

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

სალომე მახარაძე

სენსორული სატელეკომუნიკაციო ქსელების აგების  
მეთოდებისა და მახასიათებლების კვლევა

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად  
წარდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

სადოქტორო პროგრამა - ტელეკომუნიკაცია შიფრი - 0402

თბილისი

2016 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში  
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი  
ტელეკომუნიკაციის დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: ჯემალ ბერიძე - სრული პროფესორი,  
ტექნიკურ მეცნიერებათა დოქტორი

რეცენზენტები: 1. -----  
2. -----

დაცვა შედგება 2016 წლის „-----“, -----, ----- საათზე  
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა  
და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს კოლეგიის  
სხდომაზე, კორპუსი VIII, აუდიტორია 504.  
მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ს ბიბლიოთეკაში,  
ხოლო ავტორეფერატისა - ფაკულტეტის ვებგვერდზე

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი,  
ასოცირებული პროფესორი

/ გ. გიგინეიშვილი/

## სამუშაოს ძირითადი დახასიათება

*პრობლემის აქტუალურობა.* უსადენო სენსორული ქსელი (უსქ) (Wireless Sensor Network-WSN) წარმოადგენს ტელეკომუნიკაციის თანამედროვე ტექნოლოგიების განვითარების ერთერთ ყველაზე პერსპექტიულ მიმართულებას. მათი გამოყენების პერსპექტიულობა განპირობებულია კაბელური ინფრასტრუქტურის შეცვლით უსადენო ტექნოლოგიებით და ახალი ფუნქციონალური შესაძლებლობებით. ტექნოლოგიური პროგრესის ბოლო მიღწევებმა შესაძლებელი გახადა შექმნილიყო იაფი მინიატურული გამომთვლელები მცირე ენერგომომხმარებით, აღჭურვილები რადიო მიმღებ-გადამცემებით, რომელთაც უნარი შესწევთ გაერთიანდნენ ქსელში და ურთიერთქმედდნენ ერთმანეთთან უსადენო კავშირის არხებით.

უსადენო სენსორული ქსელები აქტიურად აღწევენ ადამიანის ყოველდღიურ ცხოვრებაში. წამყვანი ექსპერტების პროგნოზით 2017-2020 წლისათვის ტელეკომუნიკაციის სფეროში 7 ტრილიონამდე უსადენო მოწყობილობა იქნება გამოყენებული. სენსორული ქსელები, როგორც საგნების ინტერნეტის (Internet of Things) ნაწილი დაიკავებს მნიშვნელოვან ნაწილს კავშირის ქსელებში უკვე უახლოეს პერსპექტივაში.

სენსორული ქსელების ელემენტები ამჟამად წარმოდგენილია მრავალი მწარმოებლების მიერ, რასაც მოჰყვას სხვადასხვაგვარი ინდუსტრიული სტანდარტების გამოჩენა, რომლებიც ვერ უზრუნველყოფენ ურთიერთქმედებას სხვადასხვა მწარმოებლების მოწყობილობებს შორის. ძირითადი სამუშაოები სენსორულ ქსელებში გამოყენებული პროტოკოლების სტანდარტიზაციის სფეროში ტარდება ელექტროტექნიკისა და ელექტრონიკის ინჟინრების ინსტიტუტის (IEEE), ტელეკომუნიკაციის საერთაშორისო კავშირის (ITU), ინტერნეტის ინჟინრული საბჭოს (IETF) და სტანდარტიზაციის საერთაშორისო ორგანიზაციის - ISO მიერ.

უსადენო სენსორული ქსელების მნიშვნელოვან განსაკუთრებულობას წარმოადგენს ასეთი ქსელების თვითორგანიზების ბუნება. ლოკალურად დაჯგუფებული კვანძები ერთმანეთს შორის ქმნიან ქსელს და ერთი ან რამდენიმე რაბით

და შეუძლიათ გადასცენ მონაცემები შემდგომი დამუშავებისათვის, მაგ. საერთო სარგებლობის კავშირის ქსელში. სენსორულ ქსელებსა და საერთო სარგებლობის კავშირის ქსელს შორის კავშირის არსებობა მოითხოვს რაბის მონაცემთა პარამეტრების გათვლის ჩატარებას, რისთვისაც აუცილებელია დატვირთვის ბუნების კვლევა, რომელიც ცირკულირებს უსადენო სენსორულ ქსელში. მონაცემთა გადაცემა წარმოადგენს ინფოკომუნიკაციის სისტემის და მოდელების ძირითად კომპონენტებს, ამიტომ დატვირთვის ცოდნას აქვს მნიშვნელობა ქსელის მუშაობის ეფექტურობის შეფასებისათვის.

უსქ-ის სფეროში აქტუალურ მიმართულებას წარმოადგენს ახალი აპარატურული პლატფორმის შექმნა, ქსელური პროტოკოლების სტეკის და სპეციალიზირებული ოპერატიული სისტემების შემუშავება, გარემოში შეღწევის ალგორითმების შემუშავება და მარშრუტიზაცია რთული ქსელური ტოპოლოგიისათვის. ეს ყველაფერი მიმართულია უსქ-ის ენერგოეფექტურობის ამაღლებისაკენ და შესაბამისად, ქსელის სიცოცხლის დროის (ავტონომიურად მუშაობა) გახანგრძლივებისაკენ.

უსქ-ის ენერგოეფექტურობის ამაღლების ერთერთ პრობლემას წარმოადგენს ქსელის კვანძების მიერ არათანაბარი ენერგომომხმარება, რაც მდგომარეობს იმაში, რომ ქსელი ხდება შრომისუუნარო იმ მომენტში, როცა ენერგია უმთავრდება რამდენიმე კვანძს, მაშინ როცა დანარჩენ კვანძებს გააჩნიათ მნიშვნელოვანი ენერგიის მარაგი.

არსებობს მოცემული პრობლემის გადაწყვეტის სხვადასხვა მეთოდები. მათ მიეკუთვნება მკვებავი ელემენტის ტევადობის ინდივიდუალური შერჩევა, კვანძების განთავსების სიმკვრივე, გადამცემების სიმძლავრე, მარშრუტიზაციის ენერგოეფექტური პროტოკოლების გამოყენება, ქსელის კვანძების პოზიციონირება და სხვ. შემოთავაზებულია პერსპექტიული მეთოდების ახალი კლასი, რომელიც გამოიყენება რესურსის სახით ენერგეტიკული ბალანსირებისათვის - ქსელის კვანძების მობილურობა, რომელიც ითვალისწინებს ქსელის კონფიგურაციის (ტოპოლოგია) დინამიურ ცვლილებას.

სერიოზულ დაბრკოლებას წარმოადგენს დინამიურად რეკონფიგურირებადი სენსორული ქსელის მათემატიკური მოდელის არ არსებობა. ამასთან დაკავშირებით კვლევის ამოცანას შეადგენს კომპლექსური მოდელის შემუშავება, რომელიც საშუალებას იძლევა ისეთი ავტონომიური ქსელების სიცოცხლის დროის შეფასებისას, რომელთა კონფიგურაცია იცვლება დროის მიხედვით, რათა მოხდეს მათი მუშაობის ოპტიმიზირება სიცოცხლის დროის მაქსიმიზაციის კრიტერიუმით, რაც წარმოადგენს აქტუალურ პრობლემას.

**სამუშაოს მიზანი და კვლევის ამოცანები.** დისერტაციის მიზანს წარმოადგენს უსქ-ს მახასიათებლების შესწავლა, პარამეტრების განსაზღვრა, ქსელის კვანძების ენერგომოხმარების მინიმიზაცია და შესაბამისად სიცოცხლის დროის გაზრდა, უსქ-ს მოდელის შემუშავება ელექტროენერჯის განაწილების სისტემებში აღრიცხვისა და მართვისათვის უსქ-ის გამოყენებით.

დასახული მიზნის მიღწევისათვის გადაწყვეტილი იქნა შემდეგი ამოცანები:

1. უსადენო სენსორული ქსელის არქიტექტურის, პროტოკოლების და დანართების ანალიზი.
2. შემუშავებულია სენსორული ქსელის სიცოცხლის დროის განსაზღვრის ალგორითმები.
3. გამოკვლეულია და შემუშავებულია ქსელის ტოპოლოგიის გადართვის ალგორითმები.
4. ქსელის ფუნქციონირების პარამეტრებზე დამოკიდებულებით განსაზღვრულია ქსელის სიცოცხლის დრო.
5. განხილულია ზემოკლე ელექტრომაგნიტური იმპულსების გავლენა ტიპიურ ყველგანშეღწევად სენსორულ ქსელებზე (USN) და ხელშეშლამდგრადობის ამაღლება ქსელის ეფექტურობის შენარჩუნების კოეფიციენტის გამოთვლის ბაზაზე.
6. შემოთავაზებულია გადაწყვეტა რომლის შედეგადაც შეიძლება განისაზღვროს დაცვის მეთოდებისა და საშუალებების გამოყენების ვარიანტები USN-ში,

რომელიც უზრუნველყოფს მოცემულ მაჩვენებლებს ქსელის სიმყარის ამაღლებისა და ეფექტურობის კოეფიციენტის შენარჩუნებისათვის.

7. შემუშავებულია უსქ-ს ქსელის მოდელი ელექტროენერჯის განაწილების სისტემებში აღრიცხვისა და მართვისათვის.

**კვლევის მეთოდოლოგია.** დისერტაციაში გამოიყენება სიმრავლეთა თეორია, გრაფთა თეორია, მარკოვის ჯაჭვებზე დაყრდნობით, ალბათობის თეორია.

**მეცნიერული სიახლე.** მიდგომა დაფუძნებულია ZigBee პროტოკოლის სტეკის მოდიფიკაციაზე. შემოთავაზებული სტეკის მოდიფიკაცია დაფუძნებულია ქსელის ცენტრალიზებული მართვის ალგორითმზე, რომელიც გულისხმობს ინფორმაციის შეგროვებას მოწყობილობის როლის დინამიურად ცვლილებისას და მისი ოპტიმალური მიმოცვლის უზრუნველყოფას. დისერტაციის ძირითადი შედეგები, რომლებიც წარმოადგენენ მეცნიერულ სიახლეს შემდეგია:

1. დამუშავებულია სენსორული ქსელის სიცოცხლის დროის განსაზღვრის ალგორითმები, რომლებიც საშუალებას იძლევა დაფიქსირდეს ქსელის მწყობრიდან გამოსვლის მომენტი თვითაღდგენის შესაძლებლობის გათვალისწინებით.
2. დამუშავებულია სენსორული ქსელის სიცოცხლის დროის შეფასების მეთოდიკა ქსელის დინამიურად რეკონფიგურაციისას.
3. შემუშავებულია სენსორული ქსელის სიცოცხლის დროის მაქსიმიზაციის მეთოდი.
4. შექმნილია სენსორული ქსელის მოდელი ელექტროენერჯის განაწილების სისტემების მონიტორინგისათვის უსქ-ის გამოყენებით.

**პრაქტიკული ღირებულება და სამუშაოს შედეგების რეალიზაცია.** სამუშაოს პრაქტიკულ ღირებულებას წარმოადგენს მიღებული შედეგების გამოყენების შესაძლებლობა უსქ-ს პროექტირებისათვის, დაგეგმვისათვის და ზღვრული მახასიათებლების გათვლისათვის. უსადენო სენსორული ქსელების კვლევის შედეგები გამოყენებული იქნება სასწავლო პროცესში, უსადენო სენსორული ქსელების დისციპლინის სწავლებისას, რომელიც

შემოტანილი იქნება ტელეკომუნიკაციის სასწავლო პროგრამაში როგორც არჩევითი საგანი.

**სამუშაოს აპრობაცია.** სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი შედეგები განიხილებოდა და მოხსენებული იქნა საერთაშორისო კონფერენციებზე: 1. „ბირთვული-რადიაციული ნანოსენსორები და ნანოსენსორული სისტემები“ (საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ფიზიკის დეპარტამენტი, NATO-ს სამეცნიერო კომიტეტის მხარდაჭერით 6-9 მარტი, 2014, თბილისი); 2. „მდგრადი ენერგეტიკა: გამოწვევები და განვითარების პერსპექტივები“ (ენერგოეფექტურობის ცენტრი საქართველო, ვინროკ ინტერნეიშენალ ჯორჯია, აშშ-ის საერთაშორისო განვითარების სააგენტო (USAID), აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, 18.06.2015, ქუთაისი); 3. „ენერგეტიკა: რეგიონალური პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები“ (ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის დეპარტამენტი, საინჟინრო ფაკულტეტი, აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, 23-25 ოქტომბერი 2015, ქუთაისი); 4. ”მანქანები, ტექნოლოგიები, მასალები 2016” (ბულგარეთის მანქანათმშენებლობის სამეცნიერო-ტექნიკური საზოგადოების ორგანიზებით XII საერთაშორისო კონგრესი, ზამთრის სესია, 16-19.03.2016,ბულგარეთი).

**პუბლიკაციები.** გამოქვეყნებულია რეფერირებად ჟურნალში: 1. საერთაშორისო სამეცნიერო ჟურნალი-ინტელექტუალი - №31/2016 („უსადენო სენსორული ქსელის სიცოცხლის დროის მაქსიმიზაცია“); 2. საქართველოს საინჟინრო სიახლენი №1/2016 („იმპულსური ხელშემღების გავლენის ანალიზი მფრინავ სენსორულ ქსელებში“); 3. 1-4 - ზემოთ დასახელებული საერთაშორისო კონფერენციების კრებულებში.

**ძირითადი დებულებები გატანილი დაცვაზე:**

1. სენსორული ქსელის კვანძების ენერგომოხმარების შემცირების ალგორითმები.
2. თვითაღმდგენი სენსორული ქსელის სიცოცხლის დროის განსაზღვრის მეთოდიკა.
3. სენსორული ქსელის მოდელის სიცოცხლის დროის შეფასება.

4. სენსორული ქსელის ოპტიმიზაცია მისი სიცოცხლის დროის მაქსიმიზაციის კრიტერიუმით.
5. სენსორულ ქსელში მართვის ალგორითმები, რომელიც ითვალისწინებს მისი ფუნქციონირების შესაძლო ცვლილებების პირობებს.
6. ხელშემწამდგრადობის ამალგების ალგორითმები მფრინავი სენსორული ქსელებისათვის.
7. უსქ-ის პრაქტიკული გამოყენება ელექტროენერჯის დისტრიბუციის სისტემებში.

**დისერტაციის სტრუქტურა და მოცულობა.** დისერტაცია შედგება: შესავალი, ხუთი თავი, ქვეთავები, დასკვნა და დანართი. დისერტაციის საერთო მოცულობა შეადგენს 148 გვერდს.

*სამუშაოს შინაარსი.* შესავალში დასაბუთებულია კვლევის თემის აქტუალურობა, განიხილება საკვლევი პრობლემის მდგომარეობა, ფორმულირებულია სამუშაოს მიზანი და ამოცანები, ჩამოთვლილია ძირითადი სამეცნიერო შედეგები, რომელიც მიღებულია დისერტაციაში. განსაზღვრულია პრაქტიკული ღირებულება და შედეგების გამოყენების სფერო, მოყვანილია ინფორმაცია სამუშაოს აპრობაციაზე და წარმოდგენილია ძირითადი დებულებები, გატანილი დაცვაზე.

**პირველ თავში** განხილულია უსადენო კავშირის ქსელების განვითარების თანამედროვე კონცეფციები, განიხილება და კლასიფიცირდება დღეს ფუნქციონირებადი უსქ-ს დანართები. თავის დასაწყისში ზოგადად აღწერილია კავშირის ქსელების ევოლუცია, რამაც განაპირობა შემდგომი თაობის კავშირის ქსელების წარმოშობა (NGN-Next Generation Networks), ასევე სტრუქტურები რომელიც შედის მოცემული კონცეფციის შემადგენლობაში – მფრინავი სენსორული ქსელები, ნანოსენსორული ქსელები.

NGN კონცეფციის ინტენსიური განვითარების პერიოდში უსადენო სენსორული ქსელები შევიდა NGN-ში, როგორც მისი შემადგენელი ნაწილი. იმავე დროს ითვლებოდა, რომ WSN (Wireless Sensor Network) კლიენტური ბაზა შედგენილია



ასეული მილიონი სენსორული კვანძებისაგან. ამ ახალი ტექნოლოგიის სწრაფმა განვითარებამ გამოიწვია საგნების ინტერნეტის (IoT-Internet of Things) და ვებ საგნების (WoT-Web of Things) კონცეფციის ჩამოყალიბება. სენსორული ქსელების განვითარების პერსპექტივების და თანამედროვე პროგნოზის მიხედვით სენსორული კვანძების რაოდენობა 2017-2020 წ.წ.-სათვის მიაღწევს 7 ტრილიონს - 7 მილიარდ ადამიანზე.

ITU-ს სტანდარტიზაციის სექტორი ამჟამად განიხილავს NGN კონცეფციის შეცვლის შესაძლებლობას ჭკვიანი ყველგანშეღწევადი ქსელების (SWN-Smart Ubiquitous Networks) კონცეფციით, რომელიც მოიცავს თავის თავში NGN კონცეფციას, როგორც ერთ-ერთ შემადგენელ ნაწილს.

გავრცელებულმა უსადენო ქსელმა სტანდარტით IEEE 802.11 განაპირობა შექმნილიყო ახალი თვითორგანიზებადი ქსელები, რომლებიც მუშაობენ ინფრასტრუქტურის გარეშე. თვითორგანიზებადი ქსელები ისევე როგორც კავშირის ყველა ქსელი, შედგება შეღწევის ქსელისა და სატრანზიტო ქსელისაგან. შეღწევის ქსელს ეწოდება AdHoc, სატრანზიტო ქსელს - mesh (უჯრედოვანი). ქსელის AdHoc კვანძებს არ გააჩნიათ მარშრუტიზაციის ფუნქცია და შეუძლიათ განახორციელონ ურთიერთკავშირი ახლომდებარე კვანძებთან.

თანამედროვე ქსელები გვთავაზობენ სხვადასხვაგვარ მომსახურებებს მონაცემთა ერთი არხით. ამასთან ქსელებიდან თითოეულს შეიძლება გააჩნდეს საკუთარი მოთხოვნა მომსახურების ხარისხის უზრუნველყოფის მხრივ. WSN უსადენო სენსორული ქსელის ძირითადი ამოცანა მდგომარეობს დიდი რაოდენობით სენსორული ქსელის ორგანიზებაში, განსაკუთრებით მარტივი გადამწოდების გამოყენებით. სენსორული ქსელების პოტენციალურ უპირატესობას ტრადიციულ მიდგომებთან შედარებით წარმოადგენს: დაფარვის დიდი ზონა, სიზუსტე, საიმედოობა, ნაკლები დანახარჯები და ა.შ.

IEEE 802.15.4 სტანდარტის უსადენო პერსონალური ქსელი თავის გამოყენებას პოულობს სენსორული ქსელების სფეროში. ხშირად ასეთი ქსელები იწოდებიან LR-

WPAN (Low Rate Wireless Personal Area Network-დაბალსიჩქარიანი უსადენო პერსონალური ქსელი).

IEEE 802.15.4 სტანდარტის შექმნისას წარმოდგენილი იქნა შემდეგი მოთხოვნები: ქსელი უნდა იყოს საიმედო, მარტივი პროტოკოლებით და დაბალი ენერგომომხმარებით, რაც საშუალებას აძლევს მოწყობილობებს ხანგრძლივად იმუშაონ კვების წყაროდან.

ამ თავში აღწერილია საგნების ინტერნეტის სტანდარტიზაციის პროექტები: საგნების ინტერნეტის არქიტექტურის ევროპული პროექტი IoT-A (Internet of Things Architecture), „საგნების ინტერნეტის ევროპული მკვლევარი კლასტერი“ IERC (IoT European Research Cluster, IERC), *IPSO ალიანსი*, *One M2M გლობალური პარტნიორული პროექტი*, გაანალიზებულია მათი დადებითი და უარყოფითი მხარეები.

აღწერილია სენსორული ქსელის შექმნის ისტორია და უსქ-ს გამოყენების პერსპექტიული სფეროები: უსაფრთხოების სისტემები, გარემოს მონიტორინგისა და კონტროლის სისტემები, საგანგებო სიტუაციები, ჯანდაცვა და სხვ.

XXI საუკუნის უახლესი საინფორმაციო ტექნოლოგიების საზოგადოებაზე გავლენის გამოვლინებაა „საგნების ინტერნეტი“. უახლოეს პერსპექტივაში პროგნოზირებენ ამ მოწყობილობების რიცხვის ექსპონენციალურ ზრდას. მიმდინარე პერიოდი ხასიათდება ევოლუციური გადასვლით „ადამიანების ინტერნეტიდან“ „საგნების ინტერნეტზე“.

**მეორე თავში** განხილულია ინფორმაციის გადაცემის პრინციპი უსქ-ში, იმ შემთხვევის გათვალისწინებით, როცა შესაძლებელია მობილური საბაზო სადგურების გამოყენება უსქ-ს სათავო კვანძებად. აღწერილი და გაანალიზებულია ყველგანშედგენადი სენსორული ქსელის ახალი კლასი - მფრინავი სენსორული ქსელები (FUSN, Flying Ubiquitous Sensor Networks), რომელიც შედგება მიწისპირა და მფრინავი სეგმენტებისაგან. ასეთი ქსელების განმასხვავებელი განსაკუთრებულობაა - რამდენიმე სენსორული ველების არსებობა, მონაცემები, რომლებიც გროვდება უპილოტო მფრინავი აპარატის (უმპ) მიერ. ფრენის ტრაექტორია და ინფორმაციის შეგროვების მეთოდები წარმოადგენს თანამედროვე კვლევის საგანს. USN-მნიშვნელოვანი მახასიათებელია ხელშეშლამდგრადობა გარე მადესტაბილიზებული ზემოქმედებებზე. ერთერთ ასეთ

ფაქტორს წარმოადგენს მიზანმიმართული ელექტრომაგნიტური ზემოკლე ელექტრომაგნიტური იმპულსები (ზმემი) და სივრცეში გავრცელებული ელექტრომაგნიტური ველი. ხელშეშლამდგრალობის ქვეშ იგულისხმება USN-ის შესაძლებლობა შეასრულოს მასზე დაკისრებული ფუნქციები ზემოკლე იმპულსური ხელშეშლების არსებობისას.

ზმემი-ს უფრო ნამდვილ გამოვლენას USN-ზე წარმოადგენს კავშირის წყვეტა და მომსახურებაზე უარის თქმა, რომელიც წარმოიშვება დარღვევისას სენსორულ კვანძებში, ასევე კავშირის არხებით ინფორმაციის გაცვლისას.

FUSN ფუნქციონირების პროცესში კავშირის კვანძებზე და არხებზე იმოქმედებს ზმემი, რაც წარმოქმნის ელექტრომაგნიტურ გარემოს, პარამეტრების სიმრავლით  $\Xi = \{\lambda_{\Pi}, P_{\Pi}, E_{\Pi}, \tau_{\Pi}, \Delta F\}$ , სადაც  $\lambda_{\Pi}$  - ზემოქმედების ნაკადის ინტენსივობაა,  $P_{\Pi}$  - ელექტრომაგნიტური იმპულსის სიმძლავრე,  $E_{\Pi}$  - ხელშეშლების სპექტრი,  $\tau_{\Pi}$  - ზემოქმედების ხანგრძლივობა,  $\Delta F$  - სიხშირული დიაპაზონი.

ზმემი-ს მოქმედება იწვევს კავშირის წყვეტას და მომსახურებაზე უარების მაღალ პროცენტულ მაჩვენებელს. ამასთანავე უპილოტო მფრინავი აპარატების გამოყენების თავისებურება, რაც გამოიხატება მომსახურების დროის შეზღუდულობაში, შესამჩნევად ზღუდავს FUSN ქსელების გამოყენების არეალს. ნაშრომში დამტკიცებულია, რომ მათი გამოყენება მიზანშეწონილია პაკეტური გადაცემის პირობებში, დაყოვნებებისადმი ტოლერანტულ ქსელებში.

FUSN-ქსელში ზმემი-ს მოქმედებით გამოწვეული ხელშეშლამდგრალობის შემცირების განსაზღვრისათვის საჭიროა შეფასებული იქნას ამ იმპულსების ზემოქმედებისაგან (ელექტრომაგნიტური გარემოსაგან) დაცვის საშუალებების ეფექტურობა თითოეულ კვანძზე. დაცვის საშუალებების ეფექტურობის შეფასებისათვის საჭიროა თითოეულ კვანძზე თითოეული დაცვის საშუალების გამოყენების ეფექტურობის მატრიცული წარმოდგენა და დანახარჯების მინიმიზაცია ოპტიმიზაციის პროგრამული მეთოდების გამოყენებით.

საგნების ინტერნეტის ფართო დანერგვის კონცეფციის შერწყმა ხანგრძლივი ევოლუციის სისტემასთან (LTE - Long Term Evolution) წარმოქმნის ახალ საშუალებებს ტრაფიკის მომსახურებისათვის, თვითროგანიზებადი სენსორული ქსელის LTE რესურსებთან ინტეგრაციით.

მონაცემთა შეგროვება სენსორული ველებიდან ხდება სპეციალიზირებული რაბების საშუალებით, რომლებიც მიმდევრობით გადაკვეთენ რიგ წინასწარ განსაზღვრულ სენსორულ ველებს. ყველგანშედწევადი სენსორული ქსელი, როგორც წესი ფორმირდება კლასტერული არქიტექტურის საფუძველზე. სენსორული კვანძები შეიძლება იყოს სტაციონარული და მობილური. მობილური სენსორული ქსელის შემთხვევაში შეიძლება დროებით სათავო კვანძად გამოყენებული იქნას სხვა ქსელების კვანძები. განსაზღვრულია შეტყობინების მიტანის ალბათობა იმ დაშვებით, რომ სენსორული ქსელის მოქმედების ზონაში იმყოფება თუნდაც ერთი სათავო კვანძი:

$$P_c = 1 - P_0^{(H)} \quad (1)$$

$P_0^{(H)}$  - იმის ალბათობაა, რომ სენსორული კვანძის მოქმედების ზონაში არ არის არცერთი სათავო კვანძი. ეს ალბათობა შეიძლება განისაზღვროს პუანსონის განაწილების კანონის თანახმად:

$$P_0^{(H)} = \frac{(\pi r^2 \rho_H)^k}{k!} e^{-\pi r^2 \rho_H} \Big|_{k=0} = e^{-\pi r^2 \rho_H} \quad (2)$$

მაშინ

$$P_c = 1 - e^{-\pi r^2 \rho_H} \quad (3)$$

$\rho_H = \rho \eta$  - სათავო კვანძების სიმკვრივე;  $\rho = \frac{n}{S}$  - ქსელის კვანძების სიმკვრივე (კვანძები/კვ.მ);  $n$ -ქსელის კვანძების საერთო რიცხვი;  $S$ -მომსახურების ზონის ფართობი.

საერთო შემთხვევაში ალბათობა იმისა, რომ  $d$  რაუნდის განმავლობაში სენსორულმა კვანძმა მიიღო შეტყობინების გაგზავნის შესაძლებლობა (მიღწევადია სათავო კვანძი), განისაზღვრება:

$$P_C(d) = 1 - (e^{-\pi r^2 \rho_H})^d = 1 - e^{-\pi r^2 \rho_H d} \quad (4)$$

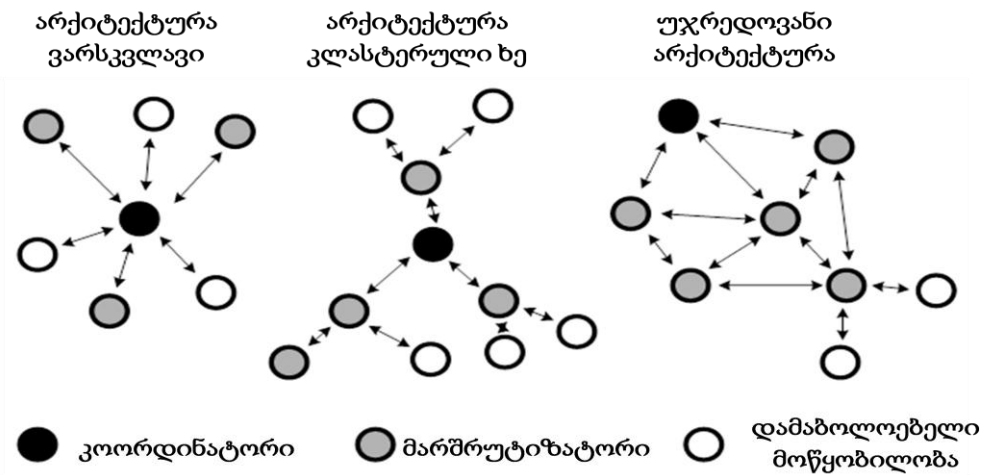
მესამე თავში განხილულია უსადენო სენსორული ქსელის აგების ძირითადი პრინციპები, სენსორული ქსელების და კვანძების არქიტექტურა, მარშრუტიზაციის ალგორითმები, ასევე ტექნოლოგია, რომელიც ასეთ ქსელებში მონაცემთა საიმედო და უსაფრთხო გადაცემის ორგანიზებას ახდენს. განხილულია უსქ-ის ძირითადი მახასიათებლები და სხვა ქსელებისაგან განმასხვავებელი განსაკუთრებულობები.

სენსორული ქსელის ყოველ კვანძს უნდა ჰქონდეს შესაძლებლობა ფუნქციონირებდეს როგორც დამაბოლოებელი და სატრანზიტო კვანძი. სენსორულ ქსელში მონაცემთა გადაცემა ხორციელდება ახლო კვანძთან ნაბიჯ-ნაბიჯ გადაცემის პრინციპით.

სენსორული ქსელი განისაზღვრება-როგორც „განაწილებული ქსელი“, რომელიც შედგება დიდი რაოდენობით გაფანტული მცირე ზომის უსადენო კვანძებისაგან, განთავსებული რაღაც ზედაპირზე ან სფეროში. რადიო სიგნალის დაფარვის ზონაში ყოველ სენსორთან ახლოს უნდა იმყოფებოდეს როგორც მინიმუმ კიდევ ერთი სენსორი, რომელსაც ეწოდება „მეზობელი“. რაც უფრო მეტი „მეზობელი“ ჰყავს ყოველ სენსორს, მით მეტი მაღალი სიზუსტით და საიმედოობით გამოირჩევა სენსორული ქსელი.

რადიოშელწევის ტექნოლოგია, რომელიც გამოიყენება სენსორებში დაფუძნებულია IEEE 802.15.4 სტანდარტზე (ZigBee) რომელიც, საშუალებას იძლევა მონაცემები გადაიცეს რამდენიმე ათეულ მეტრზე.

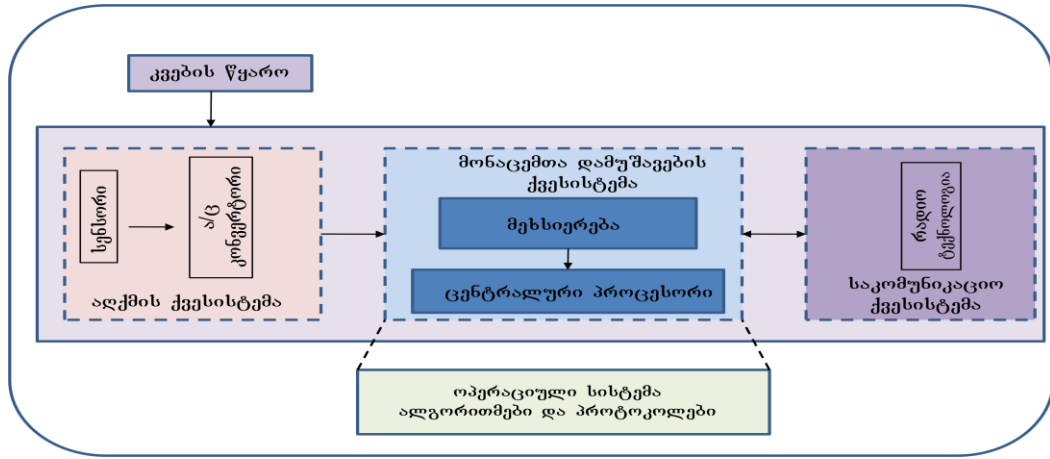
IEEE 802.15.4 ქსელი მოიცავს არქიტექტურის სამ ტიპს: ვარსკვლავი, კლასტერული ხე და შეერთებით ყველა-ყველასთან (უჯრედოვანი) (ნახ.1).



ნახ.1. IEEE 802.15.4 ქსელის არქიტექტურა

სენსორული ქსელის აგებისას ერთერთ მნიშვნელოვან პარამეტრს წარმოადგენს ენერჯიის მოხმარება. სენსორული კვანძი თავისი ზომების შესაბამისად შეიძლება იყოს ალჭურვილი არც თუ დიდი რესურსის მქონე კვების წყაროთი. უმეტესად სენსორული კვანძი წარმოადგენს მოუმსახურებელ მოწყობილობას და კვების წყაროს შეცვლა შეუძლებელია. იმის გათვალისწინებით, რომ სენსორულმა კვანძმა შეიძლება შეასრულოს როგორც საბოლოო ტერმინალის (კვანძის) როლი, ასევე სატრანზიტო კვანძის როლი, კვების წყაროს მოქმედების ხანგრძლივობის გაზრდა წარმოადგენს ერთერთ პრიორიტეტულ ამოცანას, რომელიც გადაწყდება არა მხოლოდ კვების წყაროს სიცოცხლის ხანგრძლივობის გაზრდით, არამედ მისი მუხტის ეფექტურად გამოყენების გზით.

სენსორი როგორც ნებისმიერი სატელეკომუნიკაციო კვანძი და/ან ტერმინალი, შედგება აპარატურული ნაწილისაგან და პროგრამული უზრუნველყოფისაგან (ნახ.2). მოყვანილი სენსორული კვანძის სტრუქტურა შედგება შემდეგი ქვესისტემებისაგან: მონიტორინგის, ალქმის, მონაცემთა დამუშავების, საკომუნიკაციო ქვესისტემებისაგან და კვების წყაროსაგან.



ნახ.2. სენსორული კვანძის არქიტექტურა

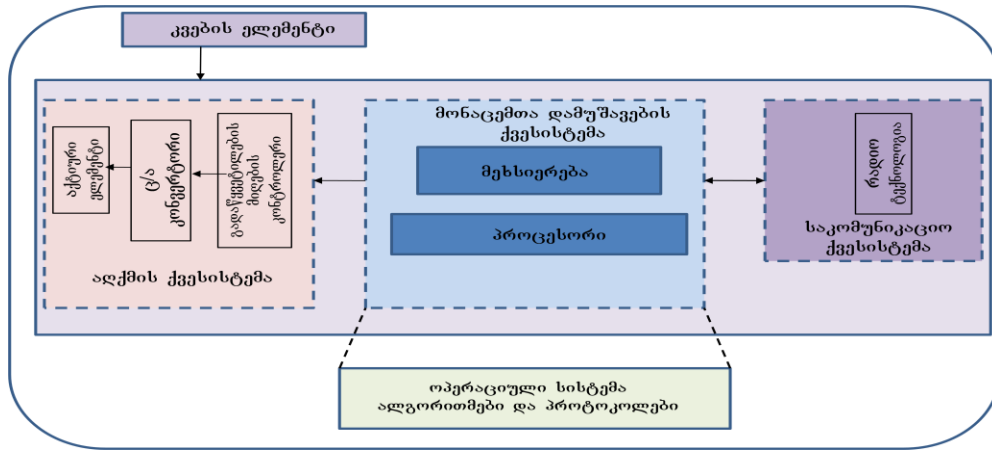
მონიტორინგის და აღქმის ქვესისტემა სენსორს საშუალებას აძლევს შეაგროვოს ისეთი მონაცემები გარე გარემოს შესახებ როგორცაა ტემპერატურა, სინათლის ძალა, ვიბრაცია, აჩქარება, მაგნიტური ველი, ჰაერის ქიმიური შემადგენლობა, სინოტივე, აკუსტიკა და ა.შ. სწორედ ეს ქვესისტემა განსაზღვრავს იმ სფეროს ან დანართებს, რომელშიც შეიძლება გამოყენებული იქნას სენსორი. სენსორს შეიძლება დაემატოს სხვა ქვესისტემა, როგორც მაგ. პოზიციონირება, ელექტრო ენერგიის გენერირების წყარო (ტრადიციული ან არატრადიციული) და სხვ.

მონიტორინგის და აღქმის ქვესისტემა მოიცავს ანალოგურ მოწყობილობას (უშუალოდ იღებს (აფიქსირებს) განსაზღვრულ სტატისტიკას) და ანალოგურ-ციფრულ კონვერტორს, რომელიც გარდაქმნის ანალოგურ მონაცემებს ციფრულში შემდგომი დამუშავებისათვის.

მონაცემთა დამუშავების ქვესისტემა მოიცავს მეხსიერებას და ცენტრალურ პროცესორს, რომელიც ინახავს და ამუშავებს როგორც სენსორის მიერ გენერირებულ მონაცემებს, ასევე სასამსახურო მონაცემებს, რომელიც აუცილებელია სატელეკომუნიკაციო ქვესისტემის კორექტული და ეფექტური ფუნქციონირებისათვის.

არსებობს სენსორული კვანძის სხვადასხვა არქიტექტურა, რომელიც გამიზნულია არა მარტო გასაზომი მახასიათებლების მონიტორინგისა და კონტროლისათვის, არამედ გასაზომ ობიექტზე ზემოქმედებისათვის. ასეთ ელემენტს რომელსაც გაჩნია ობიექტზე

ზემოქმედების შესაძლებლობა *აქტორი* ეწოდება (ნახ.3). აქტორის არქიტექტურა მსგავსად სენსორული კვანძის არქიტექტურისა, განსხვავდება იმით, რომ გარემოსთან ურთიერთქმედებს აქტიური ელემენტი.



ნახ.3. აქტორული კვანძის არქიტექტურა

რამდენადაც სენსორულ ქსელს შეიძლება არ ჰქონდეს მუდმივი ინფრასტრუქტურა, კლასიკური მარშრუტიზაციის ალგორითმების გამოყენება სენსორული ქსელისათვის შეუძლებელია.

უსადენო სენსორული ქსელებისათვის მარშრუტიზაციის ალგორითმების შემუშავებისას გათვალისწინებული უნდა იქნას შემდეგი ფაქტორები: თვითორგანიზება, ენერგეტიკული ეფექტურობა, მოქნილობა, მასშტაბირება, ტოლერანტობა უარისთქმისადმი. ცხრ.1 მოყვანილია მარშრუტიზაციის ალგორითმების კლასიფიკაცია.

ცხრ.1. მარშრუტიზაციის ალგორითმების კლასიფიკაცია

კრიტერიუმი	კატეგორია	მაგალითი
ქსელური სტრუქტურა	ერთ დონიანი	SPAN
	იერარქიული	LEACH
რესურსების ცოდნა	დარჩენილი ენერჯის საფუძველზე	HEED
	განთავსების სიზუსტის საფუძველზე	Directed Diffusion
პროტოკოლებით მართვა	ცენტრალიზებული	SPAN
	გეოგრაფიული	GFG
	QoS-ის საფუძველზე	SAR
	რიგების თეორიის საფუძველზე	COUGAR



უსქ-ს დაგეგმარებისას არსებობს ურთიერთ დაკავშირებული მაჩვენებლების სიმრავლე, რაც წარმოადგენს გადამწყვეტს ქსელის საბოლოო ფუნქციონირებისათვის. ნაშრომში განსაზღვრულია სენსორული ქსელის აგებასთან დაკავშირებული აუცილებელი კრიტერიუმები: დაკავშირების კრიტერიუმი -  $ConC(S_i) = |N(S_i)|$ , დაფარვის კრიტერიუმი -  $CovC(S_i) = \frac{Cov(S_i)}{2\pi}$ , მობილურობის კრიტერიუმი  $MC(S_i) = \frac{\sqrt{(X_t - X_{t-1})^2 + (Y_t - Y_{t-1})^2}}{\Delta t}$ , დარჩენილი ენერჯის კრიტერიუმი -  $CC(S_i) = \alpha \cdot ConC(S_i) + \beta CovC(S_i) + \frac{\gamma}{1 + MC(S_i)} + \xi \cdot REC(S_i)$ , უსქ-ს სიმკვრივე -  $\rho = \frac{-\log_{10}(1-c)}{\frac{4}{3}\pi R_s^3} \Leftrightarrow R_s = \left[ \frac{-\log_{10}(1-c)}{\frac{4}{3}\pi\rho} \right]^{1/3} = \left[ \frac{-\log_{10}(1-c)V_s}{\frac{4}{3}\pi n} \right]^{1/3}$ , დაფარვის წილი -  $C = 1 - e^{-\rho V_s}$ .

**მეოთხე თავი** ეძღვნება უსადენო ქსელებისათვის დამახასიათებელ თვისებას - შეზღუდულ ენერჯიას. უსქ-ის გამოყენების მთავარ ფაქტორს წარმოადგენს ლიმიტირებული ავტონომიური კვების წყარო, რაც იწვევს ქსელის სიცოცხლის დროის შეზღუდვას. კვების წყაროს განმუხტვისას გარკვეულ დროის მომენტში ქსელის კვანძები ხდებიან შრომისუუნარო. ამიტომ უსქ სიცოცხლის დრო წარმოადგენს ქსელის პრინციპულად მნიშვნელოვან მაჩვენებელს და შესაბამისად მისი გაზრდა წარმოადგენს აქტუალურ სამეცნიერო და პრაქტიკულ ამოცანას.

დამაბოლოებელი მოწყობილობა-აგროვებს მონაცემებს გადამწოდებიდან (სენსორებიდან) დაბალი ენერგომომხმარებით და გადასცემს ქსელში. შეიძლება მოწყობილობა იმყოფებოდეს ძილის რეჟიმში, როცა ენერჯის ძირითადი მომხმარებლები - მიკროკონტროლერი და მიმღებ გადამცემი გამორთულია.

მარშრუტიზატორი-წარმოადგენს ქსელის ელემენტს, რომელიც ასრულებს მონაცემთა რეტრანსლიაციის ფუნქციას მონაცემთა შეგროვების წერტილში (კოორდინატორთან). კოორდინატორი (რაზი) - იღებს მონაცემებს მთელი ქსელიდან და გადასცემს ზედა დონის დანართებს მაღალსიხქარიანი უსადენო ინტერფეისით.

სასურველია, რომ კოორდინატორს გააჩნდეს მუდმივი კვების წყარო ქსელის სხვა კვანძებისაგან განსხვავებით და არ იყოს შეზღუდული რესურსებში.

უსქ გათვლილია მონაცემთა მცირე მოცულობების გადაცემაზე მცირე პერიოდულობით – ეს საშუალებას იძლევა მოწყობილობა გადავიდეს, მცირე ენერგომომხმარებაზე ქსელის ავტონომიურად მუშაობის დროის გასაზრდელად. ამიტომ აქტიურ ამოცანას წარმოადგენს მოდელების კვლევა და შემუშავება მოწყობილობების მიერ მოთხოვნილი სიმძლავრის მინიმუმაციის მიმართულებით.

უსქ-ის ყველა ელემენტი წარმოადგენს ავტონომიურს და აუცილებლად დგება მომენტი, როცა ქსელი ვეღარ შეძლებს მასზე დაკისრებული ამოცანების შესრულებას. ქსელის მუშაობის დაწყებიდან მოცემულ მომენტამდე პერიოდს ეწოდება სიცოცხლის დრო ან ქსელის ავტონომიურად მუშაობის დრო (Network lifetime).

არსებობს სიცოცხლის დროის მაჩვენებელი, რომელიც ეფუძნება მუშა კვანძების რაოდენობას, დაფარვის პროცენტს და ქსელის კავშირის გრაფს. ხშირად გამოიყენება განსაზღვრა, რომლის თანახმადაც ქსელი ითვლება შრომისუნარიანად პირველი კვანძის მწყობრიდან გამოსვლამდე.

პრობლემის გადასაწყვეტად შეიძლება გამოყენებული იქნას დიდი ტევადობის აკუმულატორები, კვანძების მიერ გენერირებული ტრაფიკის ინტენსივობის შემცირება, მონაცემთა შემჭიდროვება. სენსორული ქსელის სპეციფიკაციიდან გამომდინარე – როგორც მონაცემთა შეგროვების ცენტრალიზებული ქსელი, გადაუწყვეტელი რჩება მისი ენერგეტიკული დისბალანსი, ქსელი ხდება შრომისუნარო იმ მომენტში როცა ენერგია უმთავრდება რამდენიმე კვანძს, იმავე დროს კი სხვა დანარჩენს აქვთ მნიშვნელოვანი ენერგიის მარაგი.

ამგვარად წარმოიშვა სიმძლავრის ბალანსირების ამოცანა, რომელსაც მოიხმარს ქსელის კვანძები. ის შეიძლება გადაწყდეს რამდენიმე გზით, რომელთა შორისაა მარშრუტიზაციის დინამიური პროტოკოლების გამოყენება, რომელიც გამოიყენება კვანძების ენერგიის საზომის სახით, მონაცვლეობა შორეულ და ახლო გადაცემას შორის.

უსქ-ისათვის სიცოცხლის გახანგრძლივება წარმოადგენს აქტუალურ ამოცანას. განვსაზღვროთ ქსელის სიცოცხლის დრო და მოცემული დროის მაქსიმიზაციის ამოცანის გადაწყვეტა ქსელის მუშაობის სხვადასხვა პარამეტრების ცვლილებისას.

წარმოვადგინოთ რეკონფიგურირებადი N ქსელი შემდეგი სამეულით:

$$N = (G_s, \Gamma_n, \Pi) \quad (5)$$

$G_s = (V_s, E_s)$  - ქსელის კონფიგურაციის გრაფია;

$\Gamma_n = \{G_n(k), k \in V_s\}$  - ქსელური გრაფის სიმრავლე, რომლის ყოველი ელემენტი განისაზღვრება ქსელის k კონფიგურაციით;

$\Pi = (\langle \pi_1, t_1 \rangle, \langle \pi_2, t_2 \rangle, \dots, \langle \pi_q, t_q \rangle$  - კონფიგურაციის ცვლილების მიმდევრობაა, სადაც  $\pi_i \in V_s$  კონფიგურაციის ნომერია,  $t_i$  მისი გამოყენების დრო.

$G_s$  კონფიგურაციის გრაფი შედგება წვეროების  $V_s = \{1, 2, \dots, m\}$  და წიბოების  $E_s: E_s \subseteq V_s \times V_s$  სიმრავლეებისაგან.

თუ განვიხილავთ შემთხვევას როცა მობილურმა სტოკმა (სტოკი-მონაცემთა შეგროვების ცენტრალური კვანძი მობილურობის ბალანსირების შემთხვევაში) შეიძლება დაიკავოს m-პოზიციიდან ერთერთი, მდგომარეობების რაოდენობა განისაზღვრება გამოსახულებით:

$$|V_s| = \binom{m}{s} = \frac{m!}{s!(m-s)!} \quad (6)$$

S-სტოკების რაოდენობაა  $-S \leq m$ . ვივარაუდოთ, რომ ყოველ კვანძს შეუძლია იმუშაოს გადაცემის ორ რეჟიმში - ახლო და შორეული. ახლო რეჟიმში ის გადასცემს ინფორმაციას თავის ახლო მეზობელს, შორეულში - ქსელის სტოკს რეტრანსლაციის გარეშე. თუ ქსელში n ყოველი კვანძი ირჩევს თავის რეჟიმს სხვისგან დამოუკიდებლად, მაშინ შესაძლებელია კონფიგურაციების შემდეგი რაოდენობა:

$$|V_s| = 2^n \quad (7)$$

ავლნიშნოთ, რომ ბოლო შემთხვევაში მდგომარეობების რაოდენობა დამოკიდებულია ქსელის კვანძების რაოდენობაზე, მობილური სტოკის შემთხვევაში კი ასეთი დამოკიდებულება არ არის.

ყოველი გრაფისაგან, რომელიც შედის  $\Gamma_n$  სიმრავლეში, იქმნება უსადენო ქსელი:  $G_n(k) = (V_n, E_n), k \in V_s$ , სადაც  $V_s$ -წვეროების, ხოლო  $E_n \subseteq V_n \times V_n$  წიბოების სიმრავლეებია. წვეროები შეესაბამება ქსელის კვანძებს, წიბოები – მონაცემთა გადაცემის უსადენო არხებს.

ზოგად შემთხვევაში თითოეული გრაფი  $V_n = V \cup U$  შედგება სენსორული კვანძებისაგან  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  და სტოკის კვანძებისაგან  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_s\}$ .

ყოველი სენსორული კვანძი  $v_i = (E_i, P_i, \Sigma_i)$  ხასიათდება თავისი საწყისი ენერგიების  $E_i$  სიმძლავრეების ნაკრებით -  $P_i = (p_1^i, p_2^i, \dots, p_m^i)$ , სადაც  $p_k^i$  წარმოადგენს სიმძლავრეს, რომელსაც მოიხმარს  $i$ -კვანძი, ქსელის  $k$  კონფიგურაციის გამოყენების დროს, ენერგიის მატრიცით  $\Sigma_i = |e_{j-k}^i|_{m \times m}$ , სადაც  $e_{j-k}^i$  დამატებითი ენერგიაა, რომელსაც ხარჯავს  $i$ -კვანძი ქსელის გადასვლისას  $j$ -კონფიგურაციიდან -  $k$ -ზე,  $((j, k) \in E_s)$ . ამგვარად შემოთავაზებული მოდელის მთავარ განმასხვავებელ განსაკუთრებულობას წარმოადგენს ის, რომ ნებისმიერი ქსელური კვანძის მუშაობა გამოისახება ინტეგრალური მახასიათებლით - მის მიერ მოხმარებული სიმძლავრით. სტოკი წარმოადგენს იდეალური კვანძის სპეციალურ ტიპს, რომლისათვისაც საწყისი ენერგია ითვლება შეუზღუდავად:  $u_i = (E_i \rightarrow \infty)$ , ხოლო მოხმარებული სიმძლავრის მახასიათებელი არ წარმოადგენს მნიშვნელოვანს. მოდელის ბოლო ელემენტს წარმოადგენს კონფიგურაციის ცვლილების მიმდევრობა ან სტოკის მარშრუტი  $\Pi$ , რომელიც შედგება წყვილისაგან  $\langle \pi_i, t_i \rangle$ , სადაც  $\pi_i \in V_s$  სტოკის პოზიციაა  $i$ -ნაბიჯზე,  $t_i$ -ამ პოზიციაზე ყოფნის დრო.

მოდელი გამოიყენება მხოლოდ ისეთი ქსელებისათვის, რომლის კვანძები ხასიათდებიან უცვლელი მოხმარებული სიმძლავრით ყოველ შესაძლო კონფიგურაციაში. მოხმარებული სიმძლავრე  $p_k^i$  პირდაპირაა დამოკიდებული კვანძის მიერ გენერირებულ და რეტრანსლირებულ ტრაფიკზე.

დამაბოლოებელი მოწყობილობის დანიშნულებაა საკუთარი გადამწოდებიდან მაჩვენებლების ათვლა და მათი ქსელში გადაცემა. ის რეტრანსლატორისაგან იმით განსხვავდება, რომ მონაცემებს გადაცემს თავის გავლით, ორმხრივად.

დამაბოლოებელი მოწყობილობის მიერ მოხმარებული სიმძლავრე:

$$P_{ed} = \frac{P_f t_f + P_a t_a + P_s (t_c - t_f - t_a)}{t_c} \quad (8)$$

$t_c$  - მოწყობილობების მუშაობის ერთი ციკლის ხანგრძლივობაა (წმ),  $P_f$  - მონაცემთა გადაცემისათვის და შემდგომი დადასტურებისათვის მოხმარებული სიმძლავრე (ვტ),  $t_f$  - დრო, რომელიც იხარჯება მონაცემთა გადაცემაზე და დასტურის მიღებაზე (წმ),  $P_a$  - მონაცემთა დამისამართების რეჟიმში მოხმარებული სიმძლავრე (ვტ),  $t_a$  - ჯამური დრო, რომელიც იხარჯება გადამწოდების მაჩვენებლების დამუშავებასა და გადასაცემად (წმ),  $P_s$  - მოხმარებული სიმძლავრე ძილის რეჟიმში (ვტ).

რეტრანსლატორის მიერ მოხმარებული სიმძლავრე გამოითვლება, როგორც:

$$P_r = P_{tx} k_{tx} + P_{rx} k_{rx} + (1 - k_{tx} - k_{rx}) P_{idle} \quad (9)$$

სადაც  $P_{tx}$  - გადაცემის რეჟიმში რეტრანსლატორის საშუალო მოხმარებული სიმძლავრეა,  $P_{rx}$  - მიღების რეჟიმში რეტრანსლატორის საშუალო მოხმარებული სიმძლავრე,  $P_{idle}$  - რეტრანსლატორის მოხმარებული სიმძლავრე ლოდინის რეჟიმში.

მოწყობილობის საშუალო სიმძლავრე მონაცემთა გადაცემის მთელი პროცედურის განმავლობაში იქნება:

$$P_f = \frac{P_a t_{wait} + P_{rx} t_{CCA} + P_{tx} t_{data} + P_{rx} t_{ACK}}{t_f} \quad (10)$$

სადაც  $t_f = t_{wait} + t_{CCA} + t_{data} + t_{ACK}$ .

თუ აქტიურ რეჟიმში გამოსვლის პერიოდია  $t_c$ , პროცესორი მუშაობს  $f_{proc}$  სიხშირეზე, ერთი ოპერაცია იკავებს საშუალოდ C პროცესორულ ციკლს და მოითხოვს შესრულოს M ოპერაცია - გაზომოს, დაამუშაოს შედეგები და მოამზადოს პაკეტი ქსელში გადასაცემად. გათვალისწინებულია აგრეთვე ძილის რეჟიმიდან  $t_r$  გამოსვლის

დრო. მაშინ აქტიურ რეჟიმში ყველა მოქმედების შესრულებისათვის საჭირო დრო იქნება:

$$t_a = \frac{M \cdot C}{f_{proc}} + t_r \quad (11)$$

ქსელის სიცოცხლის დროის მაჩვენებლებია: მაჩვენებელი დამოკიდებული კვანძების რაოდენობაზე, მაჩვენებელი დამოკიდებული ქსელის დაფარვის ზონის ზომაზე, მაჩვენებელი დაფუძნებული ქსელის კავშირების გრაფზე, მაჩვენებელი დამოკიდებული მონაცემთა გადაცემის დაყოვნებაზე.

სიცოცხლის დრო T მთელი ქსელისათვის განისაზღვრება:

$$T = \min_k \tau_k \quad (12)$$

შეიძლება გავაკეთოთ დაკვნა რომ ქსელის სიცოცხლის დროის მაქსიმიზაციისათვის აუცილებელია ვიპოვნოთ ქსელის გრაფის დამოუკიდებელი მარშრუტიზატორების ნაკრების მაქსიმალური რიცხვი.

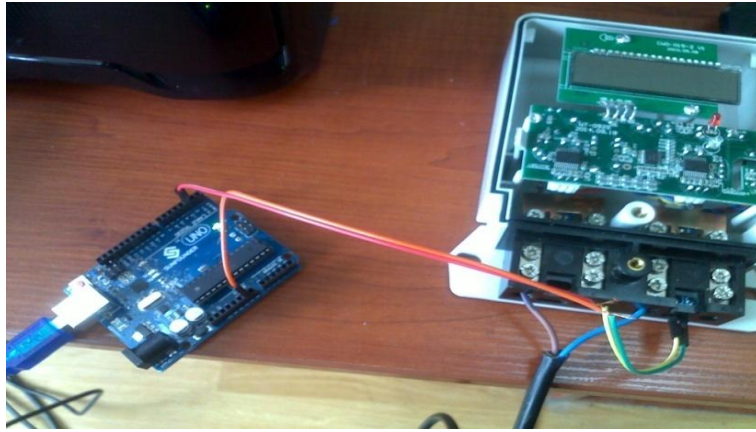
შემოთავაზებული ალგორითმების გამოყენებით საწყისი მუხტის მიუხედავად ყველა მოწყობილობა განიმუხტება ერთდროულად - ტოპოლოგიის გადართვის ალგორითმები უზრუნველყოფენ დახარჯული ენერჯის ოპტიმალურ მართვას. იშვიათი გადართვებისას მოწყობილობების მუხტი დროთა განმავლობაში გათანაბრდება. მაგ, საათში ერთხელ გადართვისას ქსელის სიცოცხლის დრო მცირდება 60,5%-ით, დღეში ერთხელ კი მხოლოდ 6%-ით.

**მეხუთე თავში** აღწერილია ჩვენს მიერ შექმნილი ელექტროენერჯის აღრიცხვის ავტომატიზირებული სისტემის საცდელი ვარიანტი და მისი კვლევის შედეგები. განსაკუთრებული ეფექტი მიიღწევა სენსორული გადამწოდების გამოყენებისას ისეთ სფეროებში, სადაც სენსორული ელემენტების (კვანძების) რაოდენობა შეადგენს ასეულობით და ათასეულობით ერთეულს. ასეთ სფეროთა რიცხვს მიეკუთვნება ელექტროენერჯის განაწილება, მართვა და აღრიცხვა (ბილინგი). ელექტროენერჯის აღრიცხვის ავტომატიზირებული სისტემა წარმოადგენს წინამდებარე სადისერტაციო ნაშრომის ნაწილს, რადგანაც იგი დაფუძნებულია სენსორული კვანძების აგების

პლატფორმაზე - Arduino და სატელეკომუნიკაციო კავშირების უსადენო ტექნოლოგიების გამოყენებაზე. ელექტროენერჯის დისტრიბუციის სისტემაში მოხმარებული ელექტროენერჯის აღრიცხვისათვის (ბილინგი) ამჟამად ძირითადად გამოიყენება ინდუქციური და ელექტრონული მრიცხველები, ფაზების რიცხვის მიხედვით – ერთფაზიანი და სამფაზიანი, ტარიფიკაციის მეთოდის მიხედვით – ერთტარიფიანი და მრავალტარიფიანი. მოხმარებული ელექტროენერჯის მრიცხველებს შორის ტექნოლოგიურად ყველაზე წინწაწეულს წარმოადგენენ ელექტრონული მრიცხველები. ამჟამად მიმდინარეობს მორალურად მოძველებული ინდუქციური მრიცხველების თანდათანობითი შეცვლა ელექტრონულით.

დღეისათვის აქტუალურ ამოცანას წარმოადგენს არსებული ელექტრონული მრიცხველების უმნიშვნელო მოდიფიკაციით მათთვის მონაცემების გადაცემის ქსელებში შესვლის შესაძლებლობის შექმნა. ასეთ დაბალბიუჯეტურ მოწყობილობებს, რომელთა გამოყენება წარმატებით შეიძლება დასახული ამოცანის გადასაჭრელად, წარმოადგენენ ბლოკები Arduino-ს ოჯახიდან. მათგან განვიხილავთ მხოლოდ მიკროკონტროლერ Arduino Uno-ს გამოყენებას მოხმარებული ელექტროენერჯის პროპორციული იმპულსების რაოდენობის დასათვლელად, ელექტრონული მრიცხველის პარალელურად, ამ ინფორმაციის შენახვისა და მონაცემების გადაცემის ქსელით მისი შემდგომი გადაცემის მიზნით.

ელექტროენერჯის ყველაზე მრავალრიცხოვან ელექტრონულ მრიცხველს, რომელიც ამჟამად გამოიყენება საქართველოს ელექტროენერჯის დისტრიბუციის სისტემებში წარმოადგენს KACKAD-101M. ნახ.4. ნაჩვენებია მიკროკონტროლერ Arduino Uno-ს ამ მრიცხველთან მიერთების სქემა.



ნახ.4. მრიცხველი KACKAD-101M-ის შეერთება მიკროკონტროლერ Arduino Uno-სთან

სქემის მოქმედების პრინციპი მდგომარეობს შემდეგში: მრიცხველის მე-6 გამოსასვლელი ჩვეულებრივ გამოიყენება როგორც შემოწმების წერტილი, რომელზეც გამოდის მრიცხველის მიერ გატარებული ელექტროენერჯის რაოდენობის პროპორციული იმპულსების რაოდენობა. აუცილებელია Arduino-ს მიერ დათვლილი მონაცემების შენახვა. გამომდინარე იქედან, რომ ქსელში წყვეტის შემთხვევაში ინფორმაციის დაკარგვა და ანათვლებში ცდომილების წარმოქმნაა მოსალოდნელი, ინფორმაციის შენახვისათვის განვიხილავთ 2 ვარიანტს: პირველი - ინფორმაცია შევინახოთ Arduino-ს ბორდზე არსებულ მეხსიერებაში (512 ბაიტი) ან მეორე - გამოვიყენოთ დამატებითი მეხსიერების ჩიპი 24C02 (256 ბაიტი).

შემოთავაზებული სისტემის ბლოკ სქემა Arduino Uno კონტროლერში დაფიქსირებული ინფორმაციას ელექტროქსელის ბილინგის ცენტრში გადაცემისათვის შეიძლება გამოყენებული იქნას შემდეგი ტელეკომუნიკაციური ტექნოლოგიები:

1. GSM GPRS მოდული SIM900.
2. SPI ინტერფეისი, რომელიც შეგვიძლია გამოვიყენოთ შენახული ინფორმაციის HTTP ტიპის პროტოკოლით გადაცემისათვის.
3. Ethernet მოდული HanRun HR911105A12/18.

ქსელიდან მონაცემები მიიღება საბილინგო სისტემის მიერ. საბილინგო სისტემაში გაერთიანებულია რამოდენიმე სერვერი: ანგარიშსწორების, მონაცემთა ბაზის, მონაცემთა ბაზის კოპირების, Web და კონფიგურაციის სერვერი.



საბილინგო სისტემას აქვს უკუკავშირი Arduino მოწყობილობასთან, რაც გულისხმობს ბილინგის სისტემიდან Arduino მოწყობილობის მართვას (მაგ. დავალინების შემთხვევაში მრიცხველის და შესაბამისად ენერჯის მოხმარების ავტომატურად გათიშვა-ჩართვა), რაც ტექნიკურად ხორციელდება შემდეგი პრინციპით: საბილინგო პროგრამა აღმოაჩენს რა აბონენტისათვის განკუთვნილ უჯრედში აბონენტის დავალიანების არსებობას, ავტომატურად აგენერირებს გამორთვის შეტყობინებას, რომელსაც ზემოთმოყვანილი ტელეკომუნიკაციური ტექნოლოგიით (ქსელებით) გაუგზავნის Arduino ბორდს და Arduino ამ შეტყობინებით გადასცემს ბრძანებას მასთან მიერთებულ აქტორს (სპეციალურ ჩართვა-გამორთვის მძლავრ რელეს) მომხმარებლის ქსელიდან გათიშვაზე. ამ რელეს მიერ გატარებული დენის ძალის მაქსიმუმი უნდა შეესაბამებოდეს აბონენტის მიერ მოხმარებულ მაქსიმალურ სიმძლავრეს. ბილინგის სისტემა ანალოგიურად ასრულებს უკუოპერაციას (მომხმარებლის ქსელში ჩართვას) მოხმარებული ელექტროენერჯის საფასურის გადახდის შემთხვევაში. ცხადია ჩართვა-გამორთვის ეს ოპერაციები სრულდება ბილინგის სისტემიდან ავტომატური მართვით.

სადისერტაციო ნაშრომის დანართში მოყვანილია ჩვენს მიერ შემუშავებული და აღწერილი 3D კონსტრუქცია, დაბალბიუჯეტური Arduino სქემის და თანხლები ელექტრონული კომპონენტების გამოყენებით. მსგავსი კონსტრუქცია შეიძლება წარმატებით იქნას გამოყენებული თანამედროვე მანქანათმშენებლობაში ლითონის და ხის 3D დამუშავების ინდუსტრიაში, 3D პრინტერებში და მექანიზმებში.

## *ძირითადი შედეგები და დასკვნები:*

1. შესწავლილია სენსორული ქსელების განვითარების დღევანდელი მდგომარეობა, ჩატარებულია მისი კრიტიკული ანალიზი.
2. გამოკვლეულია ზემი-ს მოქმედება მფრინავ სენსორულ ქსელებში; ჩამოყალიბებულია ასეთი ქსელების გამოყენების მიზანშეწონილობის პირობები.
3. გამოკვლეულია ქსელის ძირითადი მოწყობილობების, საბოლოო კვანძების, მარშრუტიზატორების (შუალედური კვანძების) და კოორდინატორების ენერგომოხმარება. შემუშავებულია მათი ენერგომოხმარების მინიმიზაციის ალგორითმები.
4. შემუშავებულია ქსელის ტოპოლოგიის გადართვის ალგორითმები, რომლებიც ზრდიან ქსელის სიცოცხლისუნარიანობას.
5. შემუშავებულია სენსორული ქსელის პრაქტიკული მაგალითი - Arduino Uno-ს და მობილური კავშირის ტექნოლოგიების გამოყენებით მოხმარებული ელექტროენერჯის ინდივიდუალური აღრიცხვის ცენტრალიზებული სისტემა, აბონენტების ელექტრომომარაგების ცენტრალური ან დისტანციური ჩართვა-გამორთვის შესაძლებლობით.
6. შემუშავებულია და აღწერილია 3D კონსტრუქცია, დაბალბიუჯეტური Arduino სქემის და თანმხლები ელექტრონული კომპონენტების გამოყენებით. თანამედროვე მანქანათმშენებლობაში, მსგავსი კონსტრუქცია შეიძლება წარმატებით იქნას გამოყენებული ლითონის და ხის 3D დამუშავების ინდუსტრიაში, 3D პრინტერებში და მექანიზმებში.

## გამოქვეყნებული ნაშრომების სია დისერტაციის თემაზე:

1. ჯ.ბერიძე, შ.კვიციანი, ს.მახარაძე, „დაბალბიუჯეტური ARDUINO კონტროლერების გამოყენება ხელსაწყოთმშენებლობაში“ („მანქანები, ტექნოლოგიები, მასალები 2016“, ბულგარეთის მანქანათმშენებლობის სამეცნიერო-ტექნიკური საზოგადოების ორგანიზებით XII საერთაშორისო კონგრესი, ზამთრის სესია, 16-19.03.2016, ბულგარეთი), 23-26 გვ.
2. ს. მახარაძე, ჯ.ბერიძე, „უსადენო ნანოქსელების განვითარების პერსპექტივები“ („ენერგეტიკა: რეგიონალური პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები“, ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის დეპარტამენტი, საინჟინრო ფაკულტეტი, აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, 23-25 ოქტომბერი 2015, ქუთაისი), 142-147 გვ.
3. ს.მახარაძე, ჯ.ბერიძე, „პერსპექტიული და თანამედროვე სენსორული ქსელები“ („მდგრადი ენერგეტიკა: გამოწვევები და განვითარების პერსპექტივები“, ენერგოეფექტურობის ცენტრი საქართველო, ვინროკ ინტერნეიშენალ ჯორჯია, აშშ-ის საერთაშორისო განვითარების სააგენტო (USAID), აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, 18.06.2015, ქუთაისი), 167-172 გვ.
4. ჯ.ბერიძე, ს.მახარაძე, „სენსორული ქსელის და სენსორების არქიტექტურა“, („ბირთვულ-რადიაციული ნანოსენსორები და ნანოსენსორული სისტემები“, საერთაშორისო კონფერენციის კრებული, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ფიზიკის დეპარტამენტი, NATO-ს სამეცნიერო კომიტეტის მხარდაჭერით 6-9 მარტი, 2014, თბილისი, 136-138 გვ.
5. ს. მახარაძე, ჯ.ბერიძე, „უსადენო სენსორული ქსელის სიცოცხლის დროის მაქსიმიზაცია“, <<ინტელექტუალი>>, №31/2016, 183-188 გვ.
6. ს.მახარაძე, ჯ.ბერიძე, „იმპულსური ხელშეშლების გავლენის ანალიზი მფრინავ სენსორულ ქსელებში“, <<საქართველოს საინჟინრო სიახლენი>> №1/2016, 46-50 გვ.

## Abstract

Today, existing technology opportunities are insufficient to satisfy the requirements of the users, such as (hundreds and thousands) of sensory nodes and the new standard development needs have arisen, which allow data transmission with wireless channel, speed to tens and hundreds mbt/sec (1 to 200mbt/sec) from 10 to 100 m transmission distance. Such devices are able to transmit large number of information (voice,video,data) in the autonomous mode (by battery and accumulator). Appropriate standards allow to change conducting connections into such devices, which we have daily contact with (computers, computer networks). Such network installation is possible on the already existing and exploited targets, without additional works.

In the dissertation is discussed one of the most promising and advanced technology in the field of infotelecommunication - analysis characteristics of the wireless sensor networks, construction features of wireless sensor networks, development questions, the results of research in the direction to minimize the energy consumption of the sensory nodes, research problems related to the implementation of the network. Exclusiveness of wireless sensor networks - taking into account self-organization of network, self-restore, self-configuration their use in various fields and identified problems for the further development of such networks. It is shown, that selecting the optimal number of the network routers, also selecting the optimal topology during the coordinator movement of the network, nodes power consumption can be reduced by 80%, what increase life time of the wireless sensory network.