

ՀՀ ԳԱԱ ԻՆՖՈՐՄԱՏԻԿԱՅԻ ԵՎ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՄԱՆ ՊՐՈԲԼԵՄՆԵՐԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ

Նախնական Նարեկ Լևոնի

**ՄԱՌԱԽԵԼԱՊԱՏ ՀԱՇՎԱՐԿԱՅԻՆ ՄԻՋԱՎԱՅՐԻ ԿԱԶՄԱԿԵՐՊՈՄԱՆ ՄԵԹՈԴՆԵՐԻ ԵՎ
ՄԻՋՈՑՆԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄ**

Ե.13.04 – «Հաշվողական մեքենաների, համալիրների, համակարգերի և ցանցերի
մաթեմատիկական և ծրագրային ապահովում» մասնագիտությամբ տեխնիկական
գիտությունների թեկնածուի
գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

Ս Ե Ղ Մ Ա Գ Ի Դ

Երևան – 2026

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ИНФОРМАТИКИ И АВТОМАТИЗАЦИИ НАН РА

Налтакян Нарек Левонович

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ОРГАНИЗАЦИИ ТУМАННОЙ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
05.13.04 «Математическое и программное обеспечение
вычислительных машин, комплексов, систем и сетей»

Ереван – 2026

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանում:

Գիտական ղեկավար՝	տեխ.գիտ.թեկնածու, պրոֆ.	Գ.Բ. Մարգարով
Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝	տեխ.գիտ.դոկտոր	Ս.Ս. Մարգարյան
	տեխ.գիտ.թեկնածու	Լ.Լ. Հարությունյան
Առաջատար կազմակերպություն՝	Երևանի կապի միջոցների գիտահետազոտական ինստիտուտ	

Պաշտպանությունը կայանալու է 2026թ. հունիսի 2-ին, ժ. 14:00-ին ՀՀ ԳԱԱ Ինֆորմատիկայի և ավտոմատացման պրոբլեմների ինստիտուտում գործող 037 «Ինֆորմատիկա» մասնագիտական խորհրդի նիստում, հետևյալ հասցեով՝ Երևան, 0014, Պ. Սևակի 1:

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀՀ ԳԱԱ ԻԱՊԻ գրադարանում:
Սեղմագիրը առաքված է 2026թ. ապրիլի 30-ին:

037 Մասնագիտական
խորհրդի
գիտական քարտուղար



Ս.Ե.Հարությունյան

Тема диссертации утверждена в Национальном политехническом университете Армении.

Научный руководитель:	кандидат тех. наук, проф.	Г.И. Маргаров
Официальные оппоненты:	доктор тех. наук	С.С. Саргсян
	кандидат тех. наук	Л.Л. Арутюнян
Ведущая организация:	Ереванский научно-исследовательский институт связи	

Защита состоится 2-ого июня 2026г. в 14:00 на заседании специализированного совета 037 «Информатика» Института проблем информатики и автоматизации НАН РА по адресу: 0014, г. Ереван, ул. П. Севака 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПИА НАН РА.
Автореферат разослан 30-ого апреля 2026г.

Ученый секретарь,
Специализированного совета 037
доктор физ.-мат.наук, профессор.



М.Е.Арутюнян

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ԲՆՈՒԹԱԳԻՐԸ

Աշխատանքի արդիականությունը: Ներկայումս ինելացի սարքերը դառնում են մեր կյանքի անբաժան մասը: Ըստ «IoT Analytics» վերլուծական կազմակերպության՝ կանխատեսվում է, որ մինչև 2030 թվականը իրերի համացանցի սարքերի քանակը կգերազանցի 39 միլիարդը: Այս սարքերը ստեղծում են տվյալների հսկայական հոսքեր, որոնք պետք է մշակվեն սարքերի անմիջական հարևանությամբ: Ավանդական ամպային համակարգերը հաճախ չեն կարողանում ապահովել անհրաժեշտ արագությունը: Որպես լուծում առաջարկվում են «մառախլապատ հաշվարկները», որոնք հնարավորություն են տալիս տվյալները մշակել իրերի համացանցի սարքերի հարևանությամբ՝ ապահովելով արագ արձագանք:

Ներկայումս լայն տարածում գտած դասական ճարտարապետական մոդելները հիմնականում բաղկացած են սարք-մառախուղ-ամպ շերտերից: Նման դեպքերում հաճախ կառավարումը իրականացվում է մեկ կենտրոնական հանգույցից, որի խափանումը կարող է կանգնեցնել ողջ համակարգի աշխատանքը:

Որոշ հետազոտական աշխատանքներում նշվում է մառախլապատ միջավայրը կազմող տարբեր սարքերի խմբերի միջև համագործակցության անհրաժեշտությունը, սակայն բացակայում են դրանց իրականացման հստակ մեխանիզմները: Շատ համակարգեր օգտագործում են աշխատանքի բաշխման անփոփոխ (ստատիկ) մեթոդներ, որոնք ունակ չեն հարմարվելու փոփոխվող միջավայրին:

Բացի վերոնշյալից, առանձին աշխատանքներում դիտարկվում է, որ յուրաքանչյուր պասարկող հանգույց ունի իր հստակ և անփոփոխ սահմանները: Այս մոտեցումը խնդիրներ է առաջացնում՝ կապված սարքերի խտության փոփոխությունների հետ, որի արդյունքում որոշ հատվածներում դիտվում է ծանրաբեռնվածության աճ, իսկ մյուսներում՝ դրա նվազում, ինչը թույլ չի տալիս արդյունավետորեն բաշխել աշխատանքը և օպտիմալացնել ռեսուրսները: Այսպիսով, մառախլապատ հաշվարկային միջավայրի կազմակերպման մեթոդների և միջոցների մշակման խնդիրն արդիական է թե՛ գիտական հետաքրքրություն ներկայացնող խնդիրների լուծման, և թե՛ կիրառական նշանակություն ունեցող ապակենտրոնացված ու դինամիկ կառավարում պահանջող համակարգերի նախագծման տեսանկյունից:

Աշխատանքի նպատակն է մառախլապատ միջավայրի հաշվարկների կազմակերպման մեթոդների և միջոցների մշակումը: Աշխատանքի ընթացքում դրվել և լուծվել են հետևյալ հիմնական խնդիրները՝

- մշակել մառախլապատ հաշվարկային միջավայրի խափանումների նկատմամբ կայուն և անընդհատ գործունեությունն ապահովող մոդել, որը թույլ կտա պահպանել համակարգի աշխատունակությունը, նույնիսկ առանձին հանգույցների կամ հատվածների անսարքության պայմաններում:
- մշակել մառախլապատ հաշվարկային միջավայրում աշխատանքի բեռնվածության դինամիկ կառավարման մեթոդ, որը կապահովի հաշվողական ռեսուրսների արդյունավետ օգտագործումը և վերաբաշխումը:

- մշակել Իրերի համացանցի սարքերից դեպի ամպային միջավայր տվյալների փոխանցման մեթոդ, որը թույլ կտա նվազեցնել տվյալների կորուստը և ապահովել ռեսուրսների խնայողություն:

Գիտական արդյունքներ:

- Մշակվել է հաշվարկների կազմակերպման բազմամակարդակ ճարտարապետական մոդել, որը, ի տարբերություն գոյություն ունեցող կենտրոնական կառավարում ունեցող մոդելների, ապահովում է համակարգի կայուն գործունեությունը, նույնիսկ առանձին հատվածների խափանումների դեպքում:
- Առաջարկվել է մառախլապատ միջավայրի համար ծանրաբեռնվածության դինամիկ հավասարակշռման մեթոդ: Վերջինս, առկա ստատիկ բաշխման ալգորիթմների հետ համեմատած, ներգրավում է առավել քիչ ծանրաբեռնված հանգույցները՝ դրանով իսկ ապահովելով հաշվողական ռեսուրսների արդյունավետ օգտագործումը:
- Առաջարկվել է Իրերի համացանցի շերտում գեներացվող տվյալների ագրեգացման և դեպի ամպային միջավայր տեղափոխման մեթոդ, որը, գոյություն ունեցող մեթոդների հետ համեմատած, ապահովում է ռեսուրսների խնայողությունը և տվյալների կորստի նվազեցումը:

Աշխատանքի կիրառական նշանակությունը: Մշակված լուծումները կիրառելի են խելացի քաղաքների, արդյունաբերության և առողջապահության ենթակառուցվածքներում: Հանգույցների հարմարվողական ակտիվացման և պասիվացման մեխանիզմը զգալիորեն նվազեցնում է էներգիայի սպառումը՝ ապահովելով մինչև 41.8% խնայողություն և տնտեսական արդյունավետություն: Մշակված քառաշերտ ճարտարապետությունը և հիբրիդային հաղորդակարգերն ապահովում են տվյալների կորստի էական նվազեցում՝ ամպի հետ ուղիղ կապի համեմատ, և մասշտաբայնություն տասնյակ հազարավոր սարքերի համար:

Արդյունքների ներդրումը:

- Ստացված գիտական արդյունքների հիման վրա մշակվել և «ԴատաԱրտ.ԱՄ» ՍՊԸ-ում ներդրվել են մառախլապատ միջավայրի միջկլաստերային ռեսուրսների փոխանակման մեթոդները, որոնք հնարավորություն են տալիս բարձր բեռնվածությամբ համակարգերում կազմակերպել հաշվողական ռեսուրսների արդյունավետ փոխանակում, որի շնորհիվ ապահովվում է հաշվողական հզորությունների օպտիմալացում, հապաղումների կրճատում և ռեսուրսների առավել արդյունավետ օգտագործում:
- Ստացված գիտական արդյունքների հիման վրա մշակվել և «Դատալաբ» ՍՊԸ-ում ներդրվել է մառախլապատ հաշվարկային հանգույցների կարգավիճակի մշտադիտարկման և ծանրաբեռնվածության հավասարակշռման համակարգը, որը հնարավորություն է տալիս Իրերի համացանցի (IoT) ենթակառուցվածքներում իրականացնել տվիչներից ստացվող տեղեկատվության անխափան հավաքագրում, որի շնորհիվ

ապահովվում է տվյալների ժամանակին և արդյունավետ տեղային մշակումը:

Հրապարակումներ: Ատենախոսության հիմնական արդյունքները հրապարակված են 6 գիտական աշխատանքներում, որոնք թվարկված են սեղմագրի վերջում:

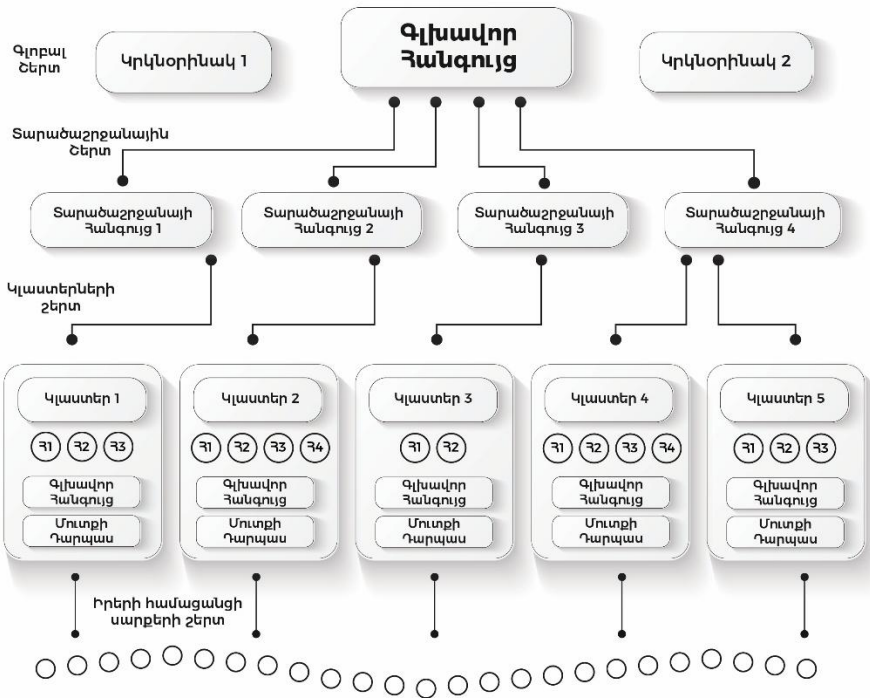
Աշխատանքի կառուցվածքը և ծավալը: Ատենախոսությունը բաղկացած է ներածությունից, չորս գլխից, եզրակացությունից, օգտագործված գրականության ցանկից և հավելվածներից: Աշխատանքի ընդհանուր ծավալը կազմում է 117 էջ:

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ներածություն: Քննարկվում է թեմայի արդիականությունը՝ հիմնվելով իրերի համացանցի (IoT) սարքերի էքսպոնենցիալ աճի վրա (մինչև 2030թ. շուրջ 39 միլիարդ սարք): Ձևակերպված են աշխատանքի նպատակները, որոնք ուղղված են ավանդական ամպային համակարգերի թերությունների (ուշացում, թողունակության սահմանափակում) հաղթահարմանը՝ մառախլապատ հաշվարկների (Fog Computing) կազմակերպման նոր մեթոդների և միջոցների մշակմամբ:

Գլուխ 1-ում իրականացվել է մառախլապատ հաշվարկային համակարգերի (Fog Computing) և առկա ճարտարապետությունների վերլուծություն և ուսումնասիրություն, ինչը ցույց է տվել, որ կենտրոնացված կառավարում ունեցող մոդելները խոցելի են «միակ խափանման կետի» (SPOF) տեսանկյունից: Հիմնավորվել է ապակենտրոնացված և բազմաշերտ մոտեցումների անհրաժեշտությունը՝ մասշտաբայնությունն ու հուսալիությունը բարձրացնելու համար:

Գլուխ 2-ում ներկայացվել է հաշվարկների կազմակերպման նոր քառաշերտ հիերարխիկ ճարտարապետական մոդել: Վերջինս բաղկացած է իրերի համացանցի կլաստերային, տարածաշրջանային և գլոբալ շերտերից (նկ. 1):



Նկ. 1. Առաջարկվող ճարտարապետական մոդելը իր չորս շերտերով

Ի տարբերություն Բոնումիի մոդելի, այստեղ շերտերն ունակ են աշխատել ինքնավար՝ ապահովելով համակարգի կենսունակությունը մասնակի խափանումների դեպքում:

Կլաստերի օպտիմալ չափի N_{opt} որոշման համար մշակվել է հետևյալ մաթեմատիկական մոդելը.

$$N_{opt} = N_{active} + N_{sleeping} + N_{infrastructure} + N_{redundancy}$$

Որտեղ ակտիվ հաշվողական հանգույցների քանակը N_{active} որոշվում է կլաստերի վրա առկա ընդհանուր բեռնվածություն L_{total} , և այդ կլաստերի արդյունարար հզորության C_{eff} հարաբերությամբ:

$$L_{total} = R * U * \alpha$$

$$C_{eff} = C_{rel} * \eta = C * \eta * (1 - P_{failure})$$

$$N_{active} = \left\lceil \frac{L_{total}}{C_{eff}} \right\rceil = \left\lceil \frac{R * U * \alpha}{C * \eta * (1 - P_{failure})} \right\rceil$$

Որտեղ՝

Աղյուսակ. 1. Հանգույցների քանակի որոշման համար անհրաժեշտ պարամետրերը

Պարամետր	Հիմնավորում
R	Հարցումների հաճախականությունը տվյալ կլաստերի վրա:
U	Միաժամանակ աշխատող սարքերի քանակը:
α	Կատարվող աշխատանքի բարդությունը:
C	Հանգույցի թողունակությունը:
η	Գերբեռնվածությունից խուսափելու գործակից:
$P_{failure}$	Ստանդարտ սարքավորումների ձախողման գործակից:

Համակարգի վիճակի մշտադիտարկման համար ներդրվել են Ռաֆթ կոնսենսուսի (Raft Consensus), Ֆի կուտակային խափանման հայտնաբերման (φ Accrual Failure Detector), Հարմարեցվող հարցման (Adaptive Polling), Դիֆերենցիալ ազդանշանի (Differential Heartbeat) մեխանիզմները:

Համակարգը գերբեռնումից ապահովագրելու համար մոդելում առկա են քնած կամ պասիվ հանգույցները $N_{sleeping}$: Դրանց քանակի հաշվարկման համար օգտագործելով «պայթյունի գործոն» B գործակիցը կստանանք.

$$N_{sleeping} = [N_{active} * (B - 1)]$$

Խափանումների հանդեպ կայունություն ապահովելու համար մոդելում օգտագործվում են պահուստային հանգույցներ՝ $N_{redundancy}$: Վերջինիս քանակը հաշվարկվում է k-out-of-n մոդելի կիրառմամբ այնպես, որ համակարգի խափանման հավանականությունը լինի փոքր սահմանված $(1-A)$ շեմից.

$$P(\text{System Failure}) = \sum_{i=n-k+1}^n \binom{n}{i} (P_{fail})^i (1 - P_{fail})^{n-i} \leq (1 - A)$$

Գլուխ 3-ում մշակվել են ռեսուրսների դինամիկ կառավարման մեթոդները: Ներդրվել է համակարգի վիճակի ինդեքսը I_{state} , որը հաշվի է առնում ինչպես տվյալ պահին առկա ֆիզիկական բեռնվածությունը $Load$, այնպես էլ դարպասային սարքի վրա արտաքին պահանջարկը $E_{cluster}$:

$$I_{state} = \sqrt{Load^2 + E_{cluster}^2}$$

Բեռնվածության $Load$ հաշվարկը ներառում է պրոցեսորի, հերթի և հիշողության ցուցանիշները.

$$Load = X * \left(\frac{CPU_{current}}{CPU_{max}} \right) + Y * \left(\frac{Queue_{current}}{Queue_{max}} \right) + Z * \left(\frac{Mem_{current}}{Mem_{max}} \right)$$

Հանգույցների հարմարվողական ակտիվացման համար կիրառվում է դինամիկ շեմը η_{act} :

$$\eta_{act} = \eta * \left(1 - \gamma * \frac{N_{sleeping}}{N_{total}} \right)$$

Ակտիվացման F_{wakeup} ֆունկցիան գործարկվում է, երբ $I_{state} \geq \eta_{act}$: Ակտիվացվող հանգույցների քանակն որոշվում է հետևյալ բանձնով.

$$N_{wakeup} = \min \left(N_{sleeping}, \left\lceil N_{active} * \left(\frac{I_{state}}{\eta_{act}} - 1 \right) \right\rceil \right)$$

Պասիվացման (քնեցման) համար $F_{sleeping}$ ֆունկցիան ստուգում է $I_{state} \leq \eta_{sleeping}$ պայմանը, և եթե սահմանված K անընդմեջ ինտերվալների ընթացքում այն ճշմարիտ է, ապա գործարկվում է պասիվացման մեխանիզմը: Պասիվացվող հանգույցների քանակը որոշվում է որպես.

$$N_{sleeping_target} = \left\lfloor N_{active} * \left(1 - \frac{I_{state}}{\eta_{sleep}} \right) \right\rfloor$$

Այս քայլերից հետո, վերջնական ակտիվ հանգույցների քանակը որոշվում է հետևյալ կերպ.

$$N_{active_new} = \max(N_{min}, N_{active} - N_{sleeping_target})$$

Տվյալների կորստի նվազեցման նպատակով առաջարկվել է հիբրիդային հաղորդակարգային մոդել (օրինակ՝ CoAP/UDP → MQTT/TCP): Իրերի համացանցի սարքերը T_{Iot} (օրինակ՝ CoAP/UDP) հաղորդակարգով տվյալներն ուղարկում են մառախլապատ կլաստերին, որն էլ ավելի հուսալի T_{Fog} (օրինակ՝ MQTT/TCP) հիմքով հաղորդակարգերով (օրինակ՝ MQTT) այն փոխանցում է ամպ: Հիբրիդային մոդելի դեպքում կորստի հավանականությունը P_{loss}^{hybrid} հաշվարկվում է որպես.

$$P_{loss}^{hybrid} = 1 - (1 - P_{loss}(T_{Iot})) * (1 - P_{loss}(T_{Fog}))$$

Օրինակ՝

$$P_{loss}^{hybrid} = 1 - (1 - P_{loss}(UDP)) * (1 - P_{loss}(TCP))$$

Կորստի ընդհանուր նվազեցումը ΔP_{loss} սահմանվում է որպես ուղիղ և հիբրիդային կապերի տարբերություն:

$$\Delta P_{loss} = P_{loss}^{direct} - P_{loss}^{hybrid}$$

Գլուխ 4-ում իրականացվել է սիմուլյացիոն փորձարարական գնահատում iFogSim2 սիմուլյատորով:

Աղյուսակ 2-ում ներկայացված է սցենար 1-ի սիմուլյացիայի արդյունքում ստացված արժեքներն, որոնք փաստում են, որ համակարգի գերբեռնվածության վիճակում հապաղումները նվազել են 67.8%-ով, կրիտիկական վիճակում՝ 45.8%-ով, իսկ բարձր բեռնվածության վիճակում՝ 20.2%-ով: Սակայն համակարգի վիճակի նորմալ պայմաններում Բոնոմիի մոդելը ցույց է տալիս 3,0%-ով ավելի նվազ ուշացումներ, ինչը տրամաբանական է քանի որ առաջարկվող ճարտարապետական մոդելը կատարում է հավելյալ հաշվարկներ խափանումների հանդեպ կայունություն ապահովելու համար:

Աղյուսակ 2. Միջին հապաղումների համեմատական վերլուծությունը թեժ կետերի պայմաններում

Վիճակ	Բեռնվածություն	Բոնոմիի Մոդել (Միջին հապաղում)	Առաջարկվող Մոդել (Միջին հապաղում)	Հապաղման նվազեցում
Նորմալ	~40%	42.5մվ	43.8	-3.0%
Բարձր	~75%	78.2մվ	62.4	~20.2%
Կրիտիկական	~90%	165.5մվ	89.6	~45.8%
Գերբեռնված	110%	420.0մվ	135.2	~67.8%

Ստորև՝ աղյուսակ 3-ում ներկայացվում է սցենար 2-ի սիմուլյացիայի արդյունքում ստացված էներգախնայողության տոկոսային արժեքն առաջարկվող ճարտարապետական մոդելի կիրառմամբ, որը ստացվել է սցենար 2-ի սիմուլյացիայի արդյունքում.

Աղյուսակ 3. Էներգիայի սպառման ամփոփիչ ցուցանիշները

Ճարտարապետական մոդել	Ընդհանուր էներգիայի սպառում (կՎտ)	Ակտիվ հանգույցների միջին քանակ (%)	Էներգախնայողություն (%)
Բոնոմիի Ստատիկ Մոդել	28.5	100%	0%
Առաջարկվող Դինամիկ Մոդել	16.6	~52.3%	~ 41.8%

Աղյուսակ 4-ում ներկայացված են սցենար 3-ի սիմուլյացիայի արդյունքում ստացված փաթեթների կորստի տոկոսային ցուցանիշներն ուղիղ և հիբրիդային հաղորդակարգերի օգտագործմամբ.

Աղյուսակ 4. Փաթեթների կորստի տոկոսային ցուցանիշները

Ցանցի խցանման աստիճան	Ուղիղ կապ ամպի հետ (UDP)	Հիբրիդային (UDP → MQTT)	մոդել	Կորստի նվազեցում
Ցածր	2.1%	0.05%		2.05%
Միջին	8.4%	0.3%		8.1%
Բարձր	26.4%	1.2%		25.2%

Եզրակացություն մեջ ամփոփված են թեզում արծարծված գաղափարները և ստացված արդյունքները: Այսպիսով մշակված ճարտարապետությունը նվազեցնում է հապաղումները մինչև 67.8% համակարգի գերբեռնվածության պայմաններում, իսկ հիբրիդային հաղորդակարգերն ու դինամիկ պասիվացումն ապահովում են տվյալների փոխանցման կորստի նվազեցում մինչև 25.2% ցանցի բարձր խցանմանների պայմաններում և էներգախնայողություն մինչև 41.2% առաջարկվող պասիվացման և ակտիվացման մեխանիզմների կիրառմամբ պայմանավորված:

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ՀԻՄՆԱԿԱՆ ԱՐԴՅՈՒՆՔՆԵՐԸ

- Մշակվել է հաշվարկների կազմակերպման բազմամակարդակ ճարտարապետական մոդել, որը, ի տարբերություն գոյություն ունեցող կենտրոնական կառավարում ունեցող մոդելների, ապահովում է համակարգի կայուն գործունեությունը, նույնիսկ առանձին հատվածների խափանումների դեպքում: [2, 4, 5]
- Առաջարկվել է մառախլապատ միջավայրի համար ծանրաբեռնվածության դինամիկ հավասարակշռման մեթոդ: Վերջինս, առկա ստատիկ բաշխման ալգորիթմների հետ համեմատած, ներգրավում է առավել քիչ ծանրաբեռնված հանգույցները՝ դրանով իսկ ապահովելով հաշվողական ռեսուրսների արդյունավետ օգտագործումը: [1, 2, 5, 6]
- Առաջարկվել է Իրերի համացանցի շերտում գեներացվող տվյալների ագրեգացման և դեպի ամպային միջավայր տեղափոխման մեթոդ, որը, գոյություն ունեցող մեթոդների հետ համեմատած ապահովում է ռեսուրսների խնայողությունը և տվյալների կորստի նվազեցումը: [2, 3]

ՀՐԱՏԱՐԱԿՎԱԾ ԱՇԽԱՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

1. N. Naltakyan “Load Balancing in Adaptive Fog Computing: Research Problems and Solutions Framework”, CSIT 2025, 2025, pp. 344–347.
2. Naltakyan N. “Adaptive Fog Computing Architecture Based on IoT Device Mobility and Location Awareness”, KMIS, 2025, pp 500-505.
3. Minasyan H.D., Naltakyan N.L. Batch As a Service with Enhanced Security for IOT-Enabled Smart Cities // Proceedings of NPUA: Information Technologies, Electronics, Radio Engineering. 2025. №2, P. 70-77.
4. N. Naltakyan, H. Minasyan "Federated Multi-Cluster Fog Architecture For Scalable IoT Key Management Using DANE/DANCE", 2025 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), 2025.
5. N. Naltakyan "Hierarchical Federated Multi-Cluster Fog Architecture with Dynamic Node Allocation for Massive Scale IoT Deployments", ACDSA, 2026, pp. 2879–2883.
6. N. Naltakyan, "Dynamic Inter-Cluster Resource Sharing and Node Migration in Hierarchical Federated Fog Computing for IoT Deployments", Programming and Computer Software, vol. 52, no. 2, 2026.

DEVELOPMENT OF METHODS AND MEANS FOR ORGANIZING A FOG
COMPUTING ENVIRONMENT

RESUME

Currently, smart devices are becoming an integral part of our daily lives. According to the "IoT Analytics" research firm, the number of Internet of Things (IoT) devices is projected to exceed 39 billion by 2030. These devices generate massive streams of data that must be processed in close proximity to the devices themselves. Traditional cloud systems often fail to provide the necessary latency and speed. As a solution, "Fog Computing" is proposed, which enables data processing near the IoT devices, ensuring rapid response times.

Currently, widely used classical architectural models primarily consist of device-fog-cloud layers. In such cases, management is often performed from a single central node; the failure of this node can halt the entire system's operation.

Some research papers note the necessity of cooperation between different groups of devices forming the fog environment; however, clear mechanisms for their implementation are lacking. Many systems use static workload distribution methods that are unable to adapt to changing environments.

Furthermore, separate works consider each service node as having fixed and unchanging boundaries. This approach creates issues related to changes in device density, resulting in increased load in some areas and decreased load in others, which prevents efficient workload distribution and resource optimization.

Thus, the development of methods and tools for organizing a fog computing environment is relevant both for solving problems of scientific interest and for designing systems that require decentralized and dynamic management for practical applications.

Aim of the Work. The objective of this work is the development of methods and tools for organizing calculations in a fog environment. During the research, the following main tasks were addressed:

- To develop a model for the fog computing environment that is resistant to failures and ensures continuous operation, even in the event of individual node or segment malfunctions.
- To develop a method for dynamic workload management in the fog computing environment to ensure efficient use and redistribution of computing resources.
- To develop a method for transferring data from IoT devices to the cloud environment to reduce data loss and ensure resource savings.

Practical Significance of the Work The developed solutions are applicable in Smart City, industrial, and healthcare infrastructures. The mechanism for adaptive activation and deactivation of nodes significantly reduces energy consumption, providing up to 41.8% savings and economic efficiency. The developed four-layer architecture and hybrid protocols ensure a

substantial reduction in data loss compared to direct cloud connections and provide scalability for tens of thousands of devices.

Implementation of Results Based on the scientific results obtained, the following were developed and implemented:

- "DataArt.AM" LLC: Inter-cluster resource exchange methods for fog environments, enabling efficient exchange of computational resources in high-load systems, resulting in optimized capacity and reduced delays.
- "Datalabz" LLC: A system for monitoring the status and load balancing of fog computing nodes, enabling seamless collection of information from sensors in IoT infrastructures for efficient local data processing.

The main results.

- A multi-level architectural model for organizing calculations has been developed which, unlike existing centralized management models, ensures stable operation even in the event of partial failures. [2, 4, 5]
- A dynamic load balancing method for fog environments has been proposed. Compared to existing static distribution algorithms, this method engages the least loaded nodes, thereby ensuring the efficient use of computing resources. [1, 2, 5, 6]
- A method for aggregating data generated at the Internet of Things (IoT) layer and transferring it to the cloud environment has been proposed, which, compared to existing methods, ensures resource savings and a reduction in data loss. [2, 3]

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ОРГАНИЗАЦИИ ТУМАННОЙ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ

РЕЗЮМЕ

В настоящее время умные устройства становятся неотъемлемой частью нашей повседневной жизни. По данным аналитической компании «IoT Analytics», прогнозируется, что к 2030 году количество устройств интернета вещей (IoT) превысит 39 миллиардов. Эти устройства генерируют огромные потоки данных, которые должны обрабатываться в непосредственной близости от самих устройств. Традиционные облачные системы часто не могут обеспечить необходимую скорость обработки и минимальную задержку. В качестве решения предлагаются «туманные вычисления» (Fog Computing), которые позволяют обрабатывать данные вблизи IoT-устройств, обеспечивая быстрое время отклика.

В настоящее время широко распространенные классические архитектурные модели в основном состоят из уровней «устройство — туман — облако». В таких случаях управление часто осуществляется из единого центрального узла, сбой которого может привести к остановке работы всей системы.

В ряде исследовательских работ отмечается необходимость взаимодействия между различными группами устройств, составляющих туманную среду, однако четкие механизмы их реализации отсутствуют. Многие системы используют статические методы распределения рабочей нагрузки, которые не способны адаптироваться к меняющейся среде.

Кроме того, в отдельных работах считается, что каждый обслуживающий узел имеет четкие и неизменные границы. Этот подход создает проблемы, связанные с изменением плотности устройств, в результате чего в одних сегментах наблюдается рост нагрузки, а в других — её снижение, что препятствует эффективному распределению задач и оптимизации ресурсов.

Таким образом, разработка методов и средств организации среды туманных вычислений является актуальной как для решения задач, представляющих научный интерес, так и для проектирования систем, требующих децентрализованного и динамического управления в прикладных целях.

Цель работы. Целью данной работы является разработка методов и средств организации вычислений в туманной среде. В ходе исследования были поставлены и решены следующие основные задачи:

- Разработать модель среды туманных вычислений, устойчивую к сбоям и обеспечивающую непрерывную работу системы даже в условиях неисправности отдельных узлов или сегментов.

- Разработать метод динамического управления рабочей нагрузкой в среде туманных вычислений для обеспечения эффективного использования и перераспределения вычислительных ресурсов.
- Разработать метод передачи данных от IoT-устройств в облачную среду, позволяющий снизить потери данных и обеспечить экономию ресурсов.

Практическая значимость работы. Разработанные решения применимы в инфраструктурах «умного города», промышленности и здравоохранения. Механизм адаптивной активации и деактивации узлов значительно снижает энергопотребление, обеспечивая экономию до 41,8% и экономическую эффективность. Разработанная четырехслойная архитектура и гибридные протоколы обеспечивают существенное снижение потерь данных по сравнению с прямым облачным соединением и обеспечивают масштабируемость для десятков тысяч устройств.

Внедрение результатов. На основе полученных научных результатов были разработаны и внедрены:

- В ООО «ДатаАрт.АМ»: Методы межкластерного обмена ресурсами в туманных средах, позволяющие эффективно обмениваться вычислительными ресурсами в высоконагруженных системах, что привело к оптимизации мощностей и сокращению задержек.
- В ООО «Даталабз»: Система мониторинга состояния и балансировки нагрузки узлов туманных вычислений, обеспечивающая бесперебойный сбор информации с датчиков в инфраструктурах IoT для эффективной локальной обработки данных.

Основные результаты.

- Разработана многоуровневая архитектурная модель организации вычислений, которая, в отличие от существующих моделей с централизованным управлением, обеспечивает стабильную работу системы даже при частичных сбоях. [2, 4, 5]
- Предложен метод динамической балансировки нагрузки для туманных сред. По сравнению с существующими алгоритмами статического распределения, данный метод задействует наименее нагруженные узлы, обеспечивая тем самым эффективное использование вычислительных ресурсов. [1, 2, 5, 6]
- Предложен метод агрегации данных, генерируемых на уровне интернета вещей (IoT), и их передачи в облачную среду, который по сравнению с существующими методами обеспечивает экономию ресурсов и снижение потерь данных. [2, 3]