės 4 kampų koordinates ir tiesės, kur bus išdėstytos numatomos gynybos vietos (galima iki 10) pradžios ir galo koordinates, suformuoja matomumo vaizdą. Tarkim, įsitvirtinę 10 karių, o juos ruošiasi pulti tris kartus didesnės pajėgos – 30 karių. Norint turėti įsitvirtinusių priešininko matomumo matricą, pakanka žinoti matomumą iš 5 taškų (kiekvienai karių porai žr. 1 pav. b). Be spalvoto paveikslėlio kataloge suformuojamos matricos (atskirai kiekvienam stebėtojui), kurių elementai atitinka žemėlapiu taškus (žr. 2 pav. a).

Naudojant stochastinį metodą, atskirus kario veiksmus galima aprašyti atsitiktinėmis funkcijomis. Šaudant iš automato, paklaidos pasiskirsto pagal dvimatį normalųjį skirstinį, kuris aprašomas formule (1):

$$p(r) = \frac{1}{\pi \sigma_x \sigma_y} \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} e^{-\frac{(x-x_m)^2}{2\sigma_x^2}} e^{-\frac{(y-y_m)^2}{2\sigma_y^2}} dx dy, \quad (1)$$

čia  $r$  – atstumas iki taikinio, intervalai  $[x_1; x_2]$ ,  $[y_1; y_2]$  – nusako taikinio dydį,  $(x_m; y_m)$  – taikymo taško koordinatės,  $\sigma_x$  ir  $\sigma_y$  – vidutiniai kvadratiniai nuokrypiai, kuriuos lemia ginklo konstrukciniai ypatumai, meteorologinės sąlygos, kario taiklumas.

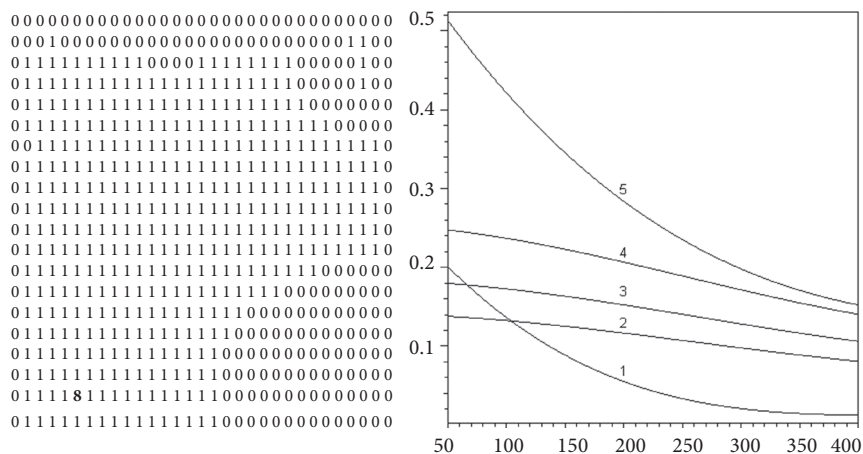
Bėgančio kario figūra yra  $\sim 0,5 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}$ , tada  $x_1 = -0,25$ ,  $x_2 = 0,25$ ,  $y_1 = -0,75$ ,  $y_2 = 0,75$ . Kariai mokomi judėti mūšio lauke kiek įmanoma vengiant taiklaus prieš šūvio. Jie juda į priekį trumpais perbėgimais (šuoriais). Jei priešininkui prisitaikyti reikia 5 sekundžių, tai perbėgimui pakylama per 3–4 sekundes. Pataikymo tikimybė mažėja (žr. 2 pav. b), jos pokytį galima įvertinti naudojantis tokiuose uždaviniuose plačiai taikoma formule (2):

$$p_i(r) = 1 - e^{-\frac{p(r)t_i}{t_0}}, \quad (2)$$

čia  $p(r)$  – pataikymo tikimybė, kai nuotolis  $r$ ,  $t_0$  – vidutinis laikas, per kurį karys spėja prisitaikyti (pvz., 5 s),  $t_i$  – trumpo perbėgimo laikas (pvz., 3–4 s).

Kariai juda apie 0,5 m į šonus ir  $x_0 = 0,5 \times \text{uniform}()$  (čia  $\text{uniform}()$  yra atsitiktinis dydis, tolygiai pasiskirstęs intervale [-1 ... 1]). Pakartojame skaičiavimus daug kartų generuodami vis kitus atsitiktinius dydžius  $\text{uniform}()$  ir randame pataikymo tikimybių puolime ar gynyboje vidurkius.

Visus skaičiavimus apibendriname naudodamiesi mažiausiųjų kvadratų metodu. Gauname pataikymo tikimybių priklausomybių nuo atstumo tarp kovojančių pusių analizines išraiškas (2 pav. b).

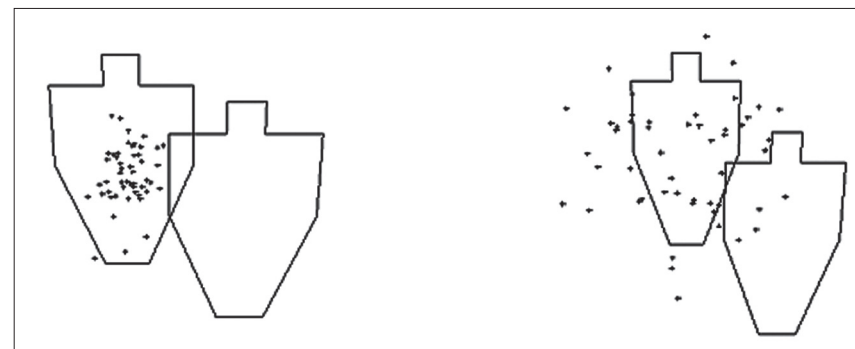


a)

b)

**2 pav.** a) Matomumo matrica (matomi taškai žymimi 1, nematomi – 0, stebėtojo vieta žymima skaičiumi 8. b) Pataikymo tikimybių priklausomybė nuo atstumo tarp priešininkų: 1 kreivė – į besiginantį karį, likusios kreivės – į karius puolime: 2 kreivė – kai perbėgimo trukmė 3 s, 3 kreivė – kai perbėgimo trukmė 4 s, 4 kreivė – kai perbėgimo trukmė  $t_i \geq 5s$ , 5 kreivė – jei  $t_i \geq 5s$  ir perbėgimo metu karys nejudą į šonus.

Mažėjant atstumui tarp kovojančių pusių, pataikymo tikimybę į puolančiuosius galima mažinti pasirenkant teisingą judėjimo taktiką kovos lauke (žr. 3 pav. a), b) ir 2, 3, 4, 5 kreives 2 pav. b).



a)

b)

**3 pav.** Kulų sklaida (50 šūvių) į taikinį: a) esantį už 50 m, b) – už 200 m. Abiem atvejais parodomas pokytis, kai taikiny s juda į šoną nuo taikymo linijos.

Aprašysime kovą. Tarkim, perbėgimui pakilo vidurinioji grandis (1 pav. a) ir juos apšaudo besiginantieji. Tikrinama, ar pataikė, t. y. ar konkretus įvykis įvyko. Jei pataikymo tikimybė  $P_i(r)$  (tarkim, lygi 0,25), tai generuojamas pagal tolygųjį skirstinį intervale [0;1] pasiskirstęs atsitiktinis dydis  $r_i$  ir tikrinama sąlyga:

$$r_i \leq P_i(r). \tag{3}$$

Jei nelygybė (3) tenkinama, tai įvykis įvyko – „pataikė“, jei netenkinama – neįvyko. Rezultatai apibendrinami, suskaičiuojama, kiek žuvo ir kiek toliau dalyvavo atakoje, kas žuvo gynyboje (mažėjant atstumui tarp kovojančių šalių). Tai kartojama, kol baigiasi mūšis, t. y. arba išsenka mūšiu skirtas laikas, arba žūsta daugiau kaip pusė karių. Tokiu būdu gaunami vienos realizacijos rezultatai. Tokie skaičiavimai pakartojami ir randamas rezultatų vidurkis (kiekviena realizacija skirtinga, nes generuojami vis kiti atsitiktiniai dydžiai) kiekvienu laiko momentu (taške). Realizacijų skaičius didinamas tol, kol gaunamas atsakymas toliau didinant realizacijų skaičių ir esant nurodytam skaičiavimų tikslumui nebekinta. Taip gaunamas realybei artimas (vidutinis) rezultatas. Tada galime nagrinėti įvairias judėjimo mūšio lauke

schemas, tirti, kaip keičiasi nuostoliai keičiant perbėgimo trukmę, kokią įtaką turi tam tikrų ginklų naudojimas ir t. t.

## 2.2. Artilerijos ugnies valdymas realiu laiku [6, 8, 9, 10, 17, 19]

Kad mina pakliūtų į numatytą tašką, tenka spręsti jos trajektorijos valdymo problemas. Reikia rasti, koks turi būti taikymo kampas  $\alpha$ , kai parinktas pradinis šaudmens greitis (tam tikram užtaisui), konkrečiomis meteorologinėmis sąlygomis ir t. t. Judėdama savo trajektorija, mina pakyla į kelis kilometrų aukštį, ženkliai keičiasi oro tankis, temperatūra, slėgis. Pasipriešinimo judėjimui jėgai didžiausią įtaką daro oro pasipriešinimas, nes minos judėjimą nustatyta trajektorija stabilizuoja jos galinėje dalyje esantys sparneliai. Mes darome prielaidą, kad pasipriešinimo jėga  $F_p$  proporcinga minos greičiui (t. y. pirmai išvestinei pagal laiką  $x', y'$ ). Tada minos judėjimą nusako lygčių sistema:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = -k \frac{dx}{dt}, \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} = -k \frac{dy}{dt} - mg, \end{cases} \quad (4)$$

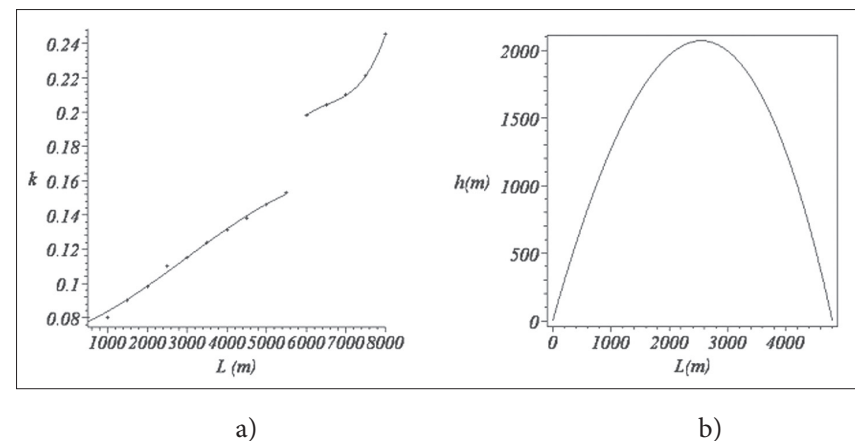
pradinėmis sąlygomis (kai laikas  $t=0$ ):

$$x(0)=0, \quad x'(0)=V_0 \cos \alpha, \quad y(0)=0, \quad y'(0)=V_0 \sin \alpha, \quad (5)$$

čia  $m$  – minos masė,  $g$  – laisvo kritimo pagreitis,  $k$  – oro pasipriešinimo judėjimui koeficientas,  $V_0$  – pradinis greitis (išlėkusios iš vamzdžio minos greitis),  $\alpha$  – taikymo kampas.

Lygčių sistemoje (4) sunkiai parenkamas ar eksperimentiškai nustatomas dydis – oro pasipriešinimo koeficientas  $k$ . Šis dydis priklauso nuo minos formos, meteorologinių sąlygų: atmosferos slėgio, oro temperatūros, drėgmės trajektorijos taške. Daugelis šių parametrų keičiasi judėjimo metu, nes, kaip

minėjome, mina pakyla į didelį aukštį. Siūlome koeficientą  $k$  parinkti derinant skaičiavimų ir realių eksperimentų rezultatus, kurie būna apibendrinti atitinkamose šaudymo lentelėse. Pagal pasirinktą taikinio nuotolį šaudymo lentelėse surandame užtaiso numerį (parenkame pradinį minos greitį) ir sprendžiame lygčių sistemą (4) pradinėmis sąlygomis (5). Keisdami koeficientą  $k$  pasiekiamo, kad šaudymo lentelėse nurodyta ir gautoji taikymo nuostata sprendžiant lygčių sistemą sutaptų. Apskaičiuotas  $k$  reikšmes aproksimuojame mažiausiųjų kvadratų polinomais ir gauname analizinę priklausomybę koeficiento  $k$  nuo taikinio nuotolio  $L$  (žr. 4 pav. a).



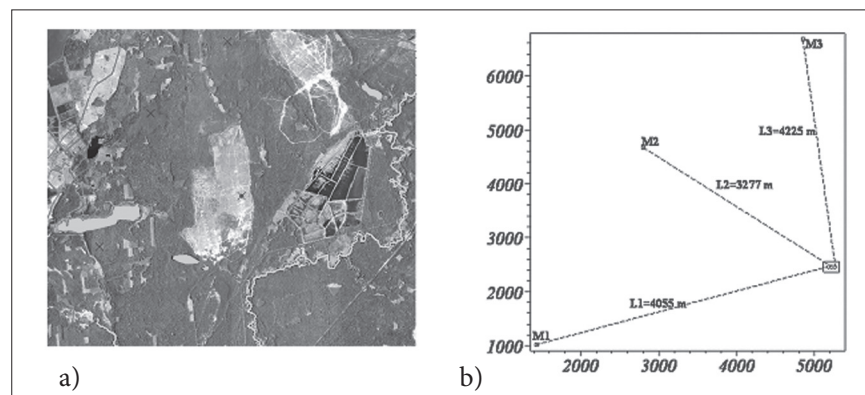
4 pav. a) Oro pasipriešinimo koeficiento  $k$  priklausomybė nuo atstumo iki taikinio  $L$  (m). b) Minosvaidžio minos lėkio trajektorija (taikinio nuotolis – 4800 m, taikymo nuostata 803 tūkstantosios, trajektorijos aukštis – 2069 m, skrydžio laikas – 41 s, kritimo kampas –  $64^\circ$ , ...).

Randame lygčių sistemos (4) pradinėmis sąlygomis (5) analizinius sprendinius, nusakančius minos judėjimą. Įrašę į šiuos sprendinius parametrų  $m, g, V_0, k$  skaitines reikšmes ir reikalavimą, kad mina nukristų nustatytoje vietoje, gausime atitinkamą algebrinių lygčių sistemą su kintamaisiais  $t$  ir  $\alpha$  (laiku ir taikymo kampu). Išsprendę pastarąją (per keletą sekundžių), galime rasti visus mus dominančius sprendžiamo uždavinio parametrus: užtaiso

numerį, taikiklio nuostatą, galinį greitį, trajektorijos aukštį, kritimo kampą (žr. 4 pav. b).

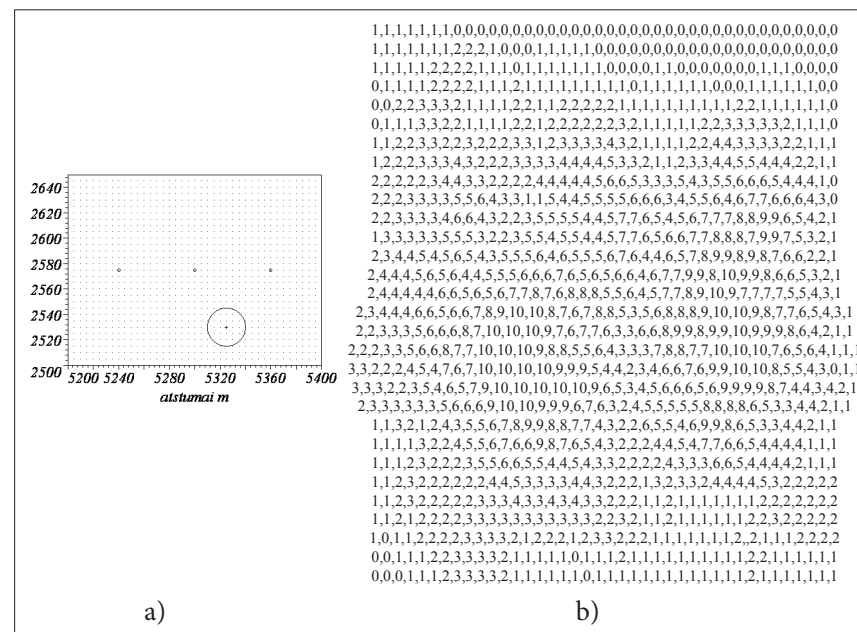
Neišvengiama yra minų sklaida: nežymūs parako užtaiso svorio, minų svorio, užtaisų temperatūros skirtumai, vėjas ir t. t. Paklaidas galima sumažinti keičiant šaudymo parametrus ir kompensuojant vidutinį atsitiktinių faktorių poveikį.

Skaičiavimams atlikti reikalingi pradiniai duomenys (taikinio nuotolis ir kryptis) gali būti nurodomi įvairiais būdais. Gali būti nurodomos taikinio koordinatės žemėlapyje (žr. 5 pav. a). Paprastai tai sąlyginės (šio žemėlapi) koordinatės. Pavyzdžiui, jei taikinio koordinatės  $xt = 2828500$ ,  $yt = 5382450$ , o minosvaidžio koordinatės  $xm = 2822950$ ,  $ym = 5381300$ , tai skirtumas tarp atitinkamų taikinio ir minosvaidžio koordinatė  $\Delta x = 5550$  nurodo taikinio poslinkį metrais pagal paralelę (jei skaičius teigiamas – į rytus), o  $Dy = 1150$  (jei skaičius teigiamas) – poslinkį šiaurės kryptimi. Kadangi atstumai nedideli (iki 8000 m), galime naudotis stačiakampės Dekarto koordinatėjų sistemos savybėmis (žr. 5 pav. b). Žinodami  $Dx$  ir  $Dy$ , nesunkiai randame ir „pagrindinę šaudymo kryptį“ ( $a = \arctan(dy/dx)$ ), tik reikia atsižvelgti į dydžio ženklą, t. y. jis teigiamas ar neigiamas). Kampas  $\alpha$  matuojamas nuo šiaurės kryptimi – pagal laikrodžio rodyklę.



5 pav. a) Lietuvos vietovės skaitmeninis žemėlapis. Kryželis žymi taikinį, o taškai – minosvaidžių vietas. b) Nurodytos trijų minosvaidžių vietos ir grupinis taikiny (brėžinys atitinka situaciją, pavaizduotą 5 pav. a).

Jei žinoma, kad kiekviena mina sunaikina priešininko karius 15 m spinduliu, galima įvertinti, kokia dalis prieš karius bus sunaikinta (žr. 6 pav. a). Minų sklaida atsitiktinė. Dešimties salvių padarytų nuostolių skaičiavimo pavyzdys 6 pav. b) (skaičiai nurodo, kiek kartų ši sritis pakliuvo į minos naikinimo zoną). Tokius skaičiavimus reikia atlikti daug kartų (pvz., 1000 realizacijų). Suskaičiavę realizacijų rezultatų vidurkį, gausime tikrovę atitinkanti rezultatą. Salvių skaičius didinamas, kol pasiekiamas norimas grupinio taikinio sunaikinimo laipsnis.



6 pav. a) Parodytas grupinis taikiny (200 m × 150 m). Taškai žymimos taikymo vietas, kryželiai yra kas 5 m ir leidžia įvertinti, kurios sritys pakliuvo į minos naikinimo zoną (apskritimo spindulys 15 m). b) Skaičiai rodo, kiek kartų sritis pakliuvo į minos naikinimo zoną, paleidus 10 salvių.

Galima keisti parinktų grupinio taikinio taikymo taškų išdėstymą ir optimizuoti grupinio taikinio artilerinį apšaudymą, išspręsti minų skaičiaus minimizavimo uždavinį.



Programas galima laikyti „kompiuteriniu treniruokliu“ kariūnams mokytis, mažinti pratybų poligone apimtį ir pagerinti karininkų rengimo kokybę.

### 2.3. Skrendančių objektų stebėjimo sistemos modeliavimas ir tobulinimas [2, 14, 15]

Praktikoje radaro darbas apibūdinamas skrendančio objekto aptikimo tikimybe vieno stebėjimo metu (momentine aptikimo tikimybe):

$$g(r) = \frac{1}{\bar{n}(r)}, \quad (6)$$

čia  $\bar{n}(r)$  – vidutinis stebėjimų, reikalingų objektui tam tikru nuotoliu (aišku, tam tikromis meteorologinėmis sąlygomis ir esant standartinėms skrendančio objekto savybėms) aptikti, skaičius. Šis dydis gali būti eksperimentiškai randamas kiekvienu konkrečiu atveju.

Teoriškai įvertinant tokią tikimybę, taikomi aptarnavimo teorijos principai. Skrendančio objekto aptikimo proceso metu tenkinami visi Puasono procesui būdingi reikalavimai: stacionarumas (radaras sukasi apibrėžtu greičiu), įvykiai (objektų aptikimas) būna nepriklausomi ir nesusieti su praeitimi (ordinarumas). Tuo atveju tikimybė pastebėti bent vieną objektą užrašoma taip:

$$P(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (7)$$

čia  $\lambda$  – srauto intensyvumas (aptarnavimų skaičius per laiko vienetą).

Vienas iš pagrindinių faktorių, lemiančių aptikimo tikimybę, yra skrendančio objekto nuotolis. Tikimybė  $P(r)$ , t. y. tikimybė aptikti skrendantį objektą nuotoliu  $r$ , užrašoma formule:

$$P(r) = 1 - e^{-\phi(r)}, \quad (8 a)$$

čia  $\phi(r)$  vadinamas „aptikimo potencialu“. Dydis  $g(r)$  susiejamas su aptikimo potencialo išvestine  $f(r)$ , nusakančia objekto aptikimo proceso intensyvumą:

$$g(r) = 1 - e^{-f(r)v\Delta T},$$

čia  $v$  – skrendančio objekto judėjimo greitis,  $\Delta T$  – stebėjimo periodas, nes skrendantis objektas dažniausiai stebimas prietaisu, dirbančiu impulsiniu režimu, ir stebėjimas vyksta tam tikros trukmės periodais.

Skrendančio objekto aptikimo tikimybę  $P(r)$  daugeliu atvejų nusako normalusis skirstinys:

$$P(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_r} \int_0^r e^{-\frac{(r-r_a)^2}{2\sigma_r^2}} dr = \int_0^r p(r) dr, \quad (8 b)$$

čia  $p(r)$  – skrendančio objekto aptikimo tikimybės tankis,  $r_a$  – vidutinis nuotolis, kuriuo aptinkamas skrendantis objektas,  $\sigma_r$  – vidutinis kvadratinis nuokrypis ( $r_a$  paklaida).

Iš formulių 8 a) ir 8 b) išplaukia:

$$\phi(r) = -\ln(1 - P(r)) \quad \text{ir}$$

$$f(r) = \frac{P'(r)}{1 - P(r)} = \frac{p(r)}{1 - P(r)}. \quad (9)$$

Jei radiolokacinės stoties darbas nelabai efektyvus, pvz., prastos meteorologinės sąlygos, taikomas Relėjaus skirstinys. Šiuo atveju objekto aptikimo tikimybės tankis užrašomas taip:

$$p(r) = \frac{r}{\sigma_r^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma_r^2}}. \quad (10)$$

Norint atlikti skaitmeninį stebėjimo sistemos įvertinimą, reikia žinoti keletą radiolokacinės stoties ir skrendančio objekto parametrų. Tarkim, jie yra tokie:

vidutinis objekto aptikimo nuotolis –  $r_a = 150 \text{ km}$ ,

antenos apsisukimo greitis – 6 kart. / min.,

skiriamoji geba pagal azimutą –  $\Delta\alpha = 3^\circ$ ,

skrendančio objekto greitis –  $v = 330 \text{ m/s}$ .

Vidutinį kvadratinį nuokrypį  $\sigma_r$  atlikdami tolesnius skaičiavimus normaliojo skirstinio atveju imsime  $\sigma_r^n = 0,1 r_a$  lygiu.

Jei yra labai nepalankios meteorologinės sąlygos, reikia naudotis Relėjaus sklaida. Tada vidutinis kvadratinis nuokrypis bus lygus  $\sigma_r^R = 0,25 r_a$ .

Kadangi radiolokatoriaus antena apsisuka per 10 s, tai kiekvieno apsisukimo metu kiekvienas stebėjimo kampas  $\Delta\alpha = 3^\circ$  „matomas“  $\frac{1}{12} \approx 0,083$  s, t. y. stebėjimo periodas  $\Delta T \approx 0,083$  s. Per šį laiką stebimas objektas, jei jo judėjimo greitis  $v = 330$  m/s, nuskrenda ne daugiau kaip 28 m. Jo atstumą nuo radiolokacinės stoties stebėjimo periodo metu galima laikyti nekintančiu, nes paprastai šis atstumas bus ne mažesnis kaip 50 km ir paklaida bus nereikšminga.

Mūsų atveju skrendantis objektas gali būti stebimas nuotoliu  $r = 50 - 200$  km nuo radiolokacinės stoties ir „matomas“  $n = 150 / (0,33 \times 10) \approx 46$  kartus (antena apsisuka per 10 s).

Jei tikimybė pastebėti skrendantį objektą vienos apžvalgos metu yra  $g$ , tai tikimybė vienam lokatoriui aptikti objektą per stebėjimo intervalą  $\Delta r \approx 150$  km, t. y. *pastebėti nors vieną kartą per n bandymų* (kiekvienas objekto stebėjimas yra nepriklausomas įvykis, o tikimybė, kad objektas nebus pastebėtas, lygi  $1 - g_i$ ), bus užrašoma taip:

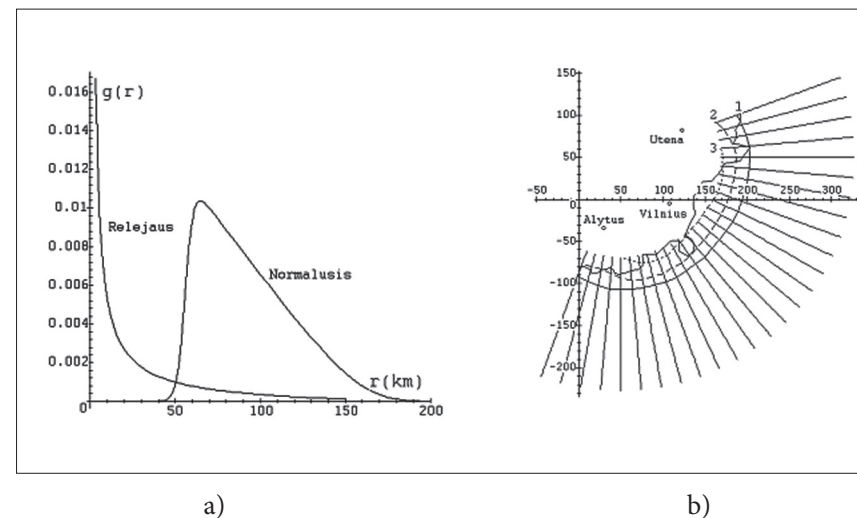
$$P_n = 1 - (1 - g_1)(1 - g_2) \dots (1 - g_n). \quad (11)$$

Jei skrendantį objektą „gaudo“ kelios radiolokacinės stotys, tai didelė tikimybė aptikti objektą vieno stebėjimo metu bus lygi tikimybių  $g^i$  sumai:

$$g = g^1 + g^2 + \dots \quad (12)$$

Momentinės aptikimo tikimybės priklausomybė nuo atstumo parodyta 7 a) pav. Grafike matyti, kad skrendančio objekto aptikimo tikimybė labai priklauso nuo meteorologinių sąlygų. Randamos aptikimo tikimybės  $P(r)$  skrendančiam objektui judant nurodytomis trajektorijomis ir dirbant višiemis trimis lokatoriams. Praktiškai naudoti labiausiai tinka paveikslas, ku-

riame parodytos aptikimo tikimybių ekvipotencialinės linijos (žr. 7 pav. b). Matome, kad palankiomis oro sąlygomis aptikimo tikimybė siekia 45%. Tinkamas ir ekvipotencialinių linijų išsidėstymas. Norint pagerinti aptikimo sistemos parametrus, reikėtų naudoti daugiau radarų. Tai ypač aktualu blogomis meteorologinėmis sąlygomis.



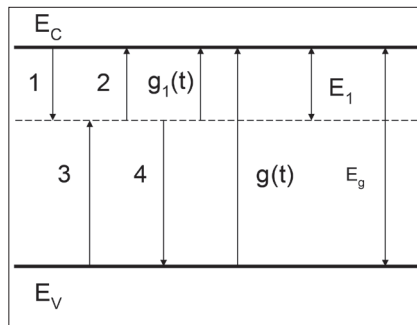
**7 pav.** a) Tikimybė aptikti skrendantį objektą vienu radaru per stebėjimo periodą  $\Delta T$   $g(r)$ : 1 – skaičiuojant naudojamas normalusis skirstinys, 2 – Relėjaus skirstinys. b) Tikimybė, kad radarų sistema aptiks skrendantį objektą (normalusis skirstinys). Ekvipotencialinės linijos: 1 kreivė –  $P = 0,25$ , 2 –  $P = 0,35$  ir 3 –  $P = 0,45$ .

Sukurtos programos gali būti naudojamos vertinant skrendančių objektų stebėjimo sistemas, parenkant radarų parametrus, jų skaičių ir išdėstymą. Jos tinka tiek mokant, tiek atliekant tokių sistemų projektavimą. Toks modeliavimas yra būtinas optimizuojant radiolokacinių stočių skaičių ir jų išdėstymą šalies oro erdvės pažeidimams nustatyti, organizuojant ypatingos paskirties objektų apsaugą nuo terorizmo.

## 2.4. Didelės varžos GaAs gilių lygmenų parametru nustatymo technologijų modeliavimas ir tobulinimas [1, 22]

Didelės varžos puslaidininkiai (pvz., GaAs) plačiai naudojami elektronikoje gaminant tranzistorius, Šotkio diodus, varikapus ir t. t. Tokie puslaidininkiai būna pagrindas, ant kurio epitaksijos metodais formuojamas prietaisas, ir turi įtakos šių prietaisų charakteristikoms. Jie gaunami liekamųjų priemaišų ir savo defektų kompensavimo būdu. Priemaišos ir struktūriniai defektai sukuria draudžiamųjų energijų juostoje skirtingas aktyvacijos energijas  $E_i$  ir elektronų pagavimo koeficientus  $\gamma_i$  turinčius lygmenis. Lygmenų, esančių puslaidininkio draudžiamoje juostoje, sistema lemia ir šio puslaidininkio fotoelektrines savybes, nes šie lygmenys aktyviai dalyvauja rekombinaciniuose procesuose. Generuojant elektronus šviesa, pvz., lazerio spinduliu, zonos – zona ar iš priemaišinių lygmenų, puslaidininkinio bandinio fotolaidumo relaksaciją iš esmės lemia draudžiamųjų energijų juostą sudaranti energetinių lygmenų sistema. Tiriant ir aprašant šią relaksaciją, galima nustatyti energetinių lygmenų parametrus: elektronų ir skylių pagavimo skerspjūvius, jų energetinę padėtį, skaičių (koncentraciją).

Elektronų kaitos schema, susieta su vienu lygmeniu puslaidininkio draudžiamųjų energijų juostoje, pateikta 8 pav. Paprastai binarinių ar daugiakomponentinių puslaidininkinių draudžiamųjų energijų juostoje susidaro daugelio energetinių lygmenų sistema ir aprašant tenka pasirinkti keletą reikšmingiausių (lemiančių elektronų kaitą) lygmenų.



**8 pav.** Elektronų kaitos schema priemaišiniame puslaidininkyje. Čia  $E_C$  – laidumo zona,  $E_V$  – valentinė zona,  $E_i$  – elektrono, esančio priemaišiniame lygmenyje, aktyvacijos energija,  $E_g$  – draudžiamųjų energijų zona. Rodyklėmis 1, 2, 3, 4 parodyti galimi elektronų šuoliai į priemaišinį lygmenį ir valentinę bei laidumo zonas,  $g(t)$  – lazerio impulsas iš valentinės zonos ar priemaišinio lygmens į laidumo zoną generuojami elektronai.

Rodyklėmis nurodyti elektronų perėjimai paprastai užrašomi taip:

$$\begin{array}{ll} 1 & \gamma_n N_{CM}(m_0 + m), \\ 2 & \gamma_n (M - m_0 - m)(n_0 + n), \\ 3 & \gamma_p P_{VM}(M - m_0 - m), \\ 4 & \gamma_p (m_0 + m)(p_0 + p), \end{array}$$

čia  $M$  – aprašomų lygmenų koncentracija,  $m_0$  – šių lygmenų užpildymas elektronais esant termodinaminei pusiausvyrai,  $m$  – nepusiausvyrinė elektronų koncentracija lygmenyje (t. y.  $\Delta m$ ), pagavimo koeficientai:  $\gamma_n$  – elektrono iš laidumo zonos ir  $\gamma_p$  – skylutės iš valentinės zonos,  $N_{CM}$ ,  $P_{VM}$  – statistiniai faktoriai, t. y. konstantos, kurių dydį lemia priemaišinio lygmens padėtis laidumo zonos atžvilgiu  $E_i$  ir temperatūra eksperimento metu  $T$ ,  $n_0$ ,  $n$  ir  $p_0$ ,  $p$  – elektronų ir skylių koncentracija esant termodinaminei pusiausvyrai ir apšvietus puslaidininkį lazeriu.

Netiesinių diferencialinių lygčių sistema, aprašanti elektronų rekombinaciją (mažėjimą) tolygiai apšviestame lazerio impulsu puslaidininkio tūryje, ir pradinės sąlygos bus šios:

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= \sum_{i=1}^4 [\gamma_n^i (n_0 + N_{CM}^i) m_i - \gamma_n^i (M_i - m_{0i} - m_i) n] + g(t), \\ \frac{dm_i}{dt} &= -m_i [\gamma_p^i (p_0 + P_{VM}^i) + \gamma_n^i (n_0 + n + N_{CM}^i)] + \gamma_n^i (M_i - m_{0i}) n - \gamma_p^i (m_{0i} - m_i) p, \\ p &= n + \sum_{i=1}^4 m_{0i}, \end{aligned} \quad (13)$$

$$n(0) = 0, \quad p(0) = 0, \quad m_{0i}(0) = 0. \quad (14)$$

Lazerio impulsas aprašomas Gauso funkcija:

$$g(t) = \alpha \beta I_0 e^{-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma^2}}, \quad (15)$$

čia  $\alpha$  – absorbcijos koeficientas,  $\beta$  – kvantinis našumas,  $I_0$  – lazerio impulso srauto maksimali vertė (kvantų skaičius kvadratiname centimetre),  $t_0$  – laiko momentas, kai impulsas maksimalus,  $\sigma$  – dydis, lemiantis lazerio impulso formą (jo vertė priklauso nuo impulso trukmės  $\Delta t$ , t. y. laiko intervalo, kurio pradžioje ir gale  $I = I_0/2$ ).

Kiekvienu konkrečiu atveju lygčių sistema (13) taikoma (užrašoma) pasirinktiems lygmenims, t. y. apsisprendus dėl jų skaičiaus, energetinės padėties draudžiamosioje zonoje  $E_p$ , koncentracijų  $M_i$ . Jei žinomas puslaidininkinio bandinio laidumas esant skirtingai temperatūrai (bandinys dar neapšviečiamas), galima „suderinti“ pradinis duomenis. Elektronų srautų per lygmenis pusiausvyrą (rekombinaciją ir terminę generaciją) termodinaminės pusiausvyros sąlygomis aprašo algebrinių lygčių sistema, t. y. užrašoma pusiausvyros kiekviename lygmenyje sąlyga:

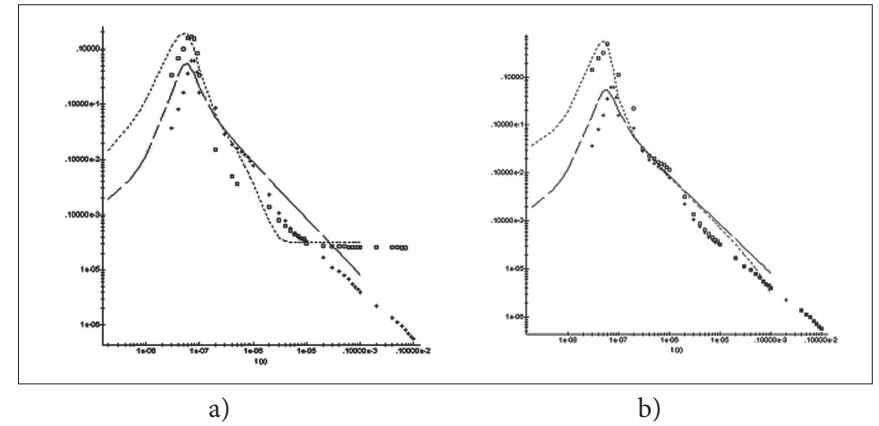
$$p_{0i} + \frac{M_{d1} N_{CM}^{1i}}{n_{0i} + N_{CM}^{1i}} + \frac{M_{d2} N_{CM}^{2i}}{n_{0i} + N_{CM}^{2i}} = n_{0i} + \frac{M_{a1} P_{VM}^{1i}}{p_{0i} + P_{VM}^{1i}} + \frac{M_{a2} P_{VM}^{2i}}{p_{0i} + P_{VM}^{2i}}. \quad (16)$$

Šiuo atveju skaičiavimuose bus įvertinti keturių lygmenų parametrai: dviejų akceptorinių  $M_{ai}$  ir dviejų donorinių  $M_{di}$ . Tada sprendžiama keturių netiesinių algebrinių lygčių sistema, jau žinant elektronų  $n_{0i}$  ir skylių  $p_{0i}$  koncentraciją esant nurodytai temperatūrai.

Kaip jau minėjome, išsprendę netiesinių diferencialinių lygčių sistemą (13) pradinėmis sąlygomis (14), nustatome, kaip keičiasi elektronų ir skylių koncentracija apšvietus puslaidininkinį bandinį lazerio impulsu. Eksperimentiškai matuojamas bandinio laidumas ( $\sigma$ ):

$$\sigma = e(n_0 + n)\mu_n + e(p_0 + p)\mu_p, \quad (17)$$

čia  $e$  – elektrono krūvis,  $\mu_n$ ,  $\mu_p$  – elektronų ir skylių judrumas. Bandinio laidumo kitimas pašvietus nanosekundiniu impulsu ir atitinkamų skaičiavimų rezultatai pateikti 9 pav.



**9 pav.** Laidumo relaksacija apšvietus nanosekundiniu lazerio impulsu: a) Eksperimentas: kubiukai –  $T = 400$  K, kryžiuikai –  $T = 300$  K, kreivės – atitinkamų skaičiavimų rezultatai. b) Eksperimentas: kubiukai –  $I_0 = 4 \cdot 10^{24}$  kvantu/cm<sup>2</sup>, kryžiuikai –  $I_0 = 4 \cdot 10^{23}$  kvantu/cm<sup>2</sup>, kreivės – skaičiavimai.

Skaičiavimų ir eksperimentų rezultatai kokybiškai sutampa, bet yra ir skirtumų. Apskaičiuotos kreivės maksimumas pagal laiką visada sutampa su lazerio impulso maksimumu, o eksperimento rezultatai skiriasi. Skiriasi kitimas ir kreivės pabaigoje, t. y. kai didesnis laiko diapazonas.

Atliekant skaičiavimus naudoti giliųjų lygmenų parametrai nurodyti 1 lentelėje  
( $T = 300$  K).

1 lentelė

$M_i$	$E_i$	$\gamma_{ni}$	$\gamma_{pi}$
$2,52 \cdot 10^{16}$	0,2	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$
$1,00 \cdot 10^{14}$	0,4	$1 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-9}$
$5,30 \cdot 10^{16}$	0,78	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-11}$
$2,52 \cdot 10^{16}$	1,2	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$

Buvo sprendžiamas matematiškai nekorektiškas uždavinys. Žinant atsakymą, t. y., turint eksperimentinius bandinio laidumo ir laidumo relaksacijos apšvietus lazerio impulsu rezultatus ir derinant juos su atitinkamų skaičiavimų rezultatais, rasti arba patikslinti puslaidininkio lygmenų sistemos parametrai. Rezultatų patikimumas pakankamas, nes rezultatai gauti esant skirtingai temperatūrai, įvairiam lazerio impulso intensyvumui. Įsitikinus modelio adekvatumu, jau galima modeliuoti norimas situacijas ir keisti sudėtingus ir brangiai kainuojančius eksperimentus.

Netiesinių diferencialinių lygčių sistema (13) pradinėmis sąlygomis (14) buvo sprendžiama parinkus aštuonis parametrus  $\gamma_{ni}, \gamma_{pi}$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ), jei nagrinėjame keturių lygmenų įtaką bandinio laidumui. Pagal realius ieškomus parametrus  $\gamma_{ni}, \gamma_{pi}$  reikšmių sistemos tikrinės vertės yra labai išsklaidytos, t. y. sistemą reikia spręsti tiksliau, naudojant standžiųjų sistemų sprendimo metodus. Lygčių sistema buvo sprendžiama Giro metodu keičiant žingsnį, nes uždavinį reikia spręsti plačiame laiko diapazone ( $10^{-9} - 10^{-4} s$ ), o gaunami rezultatai, t. y. elektronų ir skylių koncentracija, skirtingais laiko intervalais keičiasi labai skirtingu spartumu.

## 2.5. Šotkio diodų srovės mechanizmų barjere modeliavimas ir prietaisų tobulinimas [4, 20, 21, 23]

Šotkio diodai gaminami formuojant metalinį kontaktą ant puslaidininkinio sluoksnio paviršiaus. Formuojant kontaktą atliekama daug technologinių operacijų: paviršiaus cheminis valymas, metalo užgarinimas, apsauginių sluoksnių formavimas ir t. t. Jų metu susidaro sudėtingas pereinamasis sluoksnis, kurį sudaro skirtingos koncentracijos priemaišos, o dėl puslaidininkio ir metalo elektronų išlaisvinimo darbų skirtumo susiformuoja potencialinis barjeras. Atsitiktinai patekę ar specialiai įterpti kitos rūšies atomai sukuria puslaidininkio draudžiamųjų energijų juostoje donorinius arba akceptorinius priemaišinius lygmenis. Šie lygmenys lemia prietaiso elektroop-

tines savybes: srovės dydį, esant pridėtai išorinei įtampai, jautrumą šviesos poveikiui, temperatūrai.

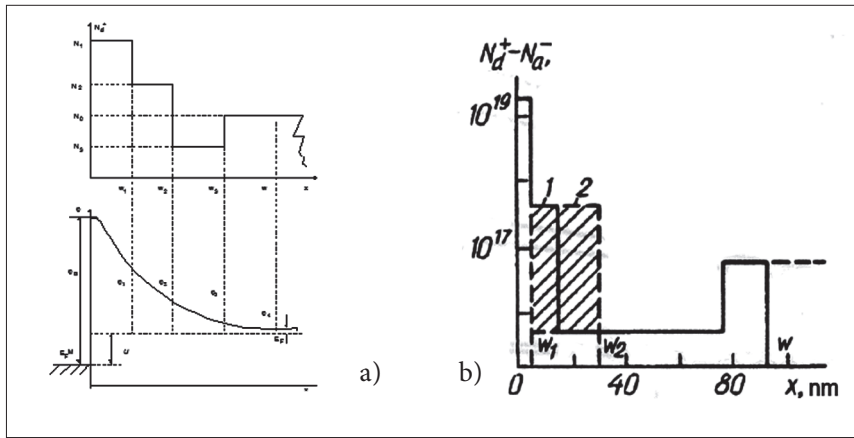
Elektrinio potencialo pasiskirstymas puslaidininkiniuose sluoksniuose lemia prietaiso voltamperinę charakteristiką (*VACH*) tiesiogine ir užtvėriamąja kryptimis, jo elektrinę talpą, kuri riboja prietaiso galimybes esant aukštiesiems dažniams. Jei kiekvieno puslaidininkinio prietaiso skerspjūvio parametrai nesikeičia, potencialo kitimą tūryje aprašo vienmatė Puasono lygtis:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{e}{2\epsilon\epsilon_0} (p - n - \sum_{i=1}^n m_i), \quad (18)$$

čia  $n, m_i$  – nepusiausvyrinųjų elektronų koncentracija laidumo zonoje ir priemaišiniuose lygmenyse,  $p$  – skylių koncentracija valentinėje zonoje,  $\epsilon, \epsilon_0$  – vakumo ir puslaidininkinės medžiagos dielektrinės konstantos,  $E$  – elektrinio lauko stipris.

Kai aktyviųjų donorų koncentracijos pasiskirstymą puslaidininkinėje medžiagoje galima pavaizduoti stačiakampiais laiptais (žr. 10 pav.), potencialo kaitos eiga gali būti užrašoma taip:

$$\begin{aligned} \varphi_1(x) &= \frac{\epsilon}{2\epsilon\epsilon_0} [(N_1 - N_2)(\omega_1 - x)^2 + (N_2 - N_3)(\omega_2 - x)^2 + (N_3 - N_0)(\omega_3 - x)^2 + N_0(\omega - x)^2], & \text{kai } 0 \leq x \leq \omega_1 \\ \varphi_2(x) &= \frac{\epsilon}{2\epsilon\epsilon_0} [(N_2 - N_3)(\omega_2 - x)^2 + (N_3 - N_0)(\omega_3 - x)^2 + N_0(\omega - x)^2], & \text{kai } \omega_1 \leq x \leq \omega_2 \\ \varphi_3(x) &= \frac{\epsilon}{2\epsilon\epsilon_0} [(N_3 - N_0)(\omega_3 - x)^2 + N_0(\omega - x)^2], & \text{kai } \omega_2 \leq x \leq \omega_3 \\ \varphi_4(x) &= \frac{\epsilon}{2\epsilon\epsilon_0} N_0(\omega - x)^2, & \text{kai } x \geq \omega_3 \end{aligned} \quad (19)$$



**10 pav.** a) Potencinis metalo ir puslaidininkio barjeras, kai skirtingai legiruotos priemaišomis puslaidininkio sritys.  $N_1, N_2, N_3, N_0$  – donorų koncentracija,  $E_F^M$  – Fermi lygis metalo,  $E_F$  – Fermi lygis puslaidininkyje,  $\phi_B$  – metalo ir puslaidininkio potencialinio barjero aukštis,  $U$  – išorinė įtampa,  $w_1, w_2, w_3, w$  –  $x$  reikšmės, kurioms esant šuoliu keičiasi donorų koncentracija. b) Modelinis darinio, įskaitančio giliųjų centrų persielektrinimą priekontaktyje: 1 – be persielektrinimo; 2 – su persielektrinimu (užbrūkšniuota sritis).

Naudojantis šiomis formulėmis nuo vieno intervalo prie kito pereinama sulyginus perėjimo taškuose elektrinio potencialo ir jo išvestinių reikšmes. Reikėtų pažymėti, kad formulė kokybiškai nesikeičia didinant nagrinėjamų intervalų skaičių. Lygčių sistemos (19) sprendinys buvo atspėtas. Jis gerai aproksimuoja elektrinio potencialo kaitą, o išraiška išėjo gana nesudėtinga. Praktiškai tokį priemaišų pasiskirstymą galima nustatyti molekulinės epiktaksijos metodu. Tunelinės srovės, tekančios per prietaisą, dedamoji užrašoma formule:

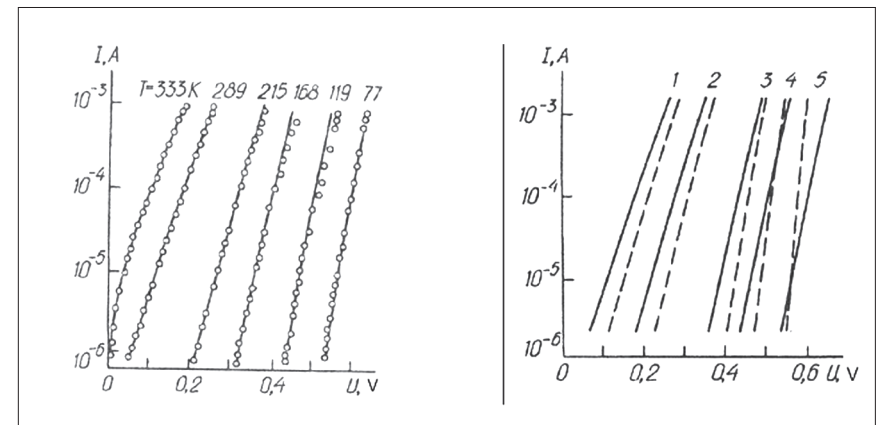
$$I = \frac{en_0 v_t S}{4kT} \int_0^\infty D(E_x) f(E_x) dE_x, \quad (20)$$

čia  $v_t$  – elektronų šiluminis greitis,  $S$  – kontakto skerspjūvio plotas,  $k$  – Bolcmano konstanta,  $T$  – temperatūra Kelvino skalėje,  $f(E_x)$  – Fermio pasiskirstymo funkcija,  $D(E_x)$  – elektrono tuneliavimo tikimybė, kuri VKB priartėjimo atveju užrašoma formule:

$$D(E_x) = \exp\left(-2 \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{\frac{2m^*}{\hbar^2} |E_x - \varphi(x)|} dx\right), \quad (21)$$

čia  $\hbar$  – Planko konstanta,  $m^*$  – elektrono efektyvi masė, t. y. jo masė, tinkanti aprašant jo judėjimą puslaidininkio laidumo zonoje,  $E_x$  – elektrono energija taške,  $x$ ,  $x_1$ ,  $x_2$  – taškai, kuriuose tuneliuojančio elektrono energija sutampa su potencialinio barjero energija.

Paprastai skaičiavimų ir eksperimentų rezultatai lyginami plačiame temperatūrų intervale. Tuo atveju, kai rezultatai sutampa, galima patikimai įvertinti puslaidininkinio prietaiso parametrus: priemaišų koncentraciją ir jų pasiskirstymą potencialinio barjero srityje. VACH matavimų ir skaičiavimų rezultatai parodyti 11 a) pav. Matome, kad srovės kitimą nuo įtamos pagal logaritminį mastelį nusako tiesės, kurių pokrypio kampas nepriklauso nuo temperatūros. Tai rodo, kad vyrauja tunelinės srovės dedamoji, nes vyraujant difuzinei dedamajai šis kampas turi kisti. Tokios VACH skaičiuojant gaunamos tik tada, kai įskaitomas netolygus priemaišų pasiskirstymas ir giliųjų lygmenų persielektrinimas barjero srityje (žr. 10 b) pav. ir 11 b) pav.).



**11 pav.** a) Šotkio diodo eksperimentinių (taškai) ir teorinių (ištinės kreivės) rezultatų palyginimas, esant įvairiai temperatūrai. b) Voltamperinės charakteristikos, esant įvairiai temperatūrai ( $T$ , K): 1-294; 2-238, 3-152, 4-118, 5-77 (persielektrinus – ištinės, neperielektrinus – punktyrinės linijos).

Molekulinės epitaksijos metodu galima jautriai keisti puslaidininkinių sluoksnių storį ir priemaišų kiekį ar cheminę sudėtį. Naudojant modeliavimo galimybes galima sumažinti brangiai kainuojančių eksperimentų skaičių, parinkant sluoksnių savybes, skaičių, sukonstruoti norimų parametrų prietaisą. Pateikti modeliavimo rezultatai leidžia nustatyti, kaip pasiskirsto aktyvieji centrai kontakto srityje, ir kitus Šotkio diodo parametrus, kuriuos rasti kitais būdais, kai yra metalo ir puslaidininkio sąlytis, praktiškai neįmanoma.

### 3. APIBENDRINAMOSIOS IŠVADOS

3.1. *Sukurta programų sistema, leidžianti imituoti ir aprašyti pėstininkų kovos veiksmus konkrečioje vietovėje:*

1) Sudaryta galimybė pasinaudoti GIS bazėmis ir atlikti vietovės inžinerinę žvalgybą.

2) Sukurtos imitacinės programos, kurias naudojant galima įvertinti pataikymo tikimybę, kai kariai juda kovos lauke.

3) Sukurtos programos, leidžiančios pasirinkti įvairius kovos taktikos variantus, prognozuoti galimus mūšio rezultatus.

4) Sudarytos galimybės žvalgybos ir galimų mūšio baigmių rezultatus atvaizduoti (matyti) skaitmeniniame žemėlapyje.

3.2. *Sukurta programų sistema, leidžianti modeliuoti grupinio taikinio kovimą naudojant minosvaidžius:*

1) Sukurta metodika, leidžianti aprašyti minos judėjimą veikiant aplinkos pasipriešinimo jėgai.

2) Skaičiavimuose įvertinami ir minimizuojami išorės veiksnių (vėjo, temperatūros ir atmosferos drėgmės) įtaka šaudymo rezultatams.

3) Sukurtos programos, leidžiančios optimizuoti grupinio taikinio naikinimo eigą.

4) Sudarytos galimybės panaudoti skaitmeninį žemėlapi taikinių vietoms nustatyti ir šaudymo rezultatams atvaizduoti.

3.3. *Atliktas skrendančių objektų stebėjimo sistemos modeliavimas:*

1) Sukurta programa, leidžianti įvertinti skrendančio objekto aptikimo tikimybę.

2) Pateikta programa radarų sistemos darbui įvertinti.

3) Sudaryta galimybė atvaizduoti skaičiavimų rezultatus.

3.4. *Sukurtos programos, leidžiančios modeliuoti GaAs sluoksnių fotolaidumo savybes:*

1) Sukurtos programos, aprašančios GaAs sluoksnių fotolaidumo kinetiką plačiame laiko ir temperatūros intervale.

2) Palyginti eksperimentų ir skaičiavimų rezultatai, nustatyti ir patikslinti GaAs sluoksnių fotolaidumą lemiančių giliųjų lygmenų parametrai.

3.5. *Sukurtos programos, leidžiančios modeliuoti metalo kontakto, sudaryto ant įvairiai paruošto GaAs paviršiaus, savybes ir voltamperinių bei voltfaradinių charakteristikų ypatumus.*

1) Sukurtos programos, leidžiančios nustatyti GaAs Šotkio diodų voltamperines ir voltfaradines charakteristikas, kai aktyvieji centrai sudėtingai pasiskirsto priekontaktyje.

2) Įvertinti krūvininkų lėkio per barjerą GaAs Šotkio dioduose mechanizmai.

3) Pateiktas Šotkio diodų aktyviųjų centrų pasiskirstymo priekontaktyje variantas.

## 4. DARBŲ AKTUALUMAS, MOKSLINĖ IR PRAKTINĖ REIKŠMĖ, AUTORIAUS INDĖLIS

### 4.1. Darbų aktualumas, mokslinė ir praktinė reikšmė

KAM užsakymu buvo atlikti mokslo tiriamieji darbai karine tematika ir darbai, kuriuose buvo sprendžiamos puslaidininkinių medžiagų ir prietaisų

technologinės problemos:

1. Tema „Artilerijos karininko kompiuterinės darbo vietos sukūrimas“. Darbas pradėtas 2002 m., baigtas – 2004 m.

2. Tema „Motorizuotųjų šaulių karininko kompiuterinės darbo vietos sukūrimas“. Darbas pradėtas 2002 m., baigtas – 2011 m.

3. Tema „Matematinio modeliavimo taikymas optimizuojant nanostruktūrinių prietaisų ir medžiagų parametrus“. Darbas pradėtas 2004 m., baigtas – 2008 m.

Ankstesni darbai, sprendžiant puslaidininkinių prietaisų technologines problemas, buvo panaudoti Vilniaus universiteto Puslaidininkinių katedros ir Radiofizikos katedros atliekamuose mokslo darbuose, kuriuos užsakė Kauno radijo matavimo technikos institutas.

Rengiamos karininko kompiuterinės darbo vietos, kuriose veikia ir nuolat tobulinami uždavinių sprendimo algoritmai ir programos. Tokios darbo vietos praverčia tiek sudarant gynybos planus, tiek rengiant būsimo karininkus. Tai dalis informacinės sistemos, kuri padėtų padalinio vadui planuoti būsimo ataką. Pasiūlyti stochastiniai modeliai įgalina atlikti būsimo puolimo „skaitmeninį eksperimentą“, įvertinti dalinio kovines galimybes konkrečioje vietovėje ir leidžia numatyti būdus, kurie sumažintų nuostolius vykdant kovinę užduotį. Naudojantis geografinių informacinių sistemų (GIS) informacinėmis bazėmis ir Arc GIS komercinio programinio paketo galimybėmis sukurta „programinių įrankių“ sistema leidžia atlikti inžinerinį vietovės įvertinimą, gauti kelių tinklo, vandens telkinių, augalijos, statinių, dirvožemio savybių duomenis. Panaudojus modernias žinių sąsają (*glyph*) technologijas, vadui suteikta galimybė gautus rezultatus matyti skaitmeniniame žemėlapyje. Programos, taikančios stochastinius modelius, leidžia daug kartų pakartoti modeliuojamą įvykį neesmingai keičiant pradinės sąlygas. Jei parinkti uždavinio parametrai artimi tikrovei, gautų rezultatų vidurkis atitinka eksperimento metu stebimas (matuojamas) vidutines įvairių dydžių reikšmes. Pavyzdžiui, galima nustatyti pataikymo tikimybės priklausomybę nuo kario judėjimo taktikos kovos lauke. Reikėtų pabrėžti, kad taktikos įtaka didėja mažėjant atstumui tarp kovojančių pusių (tai aktualu kovos mieste sąlygomis).

Visais minėtais atvejais modeliavimas leidžia pakartotinai imituoti eksperimentą, nedaug keičiant sąlygas (ko dažniausiai poligone iš viso neįmanoma padaryti), numatyti tikimiausią jo baigtį.

Karybos procesų imitaciniai modeliai daugeliu atvejų nėra skelbiami mokslo žurnaluose, atitinkamos ataskaitos turi atitikti slaptumo reikalavimus. Jų taikymo realiomis sąlygomis ir konkrečiai ginkluotei paprastai neskelbiami, todėl rezultatus lyginti darosi komplikuoja.

Puslaidininkinių medžiagų ir prietaisų modeliavimas leidžia išvengti brangių eksperimentų ar sumažina jų skaičių.

## 4.2. Autoriaus indėlis

4.2.1. Pasiūlytas karių judėjimo kovos lauke modelis, susietas su „matomumo“ matrica, t. y. judama statmenai fronto linijos išlaikant tarp karių 8–10 metrų atstumą 6–8 metrų perbėgimais. Tai leido *panaudoti GIS duomenų bazių informaciją aprašant mūsų ir atvaizduoti rezultatus žemėlapyje*.

4.2.2. Pasiūlyta rasti ryšį tarp aplinkos pasipriešinimo koeficiento ir taikinio nuotolio aprašant minos judėjimą. Tai leido gauti *analizinį sprendinį, patenkinamai aprašantį minos judėjimą ir leidžiantį skaičiuoti galimas paklaidas*.

4.2.3. Pasiūlyti uždavinio taikymo variantai *pataikymo į judantį karį ir skrendančio objekto aptikimo* tikimybei įvertinti.

4.2.4. Panaudoti stochastiniai modeliai aprašant pėstininkų kovas realioje vietovėje ir vertinant grupinio taikinio sunaikinimo galimybes.

4.2.5. Modeliuojant šotkio diodų srovės mechanizmus buvo pasiūlyta taikyti gilaus lygmens persielektrinimą. Atkreiptas dėmesys į laiptinį priemaišų pasiskirstymo pobūdį priekontaktyje, kuris leido tiksliai apibrėžti realią padėtį ir supaprastino matematinės problemas.

Visais atvejais buvo sprendžiamas nekorektiškas matematinio požiūriu uždavinys, t. y. žinant atsakymą, nustatomos pradinės sąlygos. Netiesinių diferencialinių lygčių sistema, aprašanti puslaidininkinio sluoksnio fotolaidumą, buvo sprendžiama atliekant tikslesnius skaičiavimus. Realių ieškomų gi-



liųjų lygmenų parametrų reikšmių sistemos tikrinės vertės yra labai išsklaidytos, t. y. sistemą reikia spręsti naudojant standžiųjų sistemų sprendimo metodus. Lygčių sistema buvo sprendžiama Giro metodu keičiant žingsnį, nes uždavinį reikėjo spręsti nurodant platų laiko diapazoną ( $10^{-9} - 10^{-4}$  s), o gaunami rezultatai (elektronų ir skylių koncentracijos) skirtingais laiko intervalais keičiasi labai skirtinga sparta.

## Ekspertinio patikrinimo procedūrai atlikti teikiamų mokslo darbų ir vadovėlių sąrašas

### I. Straipsniai leidiniuose, įrašytuose į ISI ir ISI Proceedings duomenų bazę

1. A. Pincevičius, M. Meilūnas, N. Tumanova. Numerical simulation of the conductivity relaxation in the high resistivity semiconductor, *Mathematical modeling and analysis*, V.12, No 3, 2007, p. 379–388. ISSN 1392-6292 print, ISSN 1648-1310 online.

2. A. Pincevičius, V. Kleiza. Detection of flying objects and radar system modeling, *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Workshop on Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics System ITELMS'2008*, p. 83–87.

3. A. Pincevičius, R. Baušys, S. Bekešienė, V. Kleiza. Modelling of infantry attacks on real terrain, *Nonlinear Analysis: Modeling and Control*, 2008, V. 13, No. 4, p. 491–501. ISSN 1392–5113.

4. J. Matukas, V. Palenskis, J. Vyšniauskas, B. Šaulys, S. Pralgauskaitė, A. Pincevičius. Noise characteristics and reliability of high power white light emitting diodes based on nitrides, *Proc of SPIE*, 2008 vol. 7142, p. 7142OH1-6.

5. S. Bekešienė, R. Baušys, V. Kleiza, A. Pincevičius. The Effective Use of the Intelligent Technologies in Planning Infantry Attacks, *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Workshop on Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics System ITELMS'2009*, p. 169-173. ISBN 978-9955-25-705-9.

6. S. Bekešienė, R. Baušys, V. Kleiza, A. Pincevičius. The Intelligent Technologies Application for Artillery control, *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Workshop on Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics System*

*ITELMS'2009*, p. 164-168. ISBN 978-9955-25-705-9.

7. A. Pincevičius, V. Jonevičius, R. Baušys. The Use Informational Technologies for the Planning of Military Operations, *Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Conference. Transport Means*. 2010, p. 108-112. ISSN 182-296 X.

### II. Straipsniai leidiniuose, įrašytuose į kitas tarptautines bazes (Compendex, INSPEC, SCOPUS, EBSCO) arba recenzuojamuose žurnaluose ir mokslo leidiniuose

8. A. Pincevičius, V. Jonevičius. Peculiarities of Mortar Fire Management, *Proceedings of 17<sup>th</sup> International Conference. Transport Means*. 2013, p.p. 312–316.

9. A. Pincevičius, V. Jonevičius. Simulation Models in Military, *Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Conference. Transport Means*. p.p. 281–285, (2012).

10. A. Pincevičius, V. Jonevičius, R. Baušys. Eksternal Ballistics Task Modelling Features, *AVIATION*, 15 (04), p.p. 112–116, (2011).

11. A. Pincevičius, Intelektualiųjų technologijų taikymai modeliuojant karybos uždavinius, *Lietuvos matematikų rinkinys, LMD darbai*, 52, p.p. 1–6, (2011). ISSN 0132-2818.

12. A. Pincevičius, R. Baušys, P. Jankauskas. The simulation of an infantry attack using geographical information systems, *AVIATION*, Vol X, No 3, 2006, p. 30-36. ISSN 1648-7788 print, ISSN 1822-4180 online.

13. A. Pincevičius, R. Baušys, P. Jankauskas. Application of geographical information systems in modeling of military operations, *AVIATION*, Vol IX, No 3, 2005, p. 36–42. ISSN 1648–7788.

14. A. Pincevičius, A. Vyšniauskas, P. Jankauskas. Modelling of the detection system of flying objects, *AVIATION*, Vol VIII, No 2, 2004, p. 25-29. ISSN 1648–7788.

15. A. Pincevičius, R. J. Rakauskas. Skraidančio objekto geografinės padėties nustatymo radiolokacijos priemonėmis optimizavimas, *AVIATION*, No 6, 2002, 74-78. ISSN 1392-6276.

16. A. Pincevičius, R. J. Rakauskas, G. Misevičius, S. Vošterienė. The mat-

hematical modeling of counter-attack, *Liet. matem. rink.*, 2001, T 41, spec.nr, p. 542–547. ISSN 0132-2818.

17. A. Pincevičius, R.-J. Rakauskas, G. Misevičius. The numerical simulation in ballistics, *Nonlinear Analysis: Modelling and Control*, 2001, v. 6, No 1, p. 89–104. ISSN 1392-5113.

18. A. Pincevičius, R. J. Rakauskas, G. Misevičius. Karinių operacijų matematinis modeliavimas, *Liet. matem. rink.*, 2000, T 40, spec.nr., p. 423–429. ISSN 0132-2818.

19. G. Misevičius, V. Pakalnūtė A. Pincevičius, R. Eidukevičius, R. J. Rakauskas. Mathematical modeling of military operations, *Nonlinear Analysis Modeling and Control*, 1998, No 2, p. 81–88. ISSN 1392-5113.

20. A. Pincevičius, L. Papirytė, T. Pėstininkas, J. Matukas. Влияние распределения эффективной примеси в приконтактной области на вольтамперные характеристики арсенидгаллиевых диодов Шоттки, *Lietuvos fizikos rinkinys*, 1988, T. XXVIII, nr. 6, p. 737–743. ISSN 1392-1932.

21. J. Vaitkus, J. Storasta, A. Pincevičius, M. Petrauskas, V. Kažukauskas. Определение параметров глубоких примесных центров в полуизолирующем Ga As по релаксации фотопроводимости при лазерном возбуждении, *Lietuvos fizikos rinkinys*, 1988, T. XXVIII, nr. 6, p. 744–751. ISSN 1392-1932.

22. A. Pincevičius, A. Sakalas. Влияние собственной и примесной подсветок на вольтамперные характеристики S-диода с короткой базой, *Lietuvos fizikos rinkinys*, 1986, T. XXVI, nr. 5, p. 627–632. ISSN 1392-1932.

23. J. Matukas, V. Palenskis, A. Pincevičius, G. Petrauskas, S. Smetona, S. Žukauskas. Исследование зависимости ВАХ и шумовых свойств диодов Шоттки от условий бомбардировки поверхности арсенида галлия ионами аргона. *Lietuvos fizikos rinkinys*, T. XXVI, nr. 5, 1986, p. 618-626. ISSN 1392-1932.

### Vadovėlis\* ir mokomosios knygos skirtos aukštosioms mokykloms

1. A. Pincevičius, G. Misevičius, R. Eidukevičius, R. J. Rakauskas. Matematika. Intensyvaus mokymo su kompiuteriu kursas. I dalis. Vilnius, Lietuvos karo akademija, Vilnius: „Karmino“ spaustuvė, 1997, 187 p.

2. A. Pincevičius, G. Misevičius, R. Eidukevičius, R.-J. Rakauskas. Matematika. Intensyvaus mokymo su kompiuteriu kursas. II dalis. Lietuvos karo akademija, Vilnius: „Karmino“ spaustuvė, 1997, 267 p.

3. \* G. Misevičius, A. Pincevičius, R. Eidukevičius, R. J. Rakauskas. Aukštoji matematika. Vadovėlis ir pratybos su kompiuteriu. Vilnius: TEV, 1999, 469 p.

4. A. Pincevičius, A. Domarkas, V. Pakėnienė. Matematikos taikomieji darbai\*. Generolo Jono Žemaičio Lietuvos karo akademija, Vilnius: AB „Punktukas“, 2007, 175 p.

5. A. Pincevičius, R. Baušys, S. Bekešienė. Intelektualiųjų technologijų taikymai karyboje. Generolo Jono Žemaičio Lietuvos karo akademija, Vilnius, 2012, 135 p.

