

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

სალომე მახარაძე

# სენსორული სატელეკომუნიკაციო ქსელების აგების მეთოდებისა და მახასიათებლების კვლევა

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა - ტელეკომუნიკაცია შიფრი - 0402

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თბილისი, 0175, საქართველო

ივნისი, 2016 წელი

საავტორო უფლება © 2016 წელი, სალომე მახარაძე  
თბილისი  
2016 წელი

## ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით სალომე მახარაძის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: "სენსორული სატელეკომუნიკაციო ქსელების აგების მეთოდებისა და მახასიათებლების კვლევა" და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

თარიღი 28.06.2016

ხელმძღვანელი:

ბერიძე ჯ. ლ.

რეცენზენტი:

მურჯიკნელი გ.

რეცენზენტი:

ადამია ვ.

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი  
2016 წ.

ავტორი: სალომე მახარაძე

დასახელება: "სენსორული სატელეკომუნიკაციო ქსელების აგების  
მეთოდებისა და მახასიათებლების კვლევა"

ფაკულტეტი: ენერგეტიკა და ტელეკომუნიკაცია

ხარისხი: დოქტორი

სხდომა ჩატარდა: 28 ივნისი 2016 წ.

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ, ზემომოყვანილი დასახელების დისერტაციის გაცნობის მიზნით მოთხოვნის შემთხვევაში, მისი არაკომერციული მიზნებით კოპირებისა და გავრცელების უფლება მინიჭებული აქვს საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტს.

---

ავტორის ხელმოწერა

ავტორი ინარჩუნებს დანარჩენ საგამომცემლო უფლებებს და არც მთლიანი ნაშრომის და არც მისი ცალკეული კომპონენტების გადაბეჭდვა და სხვა რაიმე მეთოდით რეპროდუქცია დაუშვებელია ავტორის წერილობითი ნებართვის გარეშე.

ავტორი ირწმუნება, რომ ნაშრომში გამოყენებული საავტორო უფლებებით დაცული მასალებზე მიღებულია შესაბამისი ნებართვა (გარდა ის მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც მოითხოვენ მხოლოდ სპეციფიურ მიმართებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს პასუხისმგებლობას.

## რეზიუმე

დღეს არსებული ტექნოლოგიების შესაძლებლობები არასაკმარისი აღმოჩნდა ისეთი მომხმარებლების მოთხოვნილებების დასაკმაყოფილებლად, როგორებიცაა დიდი რაოდენობის (ასეული და ათასეულობით) სენსორული კვანძები და წარმოიშვა ისეთი ახალი სტანდარტის შემუშავების მოთხოვნილება, რომელიც საშუალებას იძლევა უსადენო არხით მონაცემთა გადაცემა მოხდეს ათობით და ასობით მბიტ/წმ (1-დან 200 მბიტ/წმ-მდე) სისწრაფით 10-დან 100 მ-მდე გადაცემის მანძილზე. ასეთ მოწყობილობებს შეუძლიათ დიდი მოცულობების ინფორმაციის გადაცემა (ხმა, მონაცემები, ვიდეო) ავტონომიურ რეჟიმში (ელემენტით და აკუმულატორით). შესაბამისი სტანდარტები საშუალებას იძლევა შეიცვალოს გამტარიანი შეერთებები ისეთი მოწყობილობებით, რომელთანაც ყოველდღიურად გვაქვს შეხება (კომპიუტერი, გამოთვლითი ქსელები). ასეთი ქსელების დაყენება შესაძლებელია უკვე არსებულ და ექსპლუატირებულ ობიექტებზე დამატებითი სამუშაოების ჩატარების გარეშე.

დისერტაციაში განხილულია ინფოტელეკომუნიკაციის სფეროში ერთერთი ყველაზე პერსპექტიული და თანამედროვე ტექნოლოგიის - უსადენო სენსორული ქსელების მახასიათებლების ანალიზი, უსადენო სენსორული ქსელების აგების თვისებები, განვითარების საკითხები, სენსორული კვანძების ენერგომომხმარების მინიმიზაციის მიმართულებით ჩატარებული კვლევების შედეგები, ქსელის დანერგვასთან დაკავშირებული საკვლევო პრობლემები. უსადენო სენსორული ქსელების განსაკუთრებულობების - ქსელის თვითორგანიზების, თვითაღდგენის, თვითკონფიგურირების გათვალისწინებით მათი გამოყენება სხვადასხვა სფეროებში და გამოკვეთილია პრობლემები ასეთი ქსელების შემდგომი განვითარებისათვის. ნაჩვენებია, რომ ქსელის მარშრუტიზატორების ოპტიმალური რიცხვის შერჩევით, აგრეთვე ქსელის კოორდინატორის გადაადგილების დროს ოპტიმალური ტოპოლოგიის შერჩევით, კვანძების ენერგომომხმარება შესაძლებელია შემცირდეს 80%-ით, რაც შესაბამისად ზრდის უსადენო სენსორული ქსელის სიცოცხლის დროს.

## **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.

# სარჩევი

რეზიუმე -----	4
Abstract -----	5
ცხრილების ნუსხა -----	8
ნახაზების ნუსხა -----	9
გამოყენებული აბრევიატურების ნუსხა -----	11
შესავალი -----	14
<b>თავი I. საგნების ინტერნეტი -----</b>	<b>20</b>
1.1. ტრილიონი ქსელი -----	20
1.1.1. უსადენო პერსონალური ქსელების WPAN ტექნოლოგიები -----	23
1.1.2. WSN პროექტების მიმოხილვა -----	26
1.2. საგნების ინტერნეტის სტანდარტიზაცია -----	30
1.3. სენსორული ქსელის შექმნის ისტორია -----	34
1.4. კავშირის ქსელების განვითარების ახალი კონცეფციები და პროგნოზები -----	36
1.4.1. თვითორგანიზებადი ქსელები IoT კონცეფციით -----	40
1.4.2. მუნიციპალური ქსელი -----	42
1.4.3. მედიცინის ქსელი -----	45
<b>თავი II. ინფორმაციის გადაცემა უსადენო სენსორულ ქსელებში -----</b>	<b>49</b>
2.1. მობილური ქსელების საბაზო სადგურების გამოყენება უსადენო სენსორული ქსელის სათავო კვანძებად -----	49
2.2. უსქ-ის კვანძიდან შეტყობინების მიტანის ალბათობა სხვა მობილური ქსელების საბაზო სადგურების გამოყენებით -----	51
2.3. მფრინავი სენსორული ქსელები -----	54
2.4. ინფორმაციის გადაცემის ხელშეშლამდგრადობა მფრინავ სენსორულ ქსელებში -----	58
<b>თავი III. ყველგანშეღწევადი სენსორული ქსელები და მათი ფუნქციონირების ალგორითმები -----</b>	<b>64</b>
3.1. სენსორული ქსელების არქიტექტურა -----	64
3.2. სენსორული კვანძების არქიტექტურა -----	67
3.3. USN-ში მარშრუტიზაციის ალგორითმების კლასიფიკაცია -----	71
3.4. კლასტერში სათავო კვანძის ამორჩევის ალგორითმები -----	76
3.4.1. სათავო კვანძის შემთხვევითი ამორჩევის ალგორითმი LEACH ----	76
3.4.2. HEED ალგორითმი სათავო კვანძის წინასწარ განსაზღვრული არჩევით -----	78
3.4.3. სათავო კვანძის შემთხვევითი ამორჩევის ალგორითმი ERA -----	79
3.4.4. PEGASIS ალგორითმი და იერარქიული PEGASIS -----	79
3.4.5. RRCH ალგორითმი -----	81
3.5. კლასტერიზაციის განაწილებული ალგორითმი -----	81

3.5.1. მობილური სენსორული ქსელი -----	81
3.5.2. პროგნოზირების კომბინირებული კრიტერიუმი -----	88
3.5.2.1. დაკავშირების კრიტერიუმი -----	88
3.5.2.2. დაფარვის კრიტერიუმი -----	89
3.5.2.3. მობილურობის კრიტერიუმი -----	90
3.5.2.4. დარჩენილი ენერჯის კრიტერიუმი -----	91
3.6. დაფარვა და სიმკვრივე უსადენო სენსორულ ქსელებში -----	91
<b>თავი IV. უსადენო სენსორული ქსელის სიცოცხლის დრო</b> -----	96
4.1. ტერმინი „ქსელის სიცოცხლე“ -----	96
4.2. უსქ-ს სიცოცხლის დროის გაზრდის მეთოდი -----	97
4.3. ენერგეტიკული ბალანსირების მეთოდები -----	99
4.4. უსქ-ის სიცოცხლის დროის და მოხმარებული სიმძლავრის გამოთვლა -----	103
4.5. დამაბოლოებელი მოწყობილობის სიცოცხლის დრო -----	105
4.6. მარშრუტიზატორის სიცოცხლის დრო -----	107
4.7. მოწყობილობის მიერ მოხმარებული სიმძლავრის გამოთვლა -----	109
4.8. ქსელის სიცოცხლის მაჩვენებელი -----	113
4.9. დინამიურად რეკონფიგურირებადი ქსელის სიცოცხლის დროის შეფასება -----	116
4.10. სტოკის მოძრაობის დაგეგმვა -----	117
4.11. პროგნოზირებადი მობილური სტოკი -----	118
<b>თავი V. მოხმარებული ელექტროენერჯის აღრიცხვისა და მართვის სისტემა უსადენო ტელეკომუნიკაციური მეთოდების გამოყენებით</b> ---	125
5.1 მოხმარებული ელექტროენერჯის აღრიცხვის ორგანიზაციის მოქმედი სისტემა -----	125
5.2. მოხმარებული ელექტროენერჯის აღრიცხვის სისტემა Arduino-ს ელექტრონული მოწყობილობების გამოყენებით -----	126
დასკვნა -----	136
დანართი 1 -----	136
გამოყენებული ლიტერატურის ნუსხა -----	146

## ცხრილების ნუსხა

2.1. ზოგიერთი პრობლემები, რომლებიც წარმოიშობა უსქ-ის მიწისპირა სტრუქტურის აგებისას -----	57
3.1. მარშრუტიზაციის ალგორითმების კლასიფიკაცია -----	73
3.2. LEACH-M ალგორითმის საწყისი პარამეტრები -----	86
3.3. R <sub>c</sub> /R <sub>s</sub> დამოკიდებულების გავლენა ქსელის მწარმოებლურობაზე --	94
4.1. დროის განაწილება პაკეტის გადაცემის სტადიებზე IEEE 802.15.4 ციფრული ქსელის სტანდარტებში -----	112
4.2. პაკეტის გადაცემის სტადიისა და უსქ-ის მოწყობილობის მუშაობის რეჟიმის შესაბამისობა -----	112



## ნახაზების ნუსხა

1.1. სენსორული ქსელის კვანძის პროტოტიპის ფუნქციონალური სქემა -----	27
1.2 გლობალური უსქ-ს სტრუქტურული სქემა -----	29
1.3. კომუნიკაციის ახალი მიმართულება საგნების ინტერნეტის რეალიზებით -----	31
1.4. USN ქსელის გამოყენების სფეროები -----	37
1.5. SUN კონცეპტუალური მოდელის სტრუქტურა -----	37
1.6. საგნების ინტერნეტის სტრუქტურა -----	38
1.7. WEB of Things არქიტექტურა -----	39
1.8. M2M-ის სტრუქტურა -----	39
1.9. თვითორგანიზებადი ქსელის არქიტექტურა -----	40
1.10. Ad Hoc ქსელის არქიტექტურა -----	43
1.11. ადამიანის სხეულზე და სხეულში სენსორული კვანძების განლაგება -----	45
1.12. WBAN ქსელის ტოპოლოგია -----	47
2.1. კვანძის კავშირის ალბათობის დამოკიდებულება რაუნდების რიცხვზე სათავო კვანძის სხვადასხვა წილისათვის -----	52
2.2. დმსკ მიღწევის ალბათობის ცვლილება დროის მიხედვით მისი გადაადგილების სხვადასხვა სიჩქარისათვის -----	53
2.3. მფრინავი სენსორული ქსელი უპილოტო საფრენი აპარატით --	56
2.4. FUSN მიწისპირა სეგმენტის ტიპიური სტრუქტურა -----	60
3.1. სენსორული ქსელის შეერთება PSTN-თან -----	65
3.2. USN კლასტერული არქიტექტურა -----	65
3.3. სენსორული კვანძის არქიტექტურა -----	67
3.4. აქტორული კვანძის არქიტექტურა -----	69
3.5. კომბინირებული სენსორული კვანძის არქიტექტურა -----	70
3.6. პასიური RFID-ის არქიტექტურა -----	70
3.7. რაუნდი -----	83
3.8. LEACH-M და SCA ალგორითმისათვის დაფარვის შედარება -----	87
3.9. თანხვედრა სენსორულ ქსელში -----	88
4.1. უსქ ქსელის ტოპოლოგიები -----	105
4.2. დამაბოლოებელი მოწყობილობის მუშაობის ციკლი -----	106
4.3. ციფრული ქსელის მარშრუტიზატორის მოდელი -----	108
4.4. IEEE 802.15.4 სტანდარტის საარხო და ფიზიკური დონის კადრის ფორმატი -----	110
4.5. IEEE 802.15.4 სტანდარტის დადასტურების კადრის ფორმატი ----	111
4.6. ქსელის სიცოცხლის დროის მაჩვენებლის ცვლილება -----	114
4.7. სტოკის პროგნოზირებადი მობილურობა -----	118
5.1. მრიცხველი KACKAD-101M -----	127
5.2. მრიცხველი KACKAD-101M-ის შეერთება მიკროკონტროლერ Arduino Uno-სთან -----	128

5.3. ჩიპი 24C02-ის ჩართვის სქემა -----	128
5.4. Arduino პროგრამული უზრუნველყოფის კოდი -----	130
5.5. რელე მმართველი კონტაქტით -----	130
5.6. ელექტროენერგიის აღრიცხვის ბილინგის ცენტრში გადაცემის სისტემის ბლოკ-სქემა -----	131
5.7. GSM GPRS მოდული -----	131
5.8. SPI ინტერფეისით ინფორმაციის გადაცემა -----	132
5.9. Ethernet მოდული HanRun HR911105A12/18 -----	132
5.10. საბილინგო სისტემა -----	133

## გამოყენებული აბრევიატურების ნუსხა

ARM	Architectural Reference Model	ეტალონური არქიტექტურის მოდელი
BNC	BNN Network Controller	ქსელური კონტროლერი
DCA	Distributed Clustering Algorithm	კლასტერიზაციის განაწილებული ალგორითმი
DM	Domain Management	დომენით მართვა
DSN	Distributed Sensor Networks	განაწილებული სენსორული ქსელი
FUSN	Flying ubiquitous sensor Networks	მფრინავი სენსორული ქსელები
GPS	Global Positioning System	გლობალური პოზიციონირების სისტემა
GSI	Global standards Initiative	გლობალური ინიციატივის სტანდარტიზაციის სექტორი
GW	GateWay	რაბი
HANET	Home Ad Hoc Networks	მუნიციპალური ქსელი
HBC	Human Body Communication	ადამიანის სხეულის კომუნიკაცია
HEED	Hybrid Energy Efficient Distributed	ჰიბრიდული განაწილებული ენერჯო ეფექტურობა
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	ელექტროტექნიკისა და ელექტრონიკის ინჟინრების ინსტიტუტი
IETF	Internet Engineering Task Force	ინტერნეტის ინჟინრული საბჭო
IERC	IoT European Research Cluster	საგნების ინტერნეტის ევროპული მკვლევარი კლასტერი
IMS	IP Multimedia Subsystem	IP მულტიმედიური კავშირის ქვესისტემა
IoNT	Internet of Nanothings	ნანოსაგნების ინტერნეტი
IoT	Internett of Things	საგნების ინტერნეტი
IoT-GSI	Global Standards Initiative on Internet of Things	საგნების ინტერნეტის გლობალური სტანდარტიზაციის ინიციატივა
IoT-A	Internet of Things Architecture	საგნების ინტერნეტის არქიტექტურა
IPSO	IP for Smart objects	IP პროტოკოლი ჭკვიანი

ISO	International Organization for Standardization	ობიექტებისათვის სტანდარტიზაციის საერთაშორისო ორგანიზაცია
ITU	International Telecommunication Union	ტელეკომუნიკაციის საერთაშორისო კავშირი
LEACH	Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy	ენერჯის დაბალი მოხმარებით ადაპტიური კლასტერიზაცია
LEACH-M	Mobile Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy	მობილური ალგორითმი ადაპტიური კლასტერიზაციით ენერჯის დაბალი მოხმარებით
LR-WPAN	Low Rate Wireless Personal Area Network	დაბალსიჩქარიანი უსადენო პერსონალური ქსელი
LTE	Long Term Evolution	ხანგრძლივი ევოლუციის ქსელი
MBAN	Medicine Body Area Network	მედიცინის ქსელი
M2M	Machine-to-Machine	მანქანათშორისო კომუნიკაცია
MOC	Machine Oriented Communications	მანქანათშორისი ორიენტირებული კომუნიკაცია
MSN	Mobile Sensor Networks	მობილური სენსორული ქსელი
NB	Narrowband	ვიწროზოლოვანი
NE	Network Element	ქსელის ელემენტები
NFC	Near Field Communication	მცირე რადიუსის მოქმედების კომუნიკაცია
NM	Network Management	ქსელის მართვა
NoC	Network on chip	ქსელი-ჩიპზე
OS	Operating system	ოპერაციული სისტემა
PEGASIS	Power-Efficient Gathering Sensor Information Systems	სენსორებისაგან სიმძლავრის ინფორმაციის შეკრების სისტემა
PSTN	Public Switched Telephone Network	საერთო სარგებლობის სატელეფონო ქსელი
RRCH	Round Robin Cluster Head	ციკლური რიგითობის სათავო კლასტერი
RFID	Radio Frequency Identification	რადიო სიხშირული იდენტიფიკაციის მეთოდი
RSS	Received Signal Strength	მისაღები სიგნალის

SO	Smart Objects	სიმძლავრე
SoC	System on Chip	ჭკვიანი ობიექტები
SON	Self Organization Network	სისტემა კრისტალზე
SWN	Smart Ubiquitous Networks	თვითორგანიზებადი ქსელი
		ჭკვიანი ყველგანშეღწევადი
		ქსელები
SPP	Surface Plasmon Polariton	პლაზმურ-პოლარული
		ტალღის ზედაპირი
USN	Ubiquitous sensor Networks	უსადენო
		(ყველგანშეღწევადი)
		სენსორული ქსელი
UWB	Ultra WideBand	ზეფართოზოლოვანი
VANET	Vehicular Ad Hoc Networks	ქსელი სატრანსპორტო
		საშუალებებისათვის
WBAN	Wireless Body Area Network	სხეულზე განთავსებული
		უსადენო ქსელები
WiNoC	Wireless Network Chip	უსადენო ქსელის შემუშავება
		ჩიპზე
WMN	Wireless Mesh Networks	უსადენო უჯრედოვანი
		ქსელი
WoT	Web of Things	ვებ საგნების ინტერნეტი
WSN	Wireless Sensor Network	უსადენო სენსორული
		ქსელი
დმსკ	დროებითი მობილური სათავო	
	კვანძი	
მსქ	მფრინავი სენსორული ქსელები	
უსკ	უსადენო სენსორული კვანძები	
უსქ	უსადენო სენსორული ქსელი	
სს	საბაზო სადგური	

## შესავალი

*პრობლემის აქტუალობა.* 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 ენერგომომხარებით, აღჭურვილები რადიო მიმღებ-გადამცემებით, რომელთაც უნარი შესწევთ გაერთიანდნენ ქსელში და ურთიერთქმედდნენ ერთმანეთთან უსადენო კავშირის არხით.

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 მოჰყვება 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 ქსელის მნიშვნელოვან განსაკუთრებულობას წარმოადგენს ასეთი ქსელების თვითორგანიზების ბუნება. ლოკალურად დაჯგუფებული კვანძები ერთმანეთს შორის ქმნიან ქსელს და ერთი ან რამდენიმე რაბით 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 მიმართულებებს წარმოადგენს ახალი აპარატურული პლატფორმის შექმნა, ქსელური პროტოკოლების სტეკის და სპეციალიზირებული ოპერატიული სისტემების შემუშავება, გარემოში შეღწევის ალგორითმების შემუშავება და მარშრუტიზაცია ქსელური რთული 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, 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 სისტემების მონიტორინგისათვის უსქ-ის გამოყენებით.

დასახული მიზნის მიღწევისათვის გადაწყვეტილი იქნა შემდეგი ამოცანები:

1. უსადენო სენსორული ქსელის არქიტექტურის, დამატებების და პროტოკოლების 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 სისტემების მონიტორინგისათვის უსქ-ის გამოყენებით.

**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 ოპტიმალური გაწერის დამყარებას. დისერტაციის ძირითადი შედეგები, რომლებიც წარმოადგენენ მეცნიერულ სიახლეს:

1. მოცემულია სენსორული ქსელის სიცოცხლის დროის განსაზღვრის ალგორითმები, რომლებიც საშუალებას იძლევა დაფიქსირდეს მისი მწყობრიდან გამოსვლის მომენტი თვითაღდგენის შესაძლებლობის გათვალისწინებით.
2. სენსორული ქსელის სიცოცხლის დროის შეფასება 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, დაგეგმისათვის 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: „ბირთვული-რადიაციული ნაწილაკების დაცვა და ნაწილაკების სისტემები“ (საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ფიზიკის დეპარტამენტი, NATO-ს სამეცნიერო კომიტეტის მხარდაჭერით 6-9 მარტი, 2014, თბილისი); „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); „ენერგეტიკა: რეგიონალური პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები“ (ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის დეპარტამენტი, საინჟინრო ფაკულტეტი, აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, 23-25 ოქტომბერი 2015, ქუთაისი); ”მანქანები, ტექნოლოგიები, მასალები 2016” (ბულგარეთის მანქანათმშენებლობის სამეცნიერო-ტექნიკური საზოგადოების ორგანიზებით XII საერთაშორისო კონგრესი, ზამთრის სესია, 16-19.03.2016, ბულგარეთი).

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

**ძირითადი დებულებები გატანილი დაცვაზე:**

1. სენსორული ქსელის კვანძების ენერგომოხმარების შემცირების ალგორითმები.
2. თვითაღმდგენი სენსორული ქსელის სიცოცხლის დროის განსაზღვრა.
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. ხელშეშლამდგრადობის ამაღლების 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.

## თავი I. საგნების ინტერნეტი

### 1.1. “ტრილიონი ქსელი”

„ტრილიონი ქსელი“ - ადეკვატურად ასახავს საერთო სარგებლობის კავშირის ქსელის განვითარების ახალ ეტაპს. გადასვლა „ტრილიონ ქსელზე“ 2020 წლამდე წარმოადგენს ტელეკომუნიკაციის სფეროში წინმსწრებ ტექნოლოგიურ სამეცნიერო და ინჟინრულ პროგრესს. საგნების ინტერნეტის კონცეფცია ფორმირებულია ტელეკომუნიკაციის საერთაშორისო კავშირის (ITU) სტანდარტიზაციის სექტორის მიერ 2011წ. ტრილიონი ქსელი განსხვავებით არსებულისაგან, გათვლილია ერთეულ ან რამდენიმე ათეულ მილიარდ მომხმარებელზე. ქსელი უნდა იყოს თვითორგანიზებადი, რაც საშუალებას იძლევა პრინციპულად შემცირდეს ქსელის კვანძების რიცხვი, რომელიც მუდმივად აქტიურ მდგომარეობაში იმყოფება. თვითორგანიზებადი ქსელის კვანძების უმეტესობა უნდა იმყოფებოდეს მძინარე მდგომარეობაში ან უნდა უზრუნველყოფდეს ენერჯის “ჭკვიანურ” მოხმარებას ტრილიონ ქსელში.

თვითორგანიზებადი ეწოდება ქსელს რომელშიც კვანძების რიცხვი შემთხვევითია. სიდიდის მიხედვით შეიძლება იცვლებოდეს 0-დან რაღაც  $N_{max}$  მნიშვნელობამდე და ქსელი იქმნება ამა თუ იმ მიზნის მისაღწევად ან ინფორმაციის გადაცემისათვის საერთო სარგებლობის ქსელში, ან სხვა ქსელში.

სენსორული ქსელის დანართებს შორის შეიძლება გამოიყოს უკვე დღეს ფუნქციონირებადი:

- უსადენო (ყველგანშეღწევადი) სენსორული ქსელი (USN-Ubiquitous sensor Networks);
- ქსელი სატრანსპორტო საშუალებებისათვის (VANET-Vehicular Ad Hoc Networks);
- მუნიციპალური ქსელი (HANET-Home Ad Hoc Networks);
- მედიცინის ქსელი (MBAN-Medicine Body Area Network).

შემოთავაზებული დანერგილი ტექნოლოგიებიდან უფრო მნიშვნელოვანს წარმოადგენს USN ქსელი, რომელიც წარმოადგენს საგნების ინტერნეტის ტექნოლოგიურ საფუძველს.

პრინციპიალური ცვლილება საერთო სარგებლობის ქსელის, პროგნოზირებადი დაგეგმვის ჰორიზონტზე (2020 წლამდე) და შემდგომ პერიოდში - საგნების ინტერნეტის კონცეფციის დანერგვისას, მოითხოვს ქსელების არქიტექტურის მოდერნიზაციას თვითორგანიზებადი ქსელების მიმართულებით, საბაზო სტრუქტურის გადახედვას ტრილიონი ქსელის შექმნისათვის.

ტრილიონი ქსელის შექმნა წარმოშობს მეცნიერების წინაშე ახალი ამოცანების გადაწყვეტის საკითხებს: ქსელის არქიტექტურის შემუშავება, ახალი ენერჯის დაზოგვის ტექნოლოგიების შექმნა, ტრაფიკის გამოკვლევა, მარშრუტიზაციის ალგორითმების შემუშავება, კლასტერულ ქსელში ქსელის სიცოცხლის ციკლის გახანგრძლივება, უსაფრთხოების ამოცანების გადაწყვეტა და ა.შ.

კაცობრიობა მრავალი საუკუნის მანძილზე ცდილობდა შეეგროვებინა და ემართა საზოგადოებაში და ბუნებაში მიმდინარე პროცესები. ადრე ეს ხდებოდა პრიმიტიული საშუალებებით და იკავებდა დიდ დროს. მეცნიერებების და ტექნიკის განვითარებით შემცირდა დრო პროცესების ანალიზის შესწავლისათვის. XX საუკუნის მეორე ნახევრიდან დაწყებული კომპიუტერული ტექნიკის სწრაფი განვითარების შედეგად, ინფორმაციული ტექნოლოგიების განვითარებამ ადამიანს შესაძლებლობა მისცა მართოს არამარტო საზოგადოებრივი, ასევე ბუნების პროცესებიც. ისეთი ბუნების პროცესები, როგორცაა კლიმატის სწრაფი ცვლილება, მიწისძვრების პროგნოზირება, გარემოს დაბინძურება, რადიაციული საშიშროება და სხვა. ეს ყველაფერი შესაძლებელი გახდა ახალი ტექნოლოგიის გამოჩენის შემდეგ, რომელსაც მიეკუთვნება უსადენო სენსორული ქსელი (უსქ) [1].

უსქ-ს ძირითად ელემენტს წარმოადგენს სენსორი, რომელიც არეგისტრირებს განსაზღვრული პარამეტრების ცვლილებას, მაგ.: ტემპერატურა, წნევა, ჰაერის ან ნიადაგის ტენიანობა, ხმა, მაგნიტური ველი, რადიაცია და სხვ. პირველი სენსორის

გამოყენება ნაკლებ ეფექტური იყო თავისი დიდი ზომების გამო. მიკროელექტრონიკის წარმატებები საშუალებას იძლევა ერთ სქემაზე ინტეგრირებული იქნას სხვადასხვა სახეობის ტექნოლოგია. შედეგად შესაძლებელი გახდა მიკროპროცესორისა და რადიომოდემის ინტეგრაცია, რაც უზრუნველყოფს ტექნოლოგიურ შესაძლებლობას ერთ სქემაზე რეალიზებულ იქნას სხვადასხვა სახეობის ქსელური პროტოკოლები.

ციფრული რადიოკავშირის ელემენტების პატარა ზომები და მათი შესაძლებლობა, მათი ქსელური ურთიერთქმედების მთელი სპექტრის გამოჩენა, მართვის ახალი საშუალებების გამოყენება და დაკვირვება სივრცეში განლაგებულ ობიექტებზე, იაფი, დაბალი სიმძლავრის საკომუნიკაციო მოწყობილობის განთავსება უშუალოდ მიმდინარე ფიზიკური პროცესების ახლოს, იძლევიან დიდი მოცულობების ინფორმაციების შეგროვებისა და დამუშავების საშუალებას, ამასთანავე ცვლიან ამ ინფორმაციებს და ახდენენ თავიანთი მოქმედების კოორდინირებას. თუ ამ შესაძლებლობას გავაერთიანებთ Internet ტექნოლოგიასთან, მაშინ მიიღება ინსტრუმენტი, რომელიც უზრუნველყოფს ზუსტ წარმოდგენას მსოფლიოს რეალურ მოვლენებზე.

მომავლის უსქ-ის ძირითადი კრიტერიუმებია:

- უნდა არსებობდეს უსადენო ქსელი, რომელიც შედგება ათი-ათასობით სენსორისაგან (ქსელის კვანძი), რომელიც დაფარავს ნებისმიერ ზონას და შეასრულებს მასზე დაკისრებულ ნებისმიერ ამოცანას.
- ქსელში შემავალი სენსორული კვანძები უნდა თვითორგანიზირდებოდეს უსადენო სენსორულ ქსელში, რომელსაც შეუძლია გადასცეს ინფორმაცია ქსელის ორ ნებისმიერ სენსორს შორის, გადაცემის მოთხოვნილი სიჩქარით და ხარისხით; მოიხმაროს ძალიან მცირე რაოდენობის ენერგია, იმუშაოს რამდენიმე წლის განმავლობაში მკვებავი ელემენტის შეცვლისა და დამუხტვის გარეშე; ძალიან სწრაფად რეაგირებდეს, იყოს შეუმჩნეველი და ექსპლუატაციისას ძალიან საიმედო, ჰქონდეს დაბალი ღირებულება.

არსებული ექსპერიმენტალური უსქ ნაწილობრივ აკმაყოფილებენ ზემოთ ჩამოთვლილ მოთხოვნებს. დღეისათვის ქსელები შედგებიან მხოლოდ ასეული სენსორისაგან შეზღუდული დაფარვის ზონით და ასრულებენ მხოლოდ კონკრეტულად განსაზღვრულ ამოცანებს. მათ შეუძლიათ გადასცენ მხოლოდ განსაზღვრული ტიპის ინფორმაცია ერთი გადამცემიდან მეორეს და მხოლოდ გატარების მოცემულ ზოლში.

ენერჯის მოხმარების მხრივ შეიძლება ითქვას რომ სიტუაცია არასახარბიელოა - დამუხტული ელემენტი საკმარისია მხოლოდ სენსორული კვანძის რამდენიმე დღით კვებისათვის. ენერჯის წყაროს სრულყოფისათვის და აპარატურის ენერგომოხმარების შემცირებისათვის საჭიროა ამ სფეროში კვლევა, გარემოდან ენერჯის შეგროვების, ენერგომოხმარების მართვის ალგორითმების უფრო ეფექტური ალგორითმების შემუშავება და ელემენტის ოპტიმალურად გამოყენების გზების პოვნა. მნიშვნელოვანია ელემენტის დამუხტვის ხარისხის განსაზღვრის მეთოდის ან მათი დარჩენილი ენერჯის გამოკვლევა. უსქ-ში ქსელის სიცოცხლის გახანგრძლივებისათვის შეიძლება შემუშავებული იქნას პროტოკოლები, რომელიც საშუალებას იძლევა გამოყენებული იქნას კვანძებში დარჩენილი ენერჯია ოპტიმალური საკომუნიკაციო მარშრუტის გამოთვლა-რეალიზაციისათვის.

გადაცემის უსადენო ქსელის ტექნოლოგია ერთერთი მოწინავე კომპიუტერული ქსელური ტექნოლოგიაა. თავდაპირველად ტექნოლოგიის შემუშავება ჩატარდა რამდენიმე უნივერსიტეტის მიერ. ყველაზე წარმატებული აღმოჩნდა კალიფორნიის შტატის ბერკლის უნივერსიტეტში პროფესორ კრისტოფერ პისტერის ნამუშევარი DARPA [2].

### **1.1.1. უსადენო პერსონალური ქსელების WPAN ტექნოლოგიები**

გავრცელებულმა უსადენო ქსელმა სტანდარტით IEEE 802.11 განაპირობა შექმნილიყო ახალი თვითორგანიზებადი ქსელები, რომლებიც მუშაობენ ინფრასტრუქტურის გარეშე. თვითორგანიზებადი ქსელები ისევე როგორც კავშირის ყველა ქსელი, შედგება შედწვევის ქსელისა და სატრანზიტო ქსელისაგან. შედწვევის ქსელს ეწოდება AdHoc და სატრანზიტო ქსელს mesh (უჯრედოვანი). AdHoc ქსელის კვანძებს არ

გააჩნიათ მარშრუტიზაციის ფუნქცია და შეუძლიათ განახორციელონ ურთიერთკავშირი ახლომდებარე კვანძებთან. ამასთან დაკავშირებით საკმაოდ ხშირად AdHoc კვანძებს ეწოდებათ შვილობილი.

NGN (Next Generation Network) 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 კვანძისაგან. ამ ახალი ტექნოლოგიის სწრაფმა განვითარებამ, საგნების ინტერნეტის (IoT-Internet of Things) და ვებ საგნების (WoT-Web of Things) კონცეფციის ჩამოყალიბებამ გამოიწვია სენსორული ქსელების განვითარების პერსპექტივების გადახედვა. მიჩნეულია, რომ თანამედროვე პროგნოზის მიხედვით სენსორული კვანძების რაოდენობა 2017-2020 წწ-თვის შეადგენს 7 ტილიონს 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.

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.

უსადენო პერსონალური ქსელი IEEE 802.15.4 პოულობს თავის გამოყენებას სენსორული ქსელების სფეროში. ხშირად ასეთი ქსელები იწოდებიან LR-WPAN (Low Rate Wireless Personal Area Network-დაბალსიჩქარიანი უსადენო პერსონალური ქსელი).



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

სინამდვილეში სენსორების შემუშავება და წარმოება ყოველი კონკრეტული ქსელისთვის საკმაოდ ძვირია. როგორც სხვა ნებისმიერი ქსელური ტექნოლოგია, ისიც საჭიროებს სტანდარტიზაციას. უსადენო სენსორული ქსელის სახით შემუშავებულია სტანდარტი IEEE 802.15.4 (ZigBee), ეს სტანდარტი ორიენტირებულია ძირითადად გამოყენებულ იქნას როგორც კავშირის საშუალება ავტონომიურ მოწყობილობების ნაკრებებს შორის, რომელიც გვთავაზობს სხვადასხვა ტოპოლოგიის ქსელების მხარდაჭერას.

IEEE 802.15.4 სტანდარტი ითვალისწინებს არც თუ დიდ მოქმედების რადიუსს (დაახლოებით 10 მ), და არხის გატარების შესაძლებლობას 250 კბიტ/წმ-მდე. გადაცემა ამ სიჩქარეზე მიმდინარეობს 2,4 გჰც დიაპაზონში (არალიცენზირებადი ISM დიაპაზონი). მცირე სიმძლავრე და სიჩქარე განპირობებულია მცირე ენერგორესურსებით. მიღწევადია ასევე დიაპაზონები 868 მგჰც (20 კბიტ/წმ) და 908-928 მგჰც (40 კბიტ/წმ). მოცემული სტანდარტი შეავსებს ვაკუუმს უსადენო ქსელური ტექნოლოგიის სპექტრში, რამდენადაც ის გვთავაზობს იაფი პროდუქტების შექმნის შესაძლებლობას, ძალიან დაბალი მოხმარების სიმძლავრით და საგანგებოდ უსადენო ქსელის მხარდაჭერისათვის საჭირო მოქნილ ფუნქციებს [3].

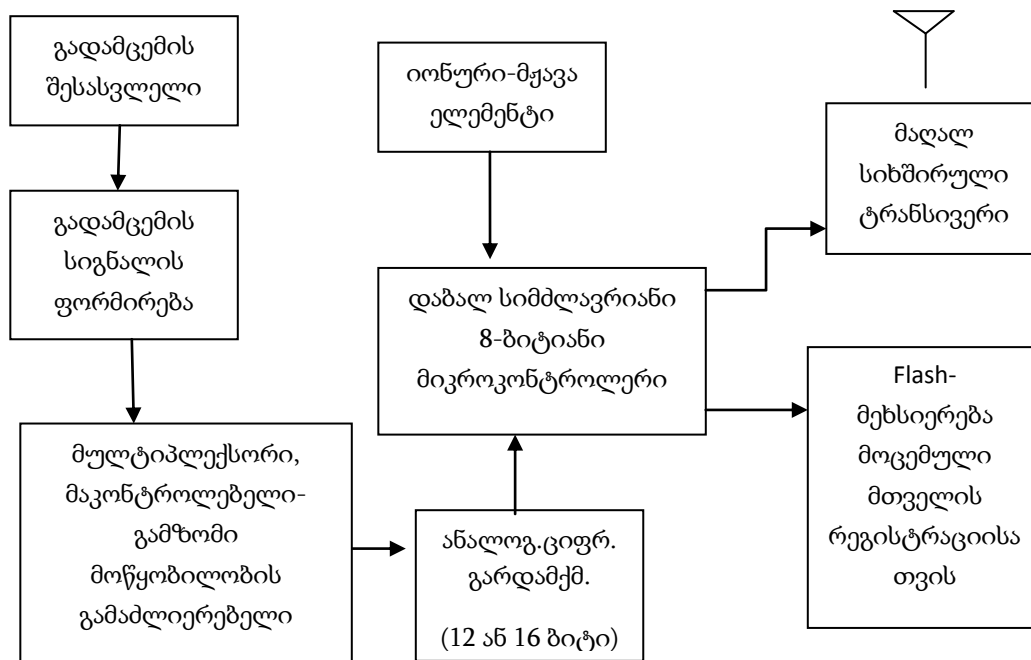
უსადენო სენსორული ქსელის ინდივიდუალური მოწყობილობები ფლობენ შეზღუდულ რესურსებს, როგორცაა მონაცემთა დამუშავების სიჩქარე, მეხსიერების მოცულობა, გატარების შესაძლებლობა. ენერჯის ეკონომიისათვის სენსორული მოწყობილობების კომპონენტების დიდი ნაწილი თითქმის ყოველთვის იმყოფება გამორთულ მდგომარეობაში, ამიტომ შესაძლებელია სხვადასხვა ვარიაციების ქსელის შეკავშირება იმის გათვალისწინებით, რომ რეალური შესაძლებლობის მოწყობილობების მიერ, ექსპლუატაციისას უარის თქმა შესაძლებელია, რთული ბუნების პირობების მიზეზით. სენსორული ქსელი ბაზირდება სამ ტექნოლოგიაზე: სენსორული აღქმა, კომუნიკაცია და კომპიუტერული დამუშავება.

## 1.1.2. WSN პროექტების მიმოხილვა

არსებობს სხვადასხვა პროექტები, რომლებიც მიმართულია სენსორული ქსელის მიერ მოხმარებული ენერჯის შემცირებაზე. ერთ-ერთ ასეთ პროექტს წარმოადგენს WiseNet, რომლის მიზანია შეიქმნას პლატფორმა სენსორული ქსელის რეალიზებისათვის კვანძების მიერ მინიმალური ენერჯო მოხმარებით. მოითხოვება რომ კვანძმა ავტონომიურად იფუნქციონიროს რამდენიმე წელი ჩვეულებრივი ელემენტით. ენერჯო მოხმარების შემცირებისათვის კვანძების უმეტესობა იმყოფება „ძილის“ მდგომარეობაში, ხოლო მონაცემთა გადაცემისას ერთი კვანძიდან მეორეში, ორივე კვანძის მიმღებ-გამცემი უნდა იმყოფებოდეს აქტიურ მდგომარეობაში - კვანძების კომუნიკაციისას იმატებს ენერჯომოხმარება არა მხოლოდ უშუალოდ მონაცემების გადაცემის მიზნით, არამედ კვანძების გააქტიურების მოთხოვნილებასთან დაკავშირებით. WiseNet ძირითად კომპონენტებს წარმოადგენენ ორიგინალური ენერჯოშემნახველი რადიო მიმღებ-გადამცემები და ამ აპარატურის გასათვალისწინებელი განსაკუთრებულობა მდგომარეობს უსადენო კავშირის პროტოკოლ WiseMac-ში. ერთერთი ტექნოლოგია, არის უსადენო უჯრედოვანი ქსელი (Wireless Mesh Networks), რომელსაც აქვს განაწილებული არქიტექტურა და ინფორმაციის გადაცემისათვის იყენებს რეტრანსლაციურ მეთოდებს მრავალრიცხოვანი სატრანზიტო კვანძების საშუალებით. ეს კვანძები წარმოადგენენ ერთდროულად შეღწევის წერტილებს, რომლებიც მომავალში თვითორგანიზდებიან და თვითონ აარჩევენ საუკეთესო მარშრუტს დაზიანებული კვანძების გადატვირთული არხების გვერდის ავლით. მაღალსიხშირული გადაცემის შემთხვევაში ქსელური კვანძები შეიცავენ მიკროპროცესორებს და ტრანსივერებს, გაერთიანებულს გადამცემთან, ანტენასთან და კვების წყაროსთან. ნახ. 1.1.

ყველა სენსორული კვანძები აყალიბებენ ერთიან უსადენო ქსელს და უნარი შესწევთ გაცვალონ ინფორმაცია. ამასთან ინფორმაციის გადაცემა ქსელის მოშორებული კვანძიდან რაბისათვის ხდება ჯაჭვით, ე.ი. ქსელის ერთი კვანძიდან მეორეში, რაც საშუალებას იძლევა შეიქმნას დაფარვის დიდი ზონა რაბის გავლით, ინფორმაცია აღწევს

მთავარ კომპიუტერთან, მთავარი კომპიუტერიდან ინფორმაცია თანამგზავრული კავშირის საშუალებით გადაიცემა Internet-ით საკვლევ ცენტრში.



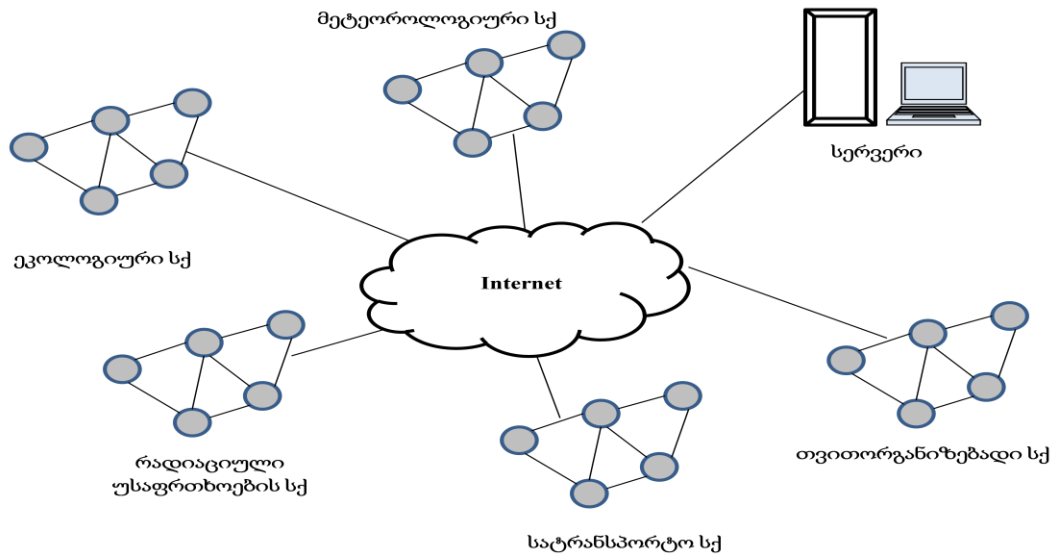
ნახ.1.1. სენსორული ქსელის კვანძის პროტოტიპის ფუნქციონალური სქემა

ყველა სფეროში გამოიყენებენ სენსორულ ქსელებს: ეკოლოგიაში და სამაშველო სამსახურებში, სადაც ნამცეცა სენსორებს, ყრიან თვითმფრინავებიდან ტყის მასივების თავზე შემდეგ მათ მინიჭებულ პარამეტრებზე დამოკიდებულებით შეუძლიათ წარმოქმნილი ტყის ხანძარის, ან გზა აბნეული ტურისტული თუ სხვა ჯგუფისათვის მარშრუტის განსაზღვრა. შესაძლებელია მონიტორინგიც - თვალყური მოსავლის დამწიფებაზე, ფერმერებისათვის ინფორმაციის მიწოდება ნიადაგის აუცილებელი მორწყვის შესახებ და ა.შ. უსქ-მა დიდი როლი შეიძლება ითამაშოს რადიაციულ უსაფრთხოებაში. სენსორები განთავსდეს მიწაში რადიაციული ობიექტის მახლობლად და ჩატარდეს გაზომვები განსაზღვრული პერიოდით (მაგ. ყოველ წუთში ან საათში). უსქ ასევე გამოიყენება სეისმოლოგიაში მიწისძვრის შესახებ ოპერატიული ინფორმაციის მიწოდებისათვის, მეტეოროლოგიაში - ინფორმაციის მიწოდებისათვის კლიმატის მდგომარეობის შესახებ (ატმოსფეროს წნევა, ტემპერატურა, ჰაერის სინოტივე, ქარის სიჩქარე, მაგნიტური ველი და სხვ.), გზებზე-მანქანის ნაკადების სარეგულირებლად, მედიცინაში-გულის პულსისა და სისხლის წნევის მონიტორინგისა და სხვა

მნიშვნელოვანი სასიცოცხლო მაჩვენებლების ექიმისათვის ავტომატურად შეტყობინებისათვის და საჭიროების შემთხვევაში გადაუდებელი დახმარების გაწევისათვის, ავადმყოფებისათვის ცხოვრების შემსუბუქებისა და მოხუცებულებისათვის ჩვეული ცხოვრების კომფორტულობის გაუმჯობესებისათვის. უსქ-ს გამოყენების პერსპექტიული სფეროები კლასიფიცირდება:

- უსაფრთხოების სისტემები - პერიმეტრის კონტროლი, დისტანციური დაკვირვება, პერსონალის მონიტორინგი, მატერიალური ღირებულებების დაცვა, სახლის უსაფრთხოების სისტემები, სახანძრო სიგნალიზაციის სისტემები;
- გარემოს მონიტორინგისა და კონტროლის სისტემები (სინოტივე, ტემპერატურა, ჰაერის შემადგენლობა, ნიადაგის მდგომარეობა, მაგნიტური ფონი), გარემოს დაბინძურების მონიტორინგი, ცხოველების, მწერების მიგრაცია;
- ელექტრო ენერჯის სისტემები - ენერგო მომარაგების მართვა, კონდიციონერის, ვენტილაციის, გათბობის, განათების, გაზისა და წყალ მომარაგების კონტროლი;
- საგანგებო სიტუაციები - სტიქიური უბედურების შესახებ შეტყობინება; ხანძარი ტყეში, მიწის დაწვეა და სხვ. ადამიანების გადარჩენა გამოუვალი სიტუაციებისას;
- ჯანდაცვა - ფიზიოლოგიური მონიტორინგი (გულის ცემის რიტმი, სისხლის წნევა, ტემპერატურა, სტრესის დონე და სხვა სასიცოცხლო პარამეტრები), გადაუდებელი დახმარების პერსონალის მონიტორინგი.

განვითარების მიმართულება. დღეისათვის შეიძლება ითქვას რომ უსქ-ზუსტად ის ელემენტია, რომელიც საშუალებას მისცემს Internet-ს გავიდეს შემდგომ, თავისი განვითარების ხარისხობრივად ახალ ეტაპზე. სენსორული ქსელი ჩართულია ინტერნეტში. ყოველი სენსორი იღებს IP-მისამართს და ახდენს გლობალური უსქ-ს ფორმირებას.ნახ.1.2.



ნახ.1.2 გლობალური უსქ-ს სტრუქტურული სქემა

ბოლო დროს გამოჩნდა იდეა შეიქმნას მობილური ტელეფონებისაგან განაწილებული უსქ, რომელიც თვალს ადევნებს ატმოსფეროს დაბინძურების დონეს. თუ შეიცვლება გამოყენებული უსადენო სენსორები მობილური ტელეფონებით, ეს შეამცირებს უსქ-ს გაშლის ღირებულებას სავარაუდოდ 10-ჯერ. თუ გავითვალისწინებთ ფიჭური კავშირის თანამედროვე გავრცელების მასშტაბებს სავსებით შეიძლება ვისაუბროთ გლობალური უსქ-ს შექმნაზე. თუ მობილური ტელეფონიდან მივიღებთ მონაცემებს, მაშინ საქმე გვექნება ძალიან დიდ მასშტაბებთან და ძალიან მაღალ დეტალიზაციის ხარისხთან. მეცნიერების აზრით ქსელი მობილური ტელეფონებით, მით უმეტეს გადაადგილებადი - ეს პრაქტიკულად იდეალური უსქ-ა, რომელიც შეიძლება გაიშალოს გლობალური მასშტაბით.

როგორც ცნობილია Internet-ი გამოიყენება ადამიანებს შორის კომუნიკაციური ფუნქციის შესასრულებლად. ბოლო დროს გამოჩნდა ისეთი დამატებითი მომსახურებები როგორცაა e-banking, e-commerce, დისტანციური განათლება და სხვა. უსქ-ს Internet-ის საფუძველზე რეალიზებისას საშუალებას მისცემს ადამიანს აკონტროლოს, აწარმოოს მონიტორინგი და რაც მთავარია მთელ დედამიწაზე თვალყური ადევნოს ბუნების პროცესებს ფართო გეოგრაფიულ სივრცეში.

## 1.2. საგნების ინტერნეტის სტანდარტიზაცია

ტერმინი „საგნების ინტერნეტი“ ინტერნეტის განვითარების ახალი ეტაპია. „საგნების ინტერნეტის“ კონცეფცია წარმოადგენს არა მხოლოდ ტექნიკურ, უფრო მეტად სოციალურ-ტექნოლოგიურ პროცესს, რაც განპირობებულია XXI საუკუნის თანამედროვე საინფორმაციო ტექნოლოგიების გავლენით საზოგადოებაზე.

პაკეტური კომუტაციის ქსელების და ინტერნეტის აქტიურმა განვითარებამ 2000 წლების დასაწყისში მსოფლიოს სატელეკომუნიკაციო საზოგადოებაში გამოიმუშავა ახალი პარადიგმა განვითარებულიყო საკომუტაციო ქსელი - შემდგომი თაობის NGN. ეს ტექნოლოგია უკვე განვითარების ევოლუციის გზაზეა, მოქნილი კომუტაციიდან (Softswitch) მულტიმედიური კავშირის ქვებისტემამდე IMS (IP Multimedia Subsystem) და ხანგრძლივი ევოლუციის უსადენო ქსელამდე LTE (Long Term Evolution).

ბოლო დროს მნიშვნელოვნად განვითარდა შემდეგი ტექნოლოგიები: რადიო სიხშირული იდენტიფიკაციის მეთოდი RFID (Radio Frequency Identification), უსადენო სენსორული ქსელი WSN (Wireless Sensor Network), მცირე რადიუსის მოქმედების კომუნიკაცია NFC (Near Field Communication) და მანქანათშორისო კომუნიკაცია M2M (Machine-to-Machine), რომელიც ინტეგრირდება ინტერნეტში და უზრუნველყოფს მარტივ კავშირს სხვადასხვა ტექნიკურ მოწყობილობებს („საგნებს“) შორის, ამასთან მათი რიცხვი შეიძლება იყოს ძალიან დიდი. ექსპერტების მონაცემებით 2008-2009 წწ ინტერნეტში ჩართულმა მოწყობილობების რიცხვმა გადააჭარბა ინტერნეტში ჩართული მომხმარებლების რიცხვს. უახლოეს პერსპექტივაში პროგნოზირებენ ამ მოწყობილობების რიცხვის ექსპონენციალურ ზრდას. მიმდინარე პერიოდი ხასიათდება ევოლუციური გადასვლით „ადამიანების ინტერნეტიდან“ „საგნების ინტერნეტზე“ (Internet of Things-IoT).

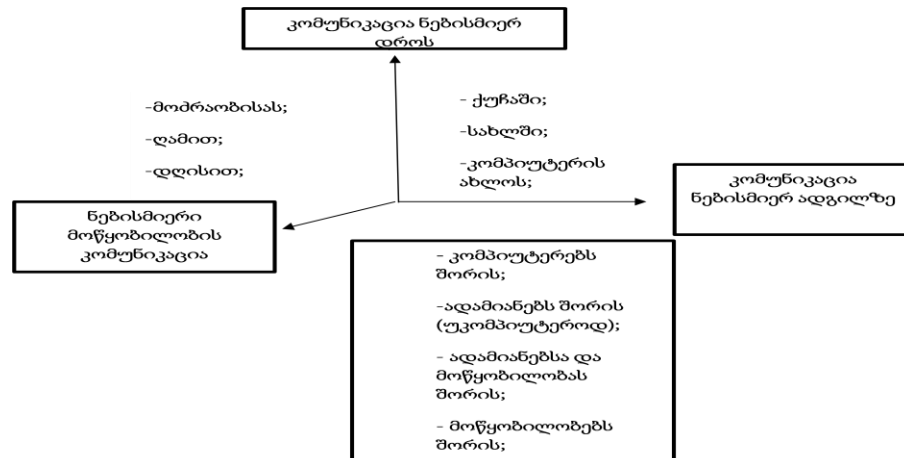
ITU-ს სტანდარტიზაციის სექტორი ახდენს გლობალური ინიციატივის (Global standards Initiative, GSI) რეალიზებას. გლობალური ინიციატივის ქვეშ იგულისხმება კომპლექსური სამუშაო, რომელსაც ასრულებენ სხვადასხვა მკვლევართა ჯგუფები მუშაობის კოორდინირებული გეგმის შესაბამისად. ერთერთი ასეთი ინიციატივაა - IoT-

GSI (Global Standards Initiative on Internet of Things) - რომელიც მოიცავს საგნებს შორის ინტერნეტის სტანდარტიზაციას.

საგნების ინტერნეტი (Internet of Things, IoT) საინფორმაციო საზოგადოების გლობალური ინფრასტრუქტურაა, რომელიც უზრუნველყოფს საგნებს შორის წამყვანი მომსახურებების კავშირის ორგანიზებას (ფიზიკური ან ვირტუალური), არსებული ან განვითარებადი ინფორმაციული და საკომუნიკაციო ტექნოლოგიების საფუძველზე.

საგნების ქვეშ (Things) იგულისხმება ფიზიკური ობიექტი (ფიზიკური საგანი) ან ვირტუალური სამყაროს ობიექტი (ვირტუალური საგანი, მაგ.: მულტიმედიური კონტენტი ან დამატებითი პროგრამა), რომელიც შეიძლება იდენტიფიცირებული და გაერთიანებული იქნას საკომუნიკაციო ქსელით.

NGN შემდგომი თაობის ქსელების კონცეფცია ვარაუდობდა ადამიანების კომუნიკაციის შესაძლებლობას (არაუმშალოდ ან კომპიუტერით) ნებისმიერ დროს და სივრცის ნებისმიერ წერტილში. საგნების ინტერნეტის კონცეფცია მოიცავს ნებისმიერი მოწყობილობების (საგნების) კომუნიკაციას. ნახ.1.3.



ნახ.1.3. კომუნიკაციის ახალი მიმართულება საგნების ინტერნეტის რეალიზებით

IoT-სათვის შეიძლება გამოყენებული იქნას ქსელური ტექნოლოგიების უმრავლესობა: გლობალური ქსელები, ლოკალური ქსელები, უსადენო თვითორგანიზებადი (ad-Hoc) და უჯრედოვანი (mesh) ქსელები. აღნიშნული კავშირის ქსელებს გადააქვთ მონაცემები, რომელიც შეგროვებულია სენსორების მიერ, შესაბამისი

პროგრამული დანართებით და ასევე პროგრამული დანართებიდან მოწყობილობებისათვის ბრძანებების გადასაცემად.

საგნებს და მათთან დაკავშირებულ მოწყობილობებს გააჩნიათ მმართველი პროცესორები მონაცემთა დამუშავებისათვის „სისტემა-კრისტალზე“, საკუთარი ოპერატიული სისტემა, გარემოს სენსორინგის ბლოკები და კომუნიკაციის ბლოკები [4].

*საგნების ინტერნეტის არქიტექტურის ევროპული პროექტი IoT-A* (Internet of Things Architecture). IoT-A პროექტში მონაწილეობენ კომპანიები Siemens, NEC, Alcatel-Lucent, Hitachi, NXP, SAP, Telefonica, IBM და სხვ. და მათი ძირითადი მიზანია საგნების ინტერნეტის ეტალონური არქიტექტურის მოდელის შემუშავება (Architectural Reference Model, ARM), ძირითადი კომპონენტების აღწერით, რომელიც შესაძლებელს გახდის სხვადასხვა წარმოშობის IoT ტექნოლოგიების ერთიან ურთიერთდაკავშირებად არქიტექტურაში ინტეგრირებას. IoT-A არქიტექტურის მოდელი მუდმივად კორექტირდება და ივსება ახალი სპეციფიკაციებით. ამჟამად მიღწევადია IoT-A V2 მოდელის მეორე ვერსია.

*„საგნების ინტერნეტის ევროპული მკვლევარი კლასტერი“ IERC* (IoT European Research Cluster, IERC). არასამთავრობო ასოციაცია IERC 2010 წლიდან ახორციელებს ევროკავშირის (EC) სხვადასხვა პროექტების კოორდინაციას IoT სფეროში, საერთო გაგების პრინციპების და ტექნოლოგიის განსაზღვრის მიზნით. IERC პრეტენზიას აცხადებს წამყვან სტატუსზე IoT დამუშავების სფეროში მსოფლიო არენაზე. IERC მონაწილეები და ექსპერტები განსაზღვრავენ საერთაშორისო სტრატეგიას IoT სფეროში თანამშრომლობაზე კვლევის პრიორიტეტულ მიმართულებებზე.

*IPSO ალიანსი*. არაკომერციული ალიანსი IPSO (IP for Smart objects “IP პროტოკოლი ჭკვიანი ობიექტებისათვის”) 2008 წლიდან აერთიანებს სხვადასხვა საზოგადოებას, კომპანიებს და ორგანიზაციებს IP ქსელთაშორისი ურთიერთქმედების პროტოკოლის წინსვლის მიზნით, როგორც სატელეკომუნიკაციო გარემო „ჭკვიანი ობიექტებისათვის“ (Smart objects, SO). ალიანსის მიზანს წარმოადგენს IP პროტოკოლის გამოყენების საშუალებების შემუშავება SO-სთან მიღწევისათვის, აუცილებელი



სტანდარტების განახლება IETF, IPv6 Forum, Z-Wave Alliance, Zigbee ეფექტური საშუალებების განსაზღვრა SO ინდუსტრიული გამოყენებისათვის IP-სთან, SO მარკეტინგი IP-სთან (CIP). IPSO ალიანსის დამფუძნებლების რიცხვში შედის Bosch, Cisco, Ericsson, Fujitsu, Oracle, SAP, Sun და სხვ, ხოლო მთლიანად ალიანსი აერთიანებს 70-ზე მეტ კომპანიასა და ორგანიზაციას ევროპიდან, აშშ-დან, იაპონიიდან, ჩინეთიდან, სამხრეთ-აღმოსავლეთ აზიიდან.

*One M2M გლობალური პარტნიორული პროექტი.* მანქანათმშორისი კომუნიკაცია (M2M) წარმოადგენს საგნების ინტერნეტის მნიშვნელოვან შემადგენელს. დღეისათვის შეიძლება დასახელდეს M2M სტანდარტიზაციის პროცესში პირდაპირ ან ირიბად მონაწილე 140-ზე მეტი ორგანიზაცია, ამიტომ 2012 წელს შეიქმნა გლობალური პარტნიორული პროექტი - One M2M, რომელსაც შეეძლო საერთო მიღწევის და საერთო აღიარებული ტექნიკური სპეციფიკაციის და ტექნიკური ანგარიშგების ფორმირება, რომლებიც მიეკუთვნება პირველ რიგში M2M მომსახურების დონეს (M2M Service Layer).

One M2M პროექტის შექმნის ინიციატორებად გამოვიდნენ ტელეკომუნიკაციის სტანდარტიზაციის შვიდი რეგიონალური ორგანიზაცია: 3GPP ETSI (ევროპა), ARIB (იაპონია), TTC (იაპონია), CCSA (ჩინეთი), TTA (კორეა), ამერიკული ალიანსი სამრეწველო სატელეკომუნიკაციო გადაწყვეტილებებით (ATIS).

საგნების ინტერნეტის ცალკეული შემადგენლების სტანდარტიზაციის და პრაქტიკული დანერგვის საკითხებით (M2M, RFID, ყველგან შეღწევადი სენსორული ქსელები და სხვ.) ბევრი საერთაშორისო ორგანიზაციაა დაკავებული - არასამთავრობო ასოციაციები, მწარმოებლების და ოპერატორების ალიანსი, პარტნიორული პროექტები. დღეისათვის საგნების ინტერნეტისათვის, როგორც ახალი მიმართულებისათვის ინფოტელეკომუნიკაციის განვითარებაში, მთლიანობაში განსაზღვრულია ყველაზე საერთო კონცეპტუალური და არქიტექტურული გადაწყვეტილებები. უახლოეს მომავალში ძირითადი პრობლემა იქნება სხვადასხვა სტანდარტების ჰარმონიზაცია ერთიანი ნორმატიული ბაზის ფორმირების მიზნით საგნების ინტერნეტის პრაქტიკული რეალიზებისათვის [5].

### 1.3. სენსორული ქსელის შექმნის ისტორია

სენსორული ქსელის შექმნის ისტორია 4-ათეულ წელზე მეტს ითვლის. სენსორებზე და სენსორულ ქსელზე პირველი სამუშაოები ინიცირებული იქნა აშშ-ს სამხედრო სექტორში. 50-იანი წლების დასაწყისში ცივი ომის დროს ნაკლებად ხმაურიანი წყალქვეშა გემების აღმოჩენისა და დაკვირვების მიზნით შემუშავებული იქნა დაკვირვების სისტემა SOSUS (Sound Surveillance System), რომელიც შედგებოდა აკუსტიკური სენსორების ნაკრებისაგან (ჰიდროფონები), რომელიც განთავსებული იყო ოკეანის ფსკერზე. მოგვიანებით სისტემა SOSUS გადაორიენტირებული იქნა სამოქალაქო სექტორზე და დღემდე გამოიყენება ნაციონალური ოკეანოგრაფიული და ატმოსფერული ადმინისტრაციის NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration) მიერ მონიტორინგისათვის, მაგ.: სეისმური აქტიურობა. ცივი ომის დროს სამხედრო კომპლექსში ასევე შემოწმებული იქნა ჰაერსაწინააღმდეგო კომპლექსი აშშ-ს და კანადის კონტინენტალური ტერიტორიის ნაწილის დასაცავად, სადაც კონტროლის განხორციელების და ინფორმაციის შეკრების წერტილის სახით გამოიყენებოდა აეროსტატი. მოგვიანებით ეს სისტემა დამატებული იქნა თვითმფრინავებით საჰაერო შეტყობინების სისტემით AWACS (Airborne Warning and Control System). ეს ორი სამხედრო სისტემა ემსახურებოდა სენსორული ქსელის აგებისა და განვითარების ძალიან ადრეულ სტადიას, როცა ეფექტურობის, ოპტიმიზაციის, ავტონომიის და ღირებულების შემცირებაზე საუბარიც კი არ იყო, ხოლო ადამიანი თამაშობდა ერთერთ ძირითად როლს ამ სისტემების მუშაობის პროცესში - სწორედ ადამიანს ეკისრებოდა პასუხისმგებლობა ფუნქციონირებაზე, საიმედოობაზე, მონაცემთა ანალიზზე და სხვა.

სენსორულ ქსელებზე მუშაობა თანამედროვე გაგებით დაიწყო 1980 წ. კვლევით პროგრამაში „განაწილებული სენსორული ქსელი“ DSN (Distributed Sensor Networks), რომელიც ინიცირებული იყო აშშ-ს თავდაცვის სააგენტოს თანამედროვე კვლევითი პროექტით DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency). ინტერნეტ ქსელი, ასევე შემუშავებული DARPA სააგენტოს მიერ, ამ მომენტისათვის უკვე წარმატებულად ფუნქციონირებდა რამდენიმე წლის განმავლობაში და აერთიანებდა 200 კომპიუტერზე მეტს. ინტერნეტ ქსელის შემუშავებლების მიერ DSN პროექტის ჩარჩოებში

რეალიზებული და გამოყენებული იქნა პაკეტური კომუტაციის პრინციპები და TCP/IP პროტოკოლები სტეკის განაწილებულ ქსელებში, რომელიც შედგებოდა უბრალო მოწყობილობებისაგან და მათ მოგვიანებით სენსორები ეწოდა.

სენსორული ქსელის რეალიზებისათვის აპარატურული ბაზა იმ დროისათვის საკმაოდ სუსტი იყო და უკვე შემუშავებული ტექნოლოგიების რიცხვი, რომლებშიც შეიძლება გამოყენებულიყო ეს ქსელები იყო ძალზედ შეზღუდული:

- მოდემები ფუნქციონირებდა 9600 ბოდ სიჩქარეზე, ხოლო Ethernet ტექნოლოგია ახალი გამოსული იყო ბაზარზე. ამასთან დაკავშირებით DSN პროექტის მონაწილეები დაკავებული იყვნენ ამოცანით როგორ განესაზღვრათ სენსორის და სენსორული ქსელის კონცეფცია და უშუალოდ განეხორციელებინათ ტექნიკური შემუშავება.

DARPA სააგენტომ DSN პროექტის მხარდასაჭერად განახორციელა პროექტის ხელმძღვანელობა. DSN პროექტის კვლევის პრიორიტეტულ სფეროებად განსაზღვრული იყო განაწილებული გამოთვლები, სიგნალების დამუშავება და მონაცემთა გადაცემა უსადენო ინტერფეისით. 80-იანი წლების პირველ ნახევარში შეიქმნა მთელი რიგი სატესტო სენსორული ქსელები, რომელთაგანაც შეგვიძლია გამოვყოთ:

- სატესტო სენსორული ქსელი Accent ოპერაციული სისტემის მართვით, Carnegie Mellon University (აშშ), 1981წ.
- სატესტო აკუსტიკური სენსორული ქსელი თვითმფრინავების მარშრუტზე დაკვირვებისათვის, Massachusetts Institute of Technology (MIT), (აშშ), 1984წ.
- სატესტო სენსორული ქსელი, განაწილებული გამოთვლის გართულებული ალგორითმებით, Advanced Decision Systems (აშშ), 1986წ.

ნებისმიერ ტექნოლოგიას მოაქვს წარმატება, შესაბამისად ამართლებს კაპიტალის ჩადებას და მოაქვს სარგებელი საერთო მიღწევის ბაზარზე გასვლისას. როგორც აჩვენებს გამოცდილება ინტერნეტ ქსელის ტექნოლოგია, რომელიც თავდაპირველად შემუშავებული იქნა სამხედრო მიზნებისათვის, წარმატებით გამოიყენება სამოქალაქო სექტორში. სენსორული ქსელის ბაზარზე გამოსვლა იმ კონცეფციით რა კონცეფციითაც

ის იყო განსაზღვრული 80-იან წლებში, 7-8 წლის წინ შეუძლებელი იყო. ბოლო რამდენიმე წელი გახდა გადაწყვეტი სენსორული ქსელებისათვის - გაჩნდა ტექნოლოგიები, რომლებიც საშუალებას იძლევა შეიქმნას მცირე ზომის სენსორები, ალჭურვილი საკმაო რაოდენობის პროცესორული სიმძლავრით და მეხსიერებით.

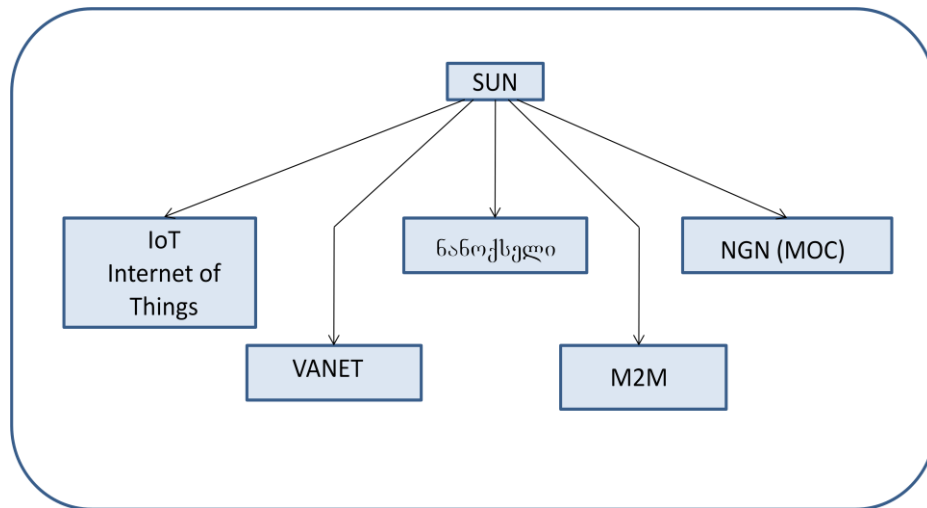
სხვადასხვა ალგორითმების და პროტოკოლების ოპტიმიზაციამ, ასევე სენსორის არქიტექტურის აპარატურული ნაწილის გადაწყვეტამ შექმნა საშუალება არსებითად შემცირდეს ენერჯის მოხმარების მოცულობა და მიღწეული იქნას სენსორის უწყვეტი ფუნქციონირება კვების წყაროს შეცვლის გარეშე 1-2 წელზე მეტი დროით. სენსორის წარმატების მნიშვნელოვან ფაქტორს ბაზარზე წარმოადგენს მათი ღირებულება (1 სენსორული კვანძი ღირს დაახლოებით 50\$ და უფრო ნაკლები). როგორც უკვე ავღნიშნეთ ზემოთ უსადენო მოწყობილობების განვითარების პროგნოზით მათი რიცხვი 2020 წლისათვის მიაღწევს 7 ტრილიონს. ამასთან მოთხოვნები სენსორული კვანძების ღირებულებების მიმართ შეადგენს ათეულ ცენტს (ერთეული დოლარის ფარგლებში) დამატებითი ოპციების შესაბამისად [6].

#### **1.4. კავშირის ქსელების განვითარების ახალი კონცეფციები და პროგნოზები**

სენსორული ქსელების ახალი ტექნოლოგიის განვითარებამ გამოიწვია საგნების ინტერნეტის IoT (Internet of Things) და ვებ საგნების WoT (Web of Things) კონცეფციის შექმნა. ნახ.1.4-ზე მოცემულია სენსორული კვანძების მაგალითები, RFIP (Radio Frequency Identification)-რადიოიდენტიფიკატორების ჩათვლით, ასევე USN უახლესი დანართები, როგორცაა ცხოველებისა და მცენარეების ზრდის მონიტორინგი. იგეგმებოდა NGN კონცეფციის შეცვლა კონცეფციით „ჭკვიანი ყველგანშეღწევადი ქსელები“ SUN (Smart Ubiquitous Networks), რომელიც მოიცავდა NGN კონცეფციას, როგორც ერთ შემადგენელ ნაწილს. კონცეპტუალური SUN მოდელის სტრუქტურა მოცემულია ნახ.1.5 [7].



ნახ. 1.4. USN ქსელის გამოყენების სფეროები

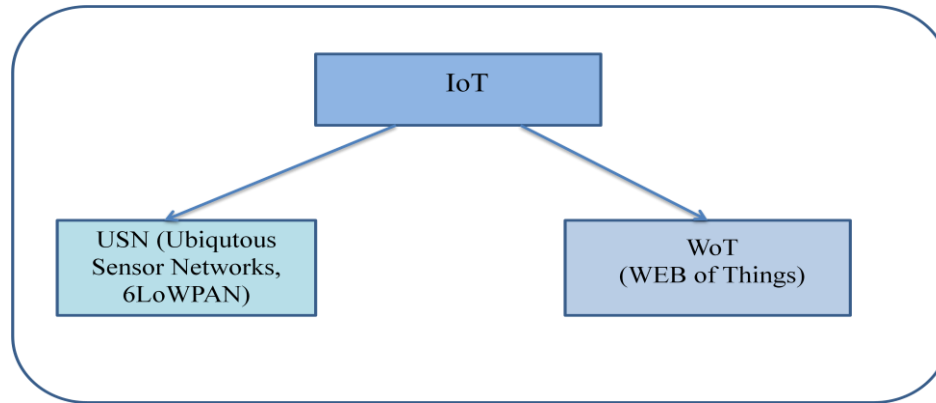


ნახ.1.5. SUN კონცეპტუალური მოდელის სტრუქტურა

კონცეპტუალური SUN მოდელის შემადგენლობაში შედის საგნების ინტერნეტი IoT, NGN ქსელი, მოდერნიზებული მანქანათმშობის კომუნიკაციის მხარდამჭრ დონემდე MOC (Machine oriented Communications), ნანოქსელი, სატრანსპორტო ქსელი VANET და ქსელი მანქანა-მანქანა M2M (Machine-toMachine).

ნახ.1.6-ზე მოცემულია საგნების ინტერნეტის სტრუქტურა, რომელიც მოიცავს USN ქსელის სტრუქტურას, რომელიც აგებულია IPv6 პროტოკოლის ბაზაზე-6LoW PAN (Low energy IPv6 based Wireless Personal Area Networks Protocol). 6LowPAN პროტოკოლი

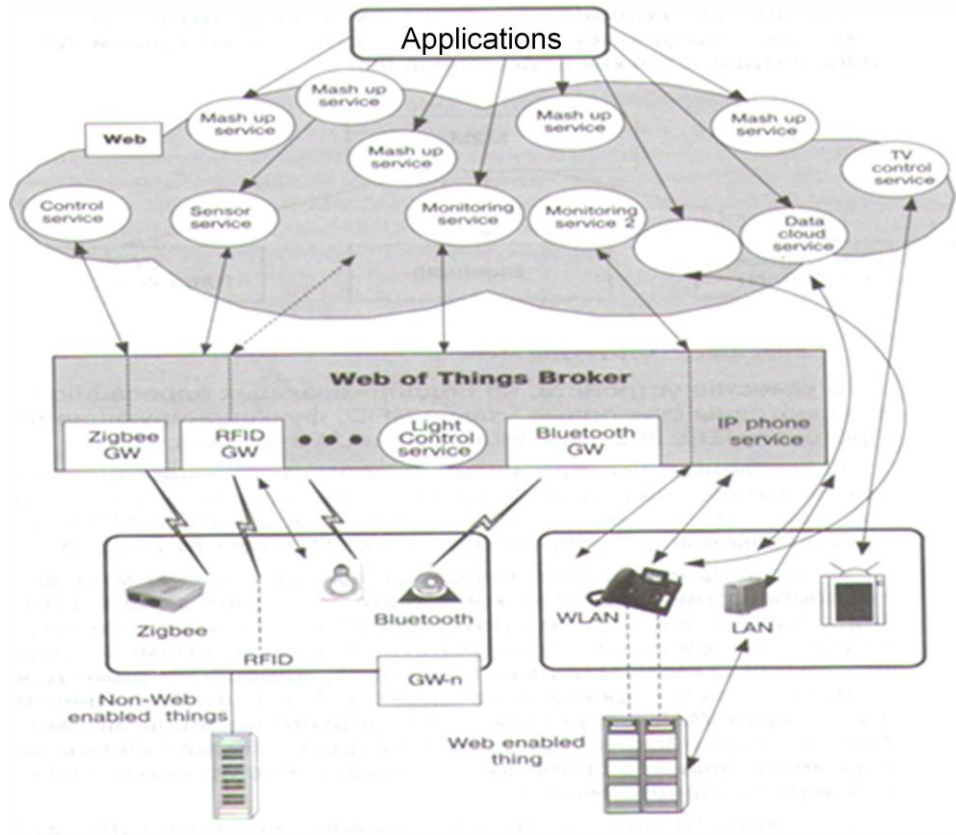
უზრუნველყოფს IP მისამართის მინიჭებას ნებისმიერი სენსორული კვანძისათვის. USN-ის ზუსტად ეს შესაძლებლობა (IP-მისამართების გამოყენება) ხდის მას საგნების ინტერნეტის საფუძვლად.



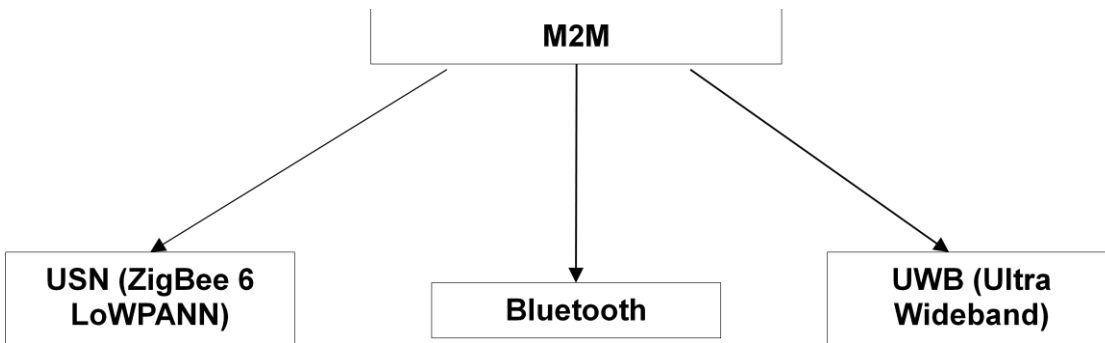
ნახ.1.6. საგნების ინტერნეტის სტრუქტურა

ვებ საგნების ინტერნეტი წარმოადგენს საგნების ინტერნეტის ნაწილს და იძლევა მონიტორინგისა და საგნების მართვის შესაძლებლობას www გვერდების დახმარებით. ნახ.1.7-ზე მოცემულია ვებ საგნების ორგანიზაციის სტრუქტურა, საიდანაც ჩანს რომ საკვანძო რგოლს IoT გამოყენებაში თამაშობს ვებ საგნების ბროკერი, რომელიც საშუალებას იძლევა ვები გამოყენებული იქნას თავდაპირველად ამ საგანთან (Web enabled things), ასევე სხვა საგნებისათვის (non-Web enable things), რომელთათვისაც აუცილებელია შესაბამისი რაბი GW (gateway), მაგ.: საგნებისათვის რომლებიც ფუნქციონირებენ Zigbee პროტოკოლით ან Bluetooth-ით. ნახ.1.7-ზე დამატება ვებ საგნების ინტერნეტი იყოფა: მონიტორინგის, მართვის, მომსახურებისა და შერეულ პროცესებად (mash up).

ნახ.1.8-ზე მოცემულია M2M სტრუქტურა, საიდანაც ჩანს რომ IoT-სა და M2M-ს შორის ძირითადი განსხვავება ისაა, რომ M2M მოიცავს ყველა შესაძლო ურთიერთკავშირს მოწყობილობებს შორის, რომლისთვისაც IP-მისამართი არ წარმოადგენს აუცილებელ პირობას კავშირის დამყარებისათვის. აღსანიშნავია რომ ITU-T-ში არსებობს წინადადება, რომლის შესაბამისად M2M განიხილება როგორც IoT-ის ქვესისტემა.



ნახ.1.7. WEB of Things არქიტექტურა



ნახ.1.8. M2M-ის სტრუქტურა

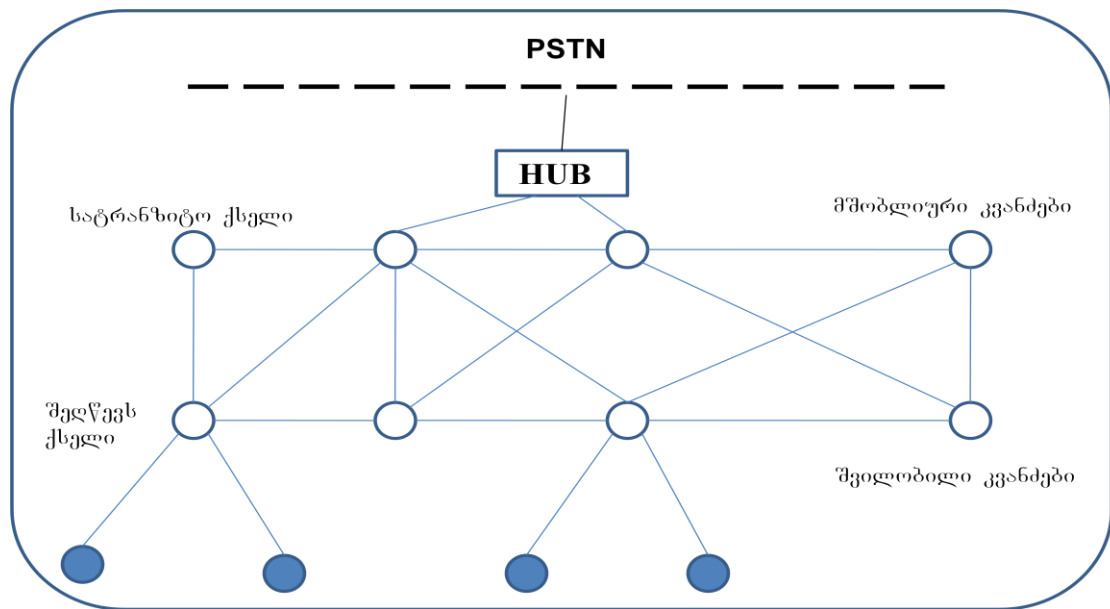
მოწყობილობის სახით, IP-ადრესაციის გარეშე, განიხილება სენსორული კვანძები და RFIP, რომელიც ფუნქციონირებს IEEE802.15.4 პროტოკოლით (Bluetooth UWB-მოწყობილობა). ბუნებრივია, რომ შესაბამისი რაზმების არსებობისას ასეთი მოწყობილობები (საგნები) შეიძლება შეერთებული იყოს IoT-ქსელთან.

IPv6 პროტოკოლის მასშტაბურმა დანერგვამ, პრაქტიკულად უსაზღვრო მისამართის სივრცემ, 6LowPAN პროტოკოლის გამოყენებამ, მოხსნა დამისამართების პრობლემა 7 ტრილიონი უსადენო მოწყობილობისათვისაც კი [8].

### 1.4.1. თვითორგანიზებადი ქსელები IoT კონცეფციით

არსებული დღევანდელი ქსელები აგებული იყო რამდენიმე მილიარდი ადამიანის მომსახურებაზე, მაგრამ არა რამდენიმე ტრილიონ მოწყობილობაზე. რამდენიმე წელია მსოფლიოში მიმდინარეობს მიზანმიმართული კვლევა არსებულთან შედარებით პრინციპულად სხვა ქსელების შექმნაზე. საუბარია თვითორგანიზებადი ქსელებზე, რომლებსაც ტრადიციული კავშირის ქსელებისაგან განსხვავებით, არ გააჩნიათ კონკრეტული ინფრასტრუქტურა დროის რაღაც პერიოდის განმავლობაში.

თვითორგანიზებადი ეწოდება ქსელს, რომელშიც კვანძების რაოდენობა აღმოჩნდება შემთხვევითი დროის გარკვეულ მონაკვეთში და შეიძლება შეიცვალოს 0-დან  $N_{max}$  მნიშვნელობამდე. ურთიერთკავშირი კვანძებს შორის ასეთ ქსელში ასევე შემთხვევითია დროში და ყალიბდება რაიმე მიზნის მისაღწევად ან ინფორმაციის გადაცემისათვის საერთო სარგებლობის კავშირის ქსელში, ან სხვა ქსელთან შეღწევისათვის. თვითორგანიზებადი ქსელის არქიტექტურა მოცემულია ნახ. 1.9.



ნახ.1.9. თვითორგანიზებადი ქსელის არქიტექტურა



თვითორგანიზებადი ქსელი, როგორც ყველა კავშირის ქსელი, შედგება შეღწევის ქსელისა და ტრანზიტული ქსელისაგან. შეღწევის ქსელს ეწოდება Ad Hoc (მიზნობრივი ქსელი). ხოლო სატრანზიტო ქსელს - mesh (უჯრედოვანი). როგორც ნახ.1.9-დან ჩანს Ad Hoc-ს არ გააჩნია მარშრუტიზაციის ფუნქცია და მხოლოდ შეუძლია განახორციელოს უახლოეს კვანძთან ურთიერთკავშირი. ამასთან დაკავშირებით საკმაოდ ხშირად Ad Hoc კვანძებს უწოდებენ შვილობილს. თვითორგანიზების თვალსაზრისით ეს სრულებით არ ნიშნავს რომ შვილობილი კვანძები მკაცრად მიბმული იყოს რომელიმე მშობლიურ კვანძთან. ქსელის სიცოცხლის პროცესში შვილობილი კვანძი შეიძლება მიბმული იყოს ნებისმიერ უფრო ახლოს მდებარე მშობლიურ კვანძთან, ხოლო განსაზღვრული პირობებისას თვითონ შეიძლება გადაიქცეს დროებით ან სამუდამოდ მშობლიურ კვანძად, მაგ.: ერთგვარ უსადენო სენსორულ კვანძებში mesh კვანძებს აქვთ ჩაშენებული მარშრუტიზაციის ფუნქცია და შეუძლიათ დაამყარონ შეერთება არა მხოლოდ ახლომდებარე კვანძთან არამედ სხვა ბევრ კვანძთანაც. ასეთ ქსელურ რეჟიმს უწოდებენ multi-hop (მრავალსაფეხურიან შეერთება), განსხვავებით Ad Hoc ქსელის შვილობილი კვანძებისაგან, რომლებიც შეზღუდულია შეერთების ერთი საფეხურის დამყარებაში (one-hop).

Mesh კვანძებს საკმაოდ ხშირად უწოდებენ მშობლიურ კვანძებს, რაც ხაზს უსვამს ასეთი ქსელის ტრანზიტულ ფუნქციას. ცხადია რომ თვითორგანიზებადი ქსელის კვანძებში შეიძლება განსხვავდეს მშობლიური და შვილობილი კვანძების ფუნქციები [9].

IoT კონცეფციის საფუძველია თვითორგანიზებადი ქსელი. თვითორგანიზებადი ქსელის დანართებს შორის შეიძლება გამოიყოს უკვე დღეს ფუნქციონირებადი:

- უსადენო (ყველგან შემღწევი) სენსორული ქსელი (USN);
- სატრანსპორტო საშუალებების ქსელი (VANET Vehicular Ad Hoc Networks);
- მუნიციპალური ქსელი (HANET-Home Ad Hoc Networks);
- შეჯვარებული მიკრორაიონი Mesh-ქსელთან;
- მედიცინის ქსელი (MBAN-Medicine Body Area Network).

## 1.4.2. მუნიციპალური ქსელი

ქსელების განვითარების საშუალო ვადიან პერსპექტივებით პრაგმატულად მნიშვნელოვანია შესაძლებლობა შეიქმნას საშინაო Ad Hoc ქსელი HANET (Home Ad Hoc Network) და Mesh-ქსელი მიკრორაიონებისათვის.

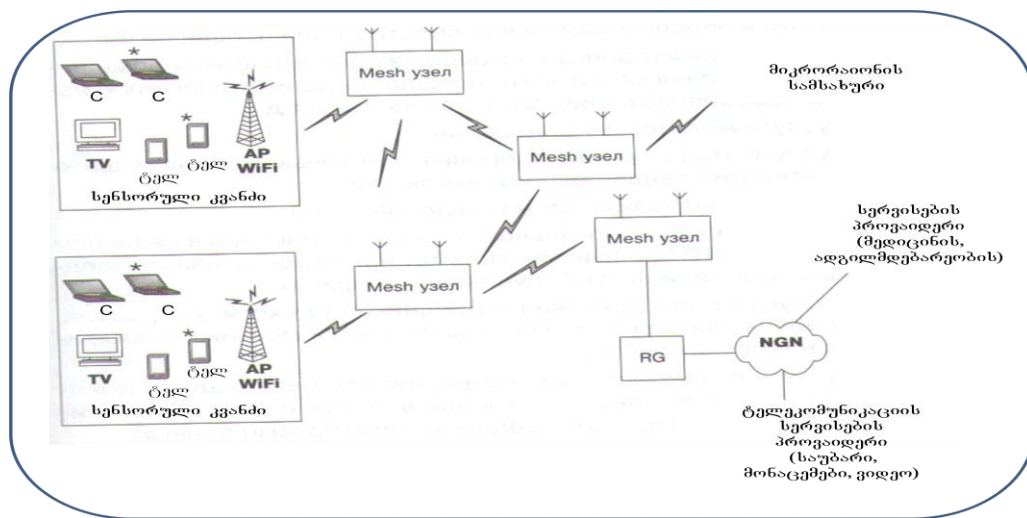
საშინაო ქსელების აგების საფუძველში დევს ორი ერთმანეთის შემავსებელი პროცესი: ფართოდ გავრცელებული უსადენო სენსორული ქსელები და IEEE 802.11, IEEE 802.16, IEEE 1900 სტანდარტების შესაძლებლობა, წარმოდგენილი, როგორც ტრადიციული NGN-მომსახურება, ასევე ახალი მომსახურებები, დაფუძნებული Ad Hoc და Mesh ტექნოლოგიებზე.

დღეისათვის საკმაოდ ფართოდ გავრცელებულია სისტემები და ტექნიკური გადაწყვეტილებები Triple Play (საუბარი+მონაცემები+ვიდეო) მომსახურების პაკეტის შემოთავაზებით, ADSL-ის და მისი მოდიფიკაციების ADSL2 და ADSL2+ საფუძველზე, ან ოპტიკური კაბელის მიყვანით მომხმარებელამდე, ძირითადად პასიური ოპტიკური ქსელების PON (Passive Optic Network) ტექნოლოგიით. IEEE802.11.acD5.01 სტანდარტის პროექტში რეგლამენტირდება გადაცემის სიჩქარე 1 გბიტ/წმ-ზე მეტი დამატებით დონეზე, ხოლო WiGig ალიანსის გადაწყვეტილებებში ეს სიჩქარე გაზრდილია 7 გბიტ/წმ-მდე. ამასთან აღსანიშნავია რომ WiGig სტანდარტი ფუნქციონირებს 60გჰც სიხშირეზე ზევით. არაა შემთხვევითი, რომ ამასთან დაკავშირებით WiFi IEEE 802.11n რეკომენდაციაში პერსპექტივაში განიხილება IPTV რეალიზაცია. მაგ.: მომსახურების გარანტირებული ხარისხის უზრუნველყოფის საკითხი, ხმოვანი და ვიდეო გადაცემისას WiFi ტექნიკური საშუალებების გამოყენებით.

IEEE 802.11e სტანდარტში „კონკურენტის გარეშე გადაცემის შესაძლებლობა“ საშუალებას იძლევა უზრუნველყოს მომსახურების გარანტირებული ხარისხი, როგორც ხმოვანი, ასევე ვიდეო გადაცემებისათვის. TXOP ხანგრძლივობის პერიოდში განსაზღვრავს დროის ინტერვალს, რომლის განმავლობაშიც WiFi ტერმინალს აქვს უფლება ინიცირება მოახდინოს მონაცემთა გადაცემის უსადენო არხით. ზემოთ მოხსენიებულის შესაბამისად უნდა აღინიშნოს, რომ WiFi შეღწევის წერტილის

ღირებულება მერყეობს 50\$-დან 120€-მდე რეალიზებული შესაძლებლობების მიხედვით. ეს საშუალებას იძლევა განისაზღვროს WiFi შეღწევის წერტილების ფართოდ დანერგვა აბონენტის საცხოვრებელში და ოფისებში, ამასთან მოცემულ შემთხვევაში შეღწევის წერტილი წარმოადგენს მომხმარებლის საკუთრებას.

უსადენო შეღწევის განვითარების პერსპექტივები იმდენად ფართოა, რომ შესაძლებელია ხმოვანი გადაცემა ZigBee პროტოკოლის გამოყენებით. ნახ.1.10-ზე მოცემულია Ad Hoc საშინაო ქსელის არქიტექტურა, mesh-ქსელის მიკრო რაიონის და მათი ურთიერთქმედება საერთო სარგებლობის კავშირის ქსელის სხვა ელემენტებთან.



ნახ.1.10. Ad Hoc ქსელის არქიტექტურა

საშინაო Ad Hoc ქსელის შემადგენლობაში შედის ტელეფონი, კომპიუტერი, ტელევიზორი - ყველა მოწყობილობა, რომელსაც შეუძლია WiFi შეღწევის წერტილთან ურთიერთქმედება და წარმოადგენს ამ ქსელის მუდმივ ელემენტს. ასევე სხვადასხვაგვარი უსადენო სენსორული კვანძები. Ad Hoc ქსელთან შეიძლება დროებით მიერთებული იქნას სტუმრის მობილური ტელეფონები და კომპიუტერები, ასევე მიკრორაიონის სხვადასხვა სამსახურის თანამშრომლების მობილური ტელეფონები და კომპიუტერები და/ან ქალაქის (რაც აღნიშნულია \*-ით). როგორც ჩანს ასეთი ქსელი წარმოადგენს IoT გადაწყვეტის და არსებული ინფრასტრუქტურის ქსელების ინტეგრაციას. Ad Hoc საშინაო ქსელი გაერთიანებულია mesh-მარშრუტიზატორების საშუალებით (ან mesh-მარშრუტიზატორებით, შევსილი სხვა უსადენო ტექნოლოგიით)

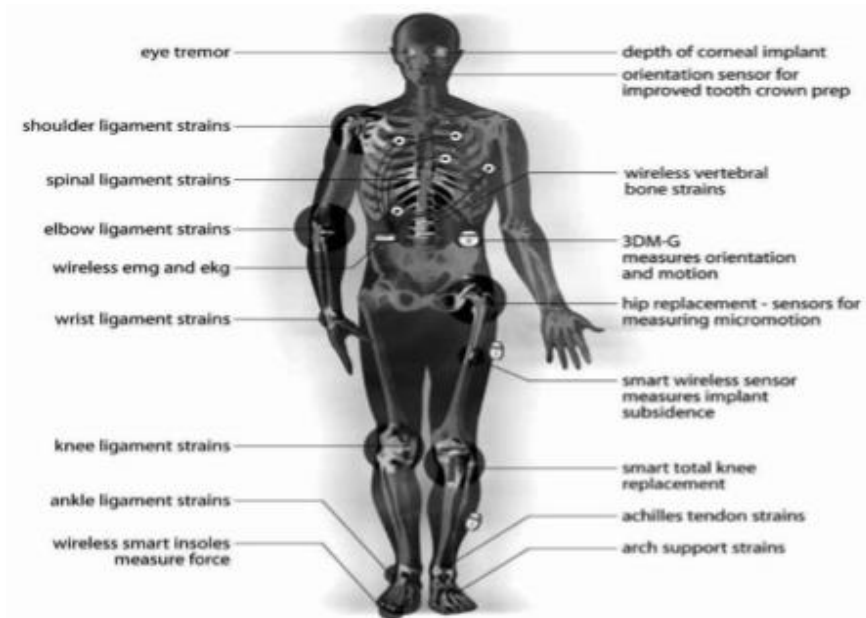
მიკრორაიონის WiFi ქსელში, რომელსაც აქვს გასასვლელი საცხოვრებელ და მიკრორაიონის საექსპლუატაციო სამსახურზე, ასევე სააბონენტო რაბებით RG (Residential Gateway) საერთო სარგებლობის კავშირის ქსელთან, შემდგომ სატელეკომუნიკაციო მომსახურების პროვაიდერებთან. ასეთ ქსელში NGN ტრადიციული მომსახურების სახით შეიძლება წარმოდგენილი იქნას ახალი მომსახურებები, რომელთა შორის შეიძლება გამოიყოს:

- თანამედროვე საყოფაცხოვრებო ტექნიკის და ადამიანის ურთიერთქმედების მომსახურება;
- საცხოვრებლის, ოფისების და უსაფრთოების უზრუნველყოფის მომსახურება;
- საცხოვრებელი და სამუშაო შენობის მდგომარეობის მონიტორინგის მომსახურება, განათების, კლიმატის პირობების, წყალმომარაგების, გაზის და სხვ. მონიტორინგის ჩათვლით;
- ჯანმრთელობის მონიტორინგის მომსახურება;
- ბავშვების ადგილმდებარეობის კონტროლის მომსახურება;
- სხვა მომსახურებები: ლოკალური პოზიციონირება რეალურ დროში, საცხოვრებელში და ოფისებში ძვირად ღირებული საგნების და მოწყობილობების მონიტორინგი;
- თანამშრომლების ურთიერთქმედება მიკრორაიონებში, რაიონებში, ქალაქში, მათ მიერ რემონტის და პროფილაქტიკური სამუშაოების შესრულებისას;
- მედიცინის პერსონალის მომსახურება, რომელიც იმყოფება გამოძახებით სახლში ან ოფისში რაიონული პოლიკლინიკიდან, საავადმყოფოდან, მედიცინის მონაცემთა ბაზიდან;
- “Push to Buy” სახის მომსახურება მსხვილ სავაჭრო ცენტრებში SHANET (Shopping Ad Hoc Network) ქსელების შექმნისას;
- 3G ქსელის მომხმარებლებისათვის როუმინგის მომსახურება რომლებიც იმყოფებიან სტუმრის სახით HANET ქსელში;
- როუმინგის და ინტერნეტში შეღწევის მომსახურება პერსონალური კომპიუტერის მომხმარებლებისათვის და მრავალფუნქციური

ტერმინალებისათვის. ამ მომხმარებლების სტუმრის სახით HANET ქსელში ყოფნისას.

### 1.4.3. მედიცინის ქსელი

მედიცინის ქსელისათვის სტანდარტების შემუშავებით დაკავებულია IEEE 802.15.6 მუშა ჯგუფი. ამ ჯგუფის ძირითად ამოცანას წარმოადგენს MAC-დონის შემუშავება რამდენიმე ფიზიკური დონის (PHY) მხარდაჭერით სხეულზე განთავსებული უსადენო ქსელებისათვის. სხეულზე განთავსებული უსადენო ქსელების WBAN (Wireless Body Area Network) შექმნის მთავარ მიზანს წარმოადგენს მედიცინის მიმართულების სხვადასხვა დანართების მომსახურება, მაგ.: ადამიანის ჯანმრთელობის მდგომარეობის დაშორებული კონტროლი. სენსორული კვანძი შეიძლება განთავსდეს ადამიანის სხეულზე ან მის ახლოს, ან იმპლანტირდეს სხეულში. ასეთი ქსელები შეიძლება მოემსახუროს და გადასცეს ინფორმაცია სხვადასხვა სიჩქარით და პრიორიტეტებით. ფიზიკური დონეების სხვაობის არსებობის გამო ეს საშუალებას აძლევს სხვადასხვა მოწყობილობებს იმუშაონ თავიანთ სიხშირეებზე. ნახ.1.11 მოცემულია სენსორული კვანძების შესაძლო განლაგება ადამიანის სხეულზე დღეს არსებული IEEE 802.15.6 მუშა ჯგუფის ხედვებით.



ნახ.1.11. ადამიანის სხეულზე და სხეულში სენსორული კვანძების განლაგება

ეს სენსორული კვანძები ზომავს თვალის კაკლის რხევას ხედვის ღერძის მიმართულებაზე დამოკიდებულებით (eyetremot), დატვირთვას მხრის სახსარზე (shoulder ligament strains), ზურგის კუნთების დატვირთვას (spinal ligament strains), იდაყვის სახსრის კავშირზე დატვირთვას (elbow ligament strains), ახორციელებს ელექტრომიოგრაფიას, ე.ი. კუნთების აქტიურობის რეგისტრაციას, იღებს ელექტროკარდიოგრამას (wireless emg and ekg), მაჯის დატვირთვას (wrist ligament strains), მუხლის სახსრის დატვირთვა (knee ligament strains), დატვირთვას ფეხისგულზე (ankle ligament strains). ამასთან სენსორული კვანძის შემადგენლობაში შედის ადამიანის სხეულზე ან სხეულში, ან ახლოს განლაგებული ჭკვიანი გამზომები (wireless smart in soles measure force), რქოვანას იმპლანტის განთავსების სიღმის გაზომვის სენსორები (depth of corneal implant), კბილის ფესვის ორიენტაციის გაზომები (orientation sensor for improved tooth crown prep), გიროსკოპული სენსორები მოძრაობისა და ორიენტაციის გაზომვისათვის სამგანზომილებიან სივრცეში (3DM-G measures orientation and motion), მიკრო გადაადგილების გაზომები სახსრის ენდოპროტეზში (hip replacement-sensor for measuring micromotion), იმპლანტების გაზომები (smart-wireless sensor measures implant subsidence), მუხლის სახსრის ჭკვიანი ენდოპროტეზები (smart total knee replacement), ქუსლის სახსარზე დატვირთვის გაზომები (achilles tendon strains).

IEEE 802.15.6 სტანდარტის ტექნიკური საშუალებების ძირითადი დამატებები შეიძლება დაიყოს ორ კლასად:

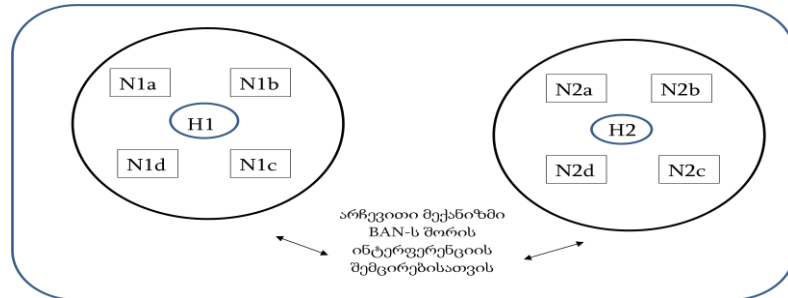
1 კლასი. სპეციალიზირებული სამედიცინო დანართები:

- სატარებელი;
- იმპლანტირებული.

2 კლასი. საერთო ხასიათის დანართები:

- ვიდეო და აუდიო გადაცემები;
- მონაცემთა გადაცემა;
- ინტერაქტიული თამაშების მართვა.

WBAN-ქსელების პროექტირებისას ძირითადი აქცენტი კეთდება ენერგეტიკულ ეფექტურობაზე, რომელიც გულისხმობს კვანძების მიერ დაბალ ენერგო მოხმარებას. WBAN ქსელი მოიცავს მხოლოდ ვარსკვლავურ ტოპოლოგიას, მასშტაბირების მაღალი ხარისხით. ნახ.1.12 მოცემულია ქსელის ტოპოლოგია.



ნახ.1.12. WBAN ქსელის ტოპოლოგია

ქსელის ფუნქციონირებისათვის მოითხოვება რამდენიმე სენსორული კვანძი და/ან აქტუატორების არსებობა, რომლებიც უკავშირდებიან ქსელურ კონტროლერს (BNN Network Controller, BNC), რომელიც რეალიზებულია მაგ.:ტელეფონის სახით, კომპიუტერით ან ნოუტბუქით.

IEEE 802.15.6 სტანდარტის ქსელების მასშტაბურობისა და სიცოცხლის უნარიანობისათვის უნდა სრულდებოდეს შემდეგი მოთხოვნები:

- მონაცემთა გადაცემის ცვალებადი სიჩქარე რამდენიმე კბიტ/წმ-დან რამდენიმე მბიტ/წმ-მდე;
- 256 მოწყობილობის მხარდაჭერა;
- სხვა WBAN ქსელებთან თანაარსებობა;
- გადასაცემი მონაცემების დაცვის მექანიზმების უზრუნველყოფა;
- დაყოვნებების გარანტირებული ზღვარი;
- გატარების გარანტირებული ზოლი.

IEEE 802.15.6 სტანდარტის მიმდინარე პროექტი განსაზღვრავს ფიზიკური დონის სამ შესაძლო რეალიზებას - ვიწროზოლოვანი (NB (Narrowband)), ზეფართოზოლოვანი

UWB (Ultra WideBand) და ადამიანის სხეულის დონე HBC (Human Body Communication) [10].

**დასკვნა.** 1. აღწერილია თანამედროვე ტელეკომუნიკაციის ერთერთი პერსპექტიული მიმართულების - სენსორული ქსელების შექმნის ისტორია.

2. დასაბუთებულია ასეთი ქსელების უპირატესობა დღეს არსებულ ქსელებთან შედარებით. ქსელის აგება შესაძლებელია არსებული ქსელების ინფრასტრუქტურის ბაზაზე, დამატებითი დანახარჯების გარეშე.

3. ყურადღება გამახვილებულია ქსელის ელემენტების პატარა ზომებზე, მათ შესაძლებლობაზე, დაბალ ღირებულებაზე, მცირე ენერგომომხმარებაზე, დიდი მოცულობის ინფორმაციის შეგროვების შესაძლებლობაზე, ინფორმაციის გადაცემის თავისებურებებზე; უსქ-ს გამოყენებაზე ადამიანის მოღვაწეობის თითქმის ყველა სფეროში.

4. სენსორული ქსელების ახალი ტექნოლოგიის განვითარებამ გამოიწვია საგნების ინტერნეტის (IoT-Internet of Things) კონცეფციის შექმნა, რაც უახლოეს მომავალში (2017-2020 წ.წ.) ინტერნეტის განვითარების ახალი ეტაპია.



## თავი II. ინფორმაციის გადაცემა უსადენო სენსორულ ქსელებში

### 2.1. მობილური ქსელების საბაზო სადგურების გამოყენება უსადენო სენსორული ქსელის სათავო კვანძებად

კავშირის ქსელები ამჟამად ვითარდებიან საგნების ინტერნეტის კონცეფციის საფუძველზე. ამ კონცეფციის რეალიზებისათვის ტექნოლოგიურ ბაზას წარმოადგენს უსქ-ი. უსქ წარმოადგენს თვითორგანიზებად ქსელს, რომელიც შედგება სივრცეში განაწილებული უსადენო სენსორული კვანძებისაგან (უსკ). უსკ რესურსები შეზღუდულია. ინფორმაციის დამუშავების, გატარების შესაძლებლობის, მეხსიერების მოცულობის, გამოთვლის შესაძლებლობის მხრივ, რითაც უსქ განსხვავდება სხვა ქსელებისაგან.

უსადენო სენსორული ქსელების ახალი სახე - მფრინავი სენსორული ქსელები გარდაქმნიან მომსახურების ზონის ტერიტორიას ხანგრძლივი ევოლუციის ჰეტეროგენურ სისტემებად. არსებობს ამოცანათა ახალი კლასი - გამოყენებული იქნას სხვა ქსელების მობილური კვანძები უსადენო სენსორული ქსელის კვანძების სათავო კვანძებად.

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

LTE ჰეტეროგენური ზონის ტერიტორიაზე ერთდროულად შეიძლება არსებობდეს სხვადასხვა ქსელების კვანძების სიმრავლე: ყველგანშედგენიანი სენსორული ქსელი (USN), საავტომობილო, მედიცინის და სხვა. ამავე ზონაში ფუნქციონირებს ფიჭური ტერმინალების სიმრავლე, რომლებიც იმყოფებიან დროის კონკრეტულ მომენტში საბაზო სადგურიდან სხვადასხვა მანძილზე. მომხმარებლის მომსახურების ხარისხის გაუმჯობესების ამოცანის გადასაწყვეტად, რომელიც იმყოფება მომსახურების ზონის საზღვრის ახლოს, შეიქმნა ე.წ. კოოპერატიული ქსელები. მათში შესაძლებელია მომსახურების ხარისხი გაუმჯობესებული იქნას სხვა მომხმარებლის მიერ ინფორმაციის

ხელახლა მიღების ხარჯზე ან სპეციალურად შემოტანილი იქნას ქსელში რეტრანსლიატორები. სენსორული ქსელის ნარჩენი ენერჯის და სიცოცხლის ციკლის ხანგრძლივობის გაზრდა შესაძლებელია კლასტერის სათავო კვანძებად LTE ქსელის ტერმინალების დროებითი გამოყენებით, ვინაიდან LTE ტერმინალების ენერჯის მარაგი მნიშვნელოვნად მეტია, ვიდრე სენსორული კვანძების.

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 სხვა ქსელების კვანძები იქნას გამოყენებული, არჩეული იქნას სენსორული ქსელის ტიპიური მოდელი სტაციონარული კვანძებით და კლასტერიზაციის საბაზო LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) ალგორითმი.

LEACH კლასტერიზაციის ალგორითმის გამოყენებისას ქსელის სტრუქტურა იცვლება პერიოდულად. პერიოდს, რომლის განმავლობაშიც სტრუქტურა უცვლელია, ეწოდება რაუნდი. სენსორული ველით მობილური კვანძი ერთხელ 100 რაუნდს გადის 2მ/წმ სიჩქარით და ეს კვანძი ხდება სათავოდ. შესვლის წერტილი ამ კვანძისათვის სენსორულ ველში შემთხვევითია, ასევე შემთხვევითია დროებითი მობილური სათავო კვანძის (დმსკ) პირველი რაუნდის ნომერი.

მობილური სათავო კვანძი ითვლება გამოსული სენსორული ველიდან დროის მომენტში, როცა დგება შემდგომი რაუნდი და სენსორული ველის საზღვრის გადაკვეთამდე ამ კვანძის მიერ რჩება ნაკლები დრო ვიდრე რაუნდის ხანგრძლივობა. ამასთან მას არ შეუძლია არჩეული იქნას დროებით სათავო კვანძად. დმსკ არსებობისას სენსორულ ველში ასარჩევი სათავო კვანძების რიცხვი კლასტერის წევრებიდან მცირდება ერთეულით. მონაცემები რომელიც შეგროვებულია მობილური დროებითი სათავო კვანძის მიერ გადაეცემა რაბს ან საბაზო სადგურს.

რაუნდის დასაწყისში აირჩევა რაღაც რაოდენობის სათავო კვანძები, რომლებიც განსაზღვრავენ ქსელის კლასტერს. სათავო კვანძების რიცხვი და განთავსება შემთხვევითია, განისაზღვრება მხოლოდ სათავო კვანძების საშუალო მნიშვნელობა (წილი). ამგვარად ქსელის კვანძებისათვის ალბათობა აღმოჩნდება სათავო კვანძის მოქმედების ზონაში ერთზე ნაკლები. დმსკ დროებით წარმოადგენს ქსელის დამატებით სათავო კვანძებს, ამიტომ მოსალოდნელია შეტყობინების მიტანის ალბათობის გაზრდა რაუნდის განმავლობაში [11].

## 2.2. უსქ-ის კვანძიდან შეტყობინების მიტანის ალბათობა სხვა მობილური ქსელების საბაზო სადგურების გამოყენებით

ქსელის კვანძები ხარჯავენ კვების წყაროდან ენერგიას მონაცემების მიღებაზე და გადაცემაზე, ენერგიის უმეტეს წილს ხარჯავს კლასტერის სათავო კვანძები, ისინი ემსახურება რამდენიმე კვანძიდან შეტყობინების გადაცემას. დმსკ ქსელის არსებობისას ეს კვანძები "თავის თავზე იღებენ" ენერგეტიკულ დანახარჯებს, რომელიც დაკავშირებულია შეტყობინების რაღაც წილის გადაცემასთან, ამიტომ მოსალოდნელია სენსორული ქსელის კვანძების მიერ მოხმარებული ენერგიის დანახარჯების შემცირება და შედეგად უსქ-ს სიცოცხლის ხანგრძლივობის გაზრდა.

განვიხილოთ ქსელის მუშაობის ერთი რაუნდი. იმის ალბათობა, რომ სენსორული ქსელის მოქმედების ზონაში იმყოფება თუნდაც ერთი სათავო კვანძი განისაზღვრება:

$$P_c = 1 - P_0^{(H)} \quad (2.1)$$

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

$$P_0^{(H)} = \frac{(\pi r^2 \rho_H)^k}{k!} e^{-\pi r^2 \rho_H} \Big|_{k=0} = e^{-\pi r^2 \rho_H} \quad (2.2)$$

მაშინ

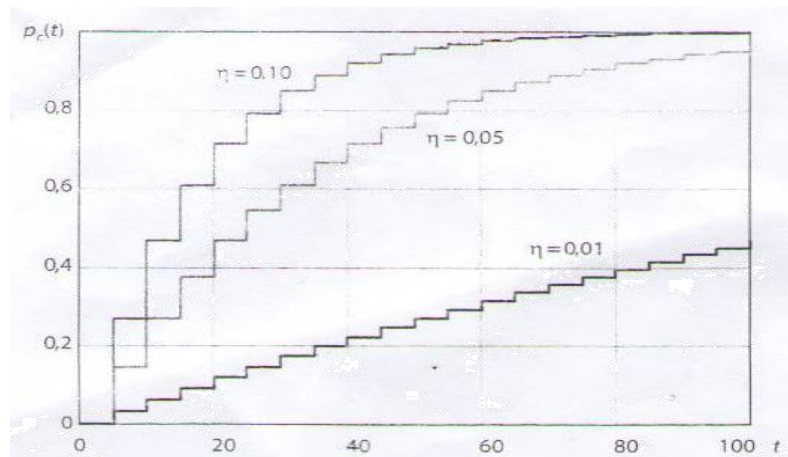
$$P_c = 1 - e^{-\pi r^2 \rho_H} \quad (2.3)$$

$\rho_H = \rho\eta$  - 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:

$$P_C(d) = 1 - (e^{-\pi r^2 \rho_H})^d = 1 - e^{-\pi r^2 \rho_H d} \quad (2.4)$$

დამოკიდებულება (2.4) დროზე (რაუნდის ხანგრძლივობისას ტოლია 5 წმ, რაც როგორც წესი გამოიყენება სათავო კვანძის ამორჩევისას) სათავო კვანძის სხვადასხვა წილისათვის მოცემულია ნახ.2.1-ზე [12].



ნახ.2.1. კვანძის კავშირის ალბათობის დამოკიდებულება რაუნდების რიცხვზე სათავო კვანძის სხვადასხვა წილისათვის

სენსორული ქსელის მომსახურების ზონაში შესვლისას, მობილური კვანძი კლასტერიზაციის მთლიან რაუნდში ხდება სათავო კვანძი. დმსკ გადაადგილებისას რაუნდის განმავლობაში  $L$  მანძილზე კვანძების ნაწილი შეიძლება აღმოჩნდეს მომსახურების ზონის გარეთ. რაუნდის დასაწყისში ერთი ტოლი ალბათობით მიღწევადია დმსკ კლასტერის ყველა სენსორული კვანძებისათვის, ხოლო  $t$  დროის განმავლობაში დმსკ მიღწევის ალბათობა მცირდება. დმსკ მიღწევის ალბათობა

განისაზღვრება როგორც გარემოს კვეთის და მომსახურების ზონის ფართობების ფარდობა:

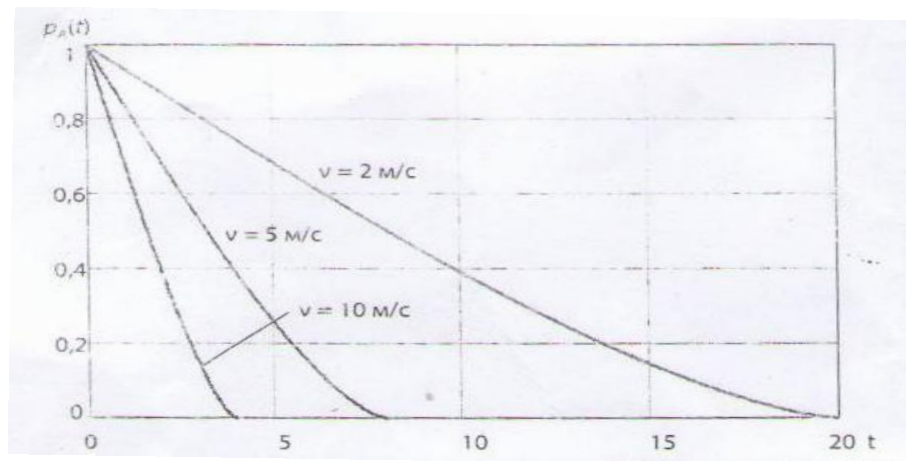
$$P_a(t) = \frac{\xi(L(t))}{\pi r^2} = \begin{cases} \frac{\xi(vt)}{\pi r^2}, & t < T_0 \\ 0, & \text{სხვა შემთხვევებში} \end{cases} \quad (2.5)$$

მომსახურების ზონის გადაკვეთის ფართობი შეიძლება განისაზღვროს, როგორც:

$$\xi(L) = 2 \left( r^2 \arccos \left( \frac{L}{2r} \right) - \left( \frac{L}{2} \right) \sqrt{r^2 - \left( \frac{L}{2} \right)^2} \right) \quad (2.6)$$

დმსკ-ს მისი კლასტერის კვანძებთან მიღწევის ალბათობის დამოკიდებულება დროზე იქნება (ნახ.2.2):

$$P_A(t) = \begin{cases} \frac{\xi(vt)}{\pi r^2}, & vt < r \\ 0, & \text{სხვა შემთხვევებში} \end{cases} \quad (2.7)$$



ნახ.2.2. დმსკ მიღწევის ალბათობის ცვლილება დროის მიხედვით მისი გადაადგილების სხვადასხვა სიჩქარისათვის

იმის გათვალისწინებით რომ რაუდები ხდება პერიოდულად, მათი ხანგრძლივობა მუდმივია და ტოლია  $T_0$ , დმსკ მიღწევის ალბათობა წარმოადგენს პერიოდულ ფუნქციას რაუნდის ხანგრძლივობის ტოლი პერიოდით:

$$P_a(t) = \begin{cases} \frac{\xi(vt)}{\pi r^2}, & (T_0 z < t < T_0(z+1)) \wedge (vt < r), z \in \mathbb{N} \\ 0, & \text{სხვა შემთხვევებში} \end{cases} \quad (2.8)$$

$\tilde{S}(vt)$  - განისაზღვრება (2.4)-ის შესაბამისად.  $T_0$ -რაუნდის ხანგრძლივობა (წმ);  $\nu$ -სათავო კვანძის გადაადგილების სიჩქარე (მ/წმ),  $r$ -სათავო კვანძის მოქმედების ზონის რადიუსი.

ქსელის კვანძებისათვის ალბათობა იმისა რომ მის მოქმედების ზონაში განთავსებულია სხვა ქსელის თუნდაც ერთი მობილური კვანძი, განისაზღვრება (2.3) ანალოგიურად ე.ი.

$$P_c^{(T)} = 1 - e^{-\pi r^2 \rho_T} \quad (2.9)$$

$\rho_T$  – სხვა ქსელების მობილური კვანძების სიმკვრივეა მომსახურების ზონაში. სხვა ქსელის მობილური კვანძის მიღწევის შემთხვევაში ის უპირობოთ აირჩევა სათავოდ, ამიტომ (2.8)-ის ჩათვლით მისი მიღწევის ალბათობის დამოკიდებულება დროზე განისაზღვრება:

$$\tilde{P}_a(t) = P_c^{(T)} P_a(t) \quad (2.10)$$

შევაფასოთ ნებისმიერი სათავო კვანძიდან მიღწევის ალბათობა დმსკ-ს ჩათვლით. იგი განისაზღვრება როგორც:

$$\tilde{P}_a = P_c^{(T)}(t) + P_c(t)(1 - P_c^{(T)}(t)) \quad (2.11)$$

სხვა ქსელების მობილური კვანძების გამოყენებისას დმსკ-ს სახით სენსორული ქსელის სათავო კვანძის მიღწევის ალბათობა არსებითად იზრდება, შედეგად ასევე იზრდება უსადენო სენსორული ქსელის სიცოცხლის ხანგრძლივობის ციკლი [13-14].

### 2.3. მფრინავი სენსორული ქსელები

ბოლო 15 წელია გამოჩნდა ქსელების ახალი ტიპის კლასი, რომელიც შედგება მინიატურული უსადენო მოწყობილობისაგან-სენსორული კვანძებისაგან. ამ კვანძების შემადგენელი ელემენტებია - კვების ელემენტი, პროცესორი, მონაცემთა გაცვლის უსადენო მოდული მცირე ენერგომოხმარებით და ბლოკი, რომელიც ახდენს რეალიზებას ისეთი ფუნქციებისას როგორცაა აუცილებელი პარამეტრების გაზომვა ან მართვა. მსგავსი ქსელების დამახასიათებელ განსაკუთრებულობას წარმოადგენს თვითორგანიზება, ენერგოეფექტურობა და სენსორული ველის გარემოს მაქსიმალური დაფარვა. თავდაპირველად სენსორული ქსელების ორგანიზების ალგორითმები

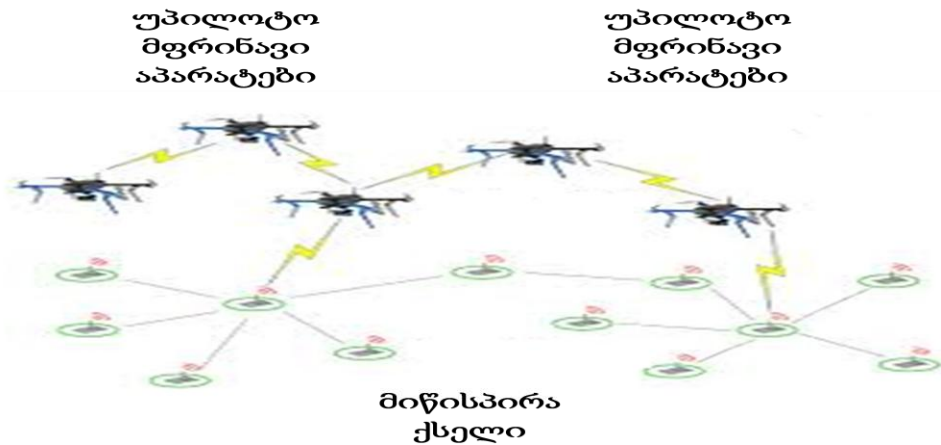
ვარაუდობდა სენსორული კვანძების სტაციონარულ განთავსებას: კვანძის მდგომარეობა არ იცვლებოდა ქსელის მთელი სიცოცხლის ციკლის განმავლობაში. სენსორული ქსელების სფეროს განვითარების შესაბამისად მათი გამოყენებაც გაფართოვდა.

დღეს გამოჩნდა ყველგანშელწყვადი სენსორული ქსელის ახალი კლასი - მფრინავი სენსორული ქსელები (FUSN, Flying ubiquitous sensor Networks). (ნახ.2.3), 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. შემოთავაზებული ალგორითმები ამსუბუქებს ამ ამოცანას, შექმნილი კლასტერები სტატიკურია და სათავო კვანძის ამორჩევისას ითვალისწინებს მის განთავსებას კლასტერის შიგნით. მობილური სენსორული ქსელის ორგანიზების ალგორითმების რეალიზებისას წარმოიშვება დამატებითი პრობლემები, რომელიც არ გააჩნდა კვანძების სტაციონარული განთავსების ქსელებს. მათი გაუთვალისწინებლობა არ შეიძლება. მათ მიეკუთვნება:

1. კვანძების განთავსების და მოძრაობისას სენსორული ქსელის მთელი სიცოცხლის ციკლის განმავლობაში შეიძლება წარმოიშვას სიტუაციები, როცა ერთი სფეროდან, სადაც აუცილებელია გაიზომოს პარამეტრები, არ იქნება არცერთი კვანძი მონაცემთა გასაგზავნად საბაზო სადგურისათვის (სს), სახელდობრ კვანძი საკმარისი ენერჯის მარაგით. უმრავლეს შემთხვევაში შეუძლებელია ან არამიზნობრივია შეიცვალოს კვანძი ან მისი კვების ელემენტი. შედეგად წარმოიქმნება „მკვდარი კლასტერი“, წარმოიშვება ხვრელი ქსელის დაფარვაში.
2. როგორც წესი მსგავს ალგორითმებში გამოიყენება კლასტერული ორგანიზება, რომელიც საშუალებას იძლევა მიღწეული იქნას ენერჯის დანახარჯების შემცირება. კლასტერის სათავო კვანძი ახდენს მონაცემების აგრეგირებას და გადასცემს მას ოპერატორს პირდაპირ ან მეზობელი კლასტერის სათავო კვანძის გამოყენებით (პირდაპირი კავშირის შეუძლებლობისას). შეიძლება წარმოიშვას

სიტუაცია, როცა მონაცემები შეუძლებელია გადაიცეს, როცა მეზობელი კლასტერი „მკვდარია“.

3. მობილურობა საშუალებას იძლევა სენსორულმა კვანძებმა გამოიკვალოს მიმდინარე კლასტერი. ენერგოდანახარჯები მონაცემთა გადაცემაზე დამოკიდებულია დაშორებაზე. ინფორმაცია რაციონალურად გადაეცემა ახლოს განთავსებულ სათავო კვანძს.



ნახ.2.3. მფრინავი სენსორული ქსელი უპილოტო საფრენი აპარატით

მიწისპირა სეგმენტი შედგება დამოუკიდებელი ტერიტორიული განაწილებული უსადენო სენსორული ქსელების სიმრავლისაგან, რომელთაგანაც ინფორმაცია გროვდება მობილური რობოტების გამოყენებით (უმეტეს შემთხვევებში ესენია - უპილოტო მფრინავი აპარატები, ხოლო ზოგჯერ მიწისპირა, წყალზე და ან წყალქვეშა აპარატები). ინფორმაციის შეგროვების ფუნქციის გარდა მობილური სამუშაო შეიძლება განხორცილდეს: მიწისპირა უსქ-ის მართველი წერტილოვანი განთავსებით, ტერიტორიაზე გადმოყრით, გადაადგილებით, უსქ-ს კვანძების წაშლით და გადაპროგრამირებით, კვების წყაროს დამუხტვით და შეცვლით;

ელექტრონიკის განვითარებაში წარმატებებმა საშუალება მოგვცეს უკვე დღეს მფრინავი სენსორული ქსელების (მსქ) შემადგენლობაში იყოს დიდი რაოდენობით მობილური კვანძები, რომლის ზომები შესაბამისია მსქ-ის მიწისპირა სეგმენტის ზოგიერთი კვანძების ზომის. მაგ. მსქ-ის ზოგიერთი მობილური კვანძი იწონის 27 გრ და თავსდება მოზრდილი ადამიანის ხელისგულზე.



მსქ-ის მიწისპირა სეგმენტის აგება მოითხოვს გადაწყდეს რთული პრობლემების სიმრავლე (ცხრ.2.1), რომელიც მიეკუთვნება კვლევის სხვადასხვა სფეროებს. მსქ-ის მიწისპირა სტრუქტურის მოდელის ფუნქციონალურ დონეზე გამოიყენება შემდეგი სახის კვანძები: ფუნქციონალური კვანძები (Φ კვანძები) რომლებიც ახორციელებენ ინფორმაციის შეგროვებას მოცემული კვანძების განთავსების წერტილის ზოგიერთ შემოგარენში; ტრანზიტული კვანძები (T-კვანძები), რომელიც ასრულებს მარშრუტიზაციის მართვას და რეტრანსლიაციის საშუალებით Φ -კვანძების მიერ შეგროვებული ინფორმაციის გადაცემას ინფორმაციის შეგროვების ცენტრში (იშც) მისი შემდგომი გამოყენებისათვის; იშც ახორციელებს უსქ-ის მართვას და შეგროვებული უსქ-ის მონაცემების დამუშავებას. საერთო შემთხვევაში უსქ-ს შეიძლება ჰქონდეს რამდენიმე იშც.

ცხრ.2.1. ზოგიერთი პრობლემები, რომლებიც წარმოიშობა უსქ-ის მიწისპირა სტრუქტურის აგებისას

ქსელის კვანძების შემუშავება	ქსელის სტრუქტურული ტოპოლოგია	კავშირი
ურთიერთქმედების პროტოკოლები	მარშრუტიზაცია და ადრესაცია	საიმედოობა, სიცოცხლისუნარიანობა და უსაფრთხოება
არასანქცირებული შეღწევისაგან დაცვა	ქსელის ენერგომოხმარება და ქსელის საერთო მუშაობის დროის გაზრდა	უარისთქმისადმი სიმყარე
მიზნის ფორმირება და პროექტირების პარამეტრების ოპტიმიზაცია	მონაცემთა შეგროვება და აგრეგაცია	შესაგროვებელი ინფორმაციის სიზუსტის ამაღლება
დაფარვა	თვითკონფიგურირება, თვითოპტიმიზაცია და თვითაღდგენა	ავტომატიზირებული გადაწყვეტილების მიღება
ჯგუფური ქმედების შესრულება	მონაცემთა ნაკადების მართვა	კლასტერებად კვანძების გაყოფა
მობილურ რობოტებთან ურთიერთქმედება	ქსელის მუშაობის იმიტაციური მოდელირება	QoS
ქსელის ზუსტი და მიახლოებითი პარამეტრების შეფასება	სამგანზომილებიანი სივრცის გათვალისწინება	კვანძების გადაადგილება და დაშორება
კვანძების გადაპროგრამირება	კვანძების დამუხტვა	კვანძების პოზიციონირება

მსქ-ის აგების პროცესი საკმაოდ რთულია. ამჟამად შემუშავებულია მეთოდები და ალგორითმები ცალკეული ამოცანების გადაწყვეტისათვის, რომელიც წარმოიშვება მსქ-ის აგების პროცესში. თუმცა თვით პროცესი არაა ფორმალიზებული მკაცრი წესების ნაკრებების სახით [15].

## **2.4. ინფორმაციის გადაცემის ხელშეშლამდგრადობა მფრინავ სენსორულ ქსელებში**

USN-მნიშვნელოვანი მახასიათებელია ხელშეშლამდგრადობა გარე მადესტაბილიზებული ზემოქმედებებზე. ერთერთ ასეთ ფაქტორს წარმოადგენს მიზანმიმართული ელექტრომაგნიტური ზემოკლე ელექტრომაგნიტური იმპულსები (ზემემი) და სივრცეში გავრცელებული ელექტრომაგნიტური ველი. ხელშეშლამდგრადობის ქვეშ იგულისხმება USN-ის შესაძლებლობა შეასრულოს მოცემული ფუნქციები ზემოკლე იმპულსური ხელშეშლების არსებობისას.

USN-ზე ზემემი-ს ზემოქმედება განისაზღვრება მისი სტრუქტურული განსაკუთრებულობებით, რომელსაც შეიძლება მიეკუთვნოს აპარატურული საშუალებების განაწილებული არქიტექტურა, რომელიც მონაწილეობს ინფორმაციულ გაცვლაში (კოორდინატორი, მარშრუტიზატორი, სენსორული კვანძი). ზემემი-ს უფრო ნამდვილ გამოვლენას USN-ზე წარმოადგენს წყვეტა და უარის თქმა, რომელიც წარმოიშვება დარღვევისას სენსორულ კვანძებში, ასევე კავშირის არხებით ინფორმაციის გაცვლისას.

წყვეტები და უარის თქმა ვლინდება კვანძების ადრე გაღვიძებისას, გადამწოდების განგაშით ამუშავებისა და ინფორმაციის დამახინჯებით გადაცემისას. ამგვარად ირღვევა როგორც USN ელემენტების ფუნქციონირება, ასევე მთლიანი ქსელის, რაც მთლიანობაში საშუალებას არ იძლევა გადაწყდეს მონაცემთა შეგროვებისა და დამუშავების დასმული ამოცანები.

USN-ში ხელშეშლამდგრადობის ამაღლებისას ერთერთ გზას წარმოადგენს კონსტრუქციაში გამოყენებული იქნას დაცვის ისეთი სპეციალური აპარატურულ-

პროგრამული მეთოდები და საშუალებები, როგორცაა ფართოზოლოვანი ფილტრები, მონაცემთა გადაცემისას სიჭარბის შეტანა და სხვა.

რამდენადაც USN ხელშეშლამდგრადობა დამოკიდებულია აგების და განლაგების განსაკუთრებულობაზე, ელექტომანეტურ გარემოზე, ამიტომ ქსელის მოცემული დონით ეფექტური ფუნქციონირების უზრუნველყოფისათვის აუცილებელია მისი მუშაობა დაფუძნებული იყოს აპარატურულ-პროგრამულ დაცვის მეთოდებსა და საშუალებების კომპლექსზე. ამასთან უნდა ვიხელმძღვანელოთ კრიტერიუმით. რომლის საფუძველზეც ხორციელდება შესაბამისი მეთოდის არჩევა. კრიტერიუმის სახით მიზანშეწონილია აღებული იქნას USN-ში ხელშეშლამდგრადობის ამაღლების მეთოდებისა და საშუალებების დამუშავებასა და დანერგვაზე ჯამური დანახარჯების მინიმუმი, ეფექტურობის  $K$  მოცემული მაჩვენებლის უზრუნველყოფის პირობებისას.

დავუშვათ მოცემულია მიწისპირა სეგმენტის სტრუქტურა FUSN (ნახ.2.4) გრაფის სახით  $G(V,E)$ , სადაც  $V = \{\delta\}$ -ქსელის კვანძების, ხოლო  $E = \{e_{k,i}\}$ -კავშირის ხაზების სიმრავლეებია, რომლებითაც ხორციელდება უშუალოდ ინფორმაციის გადაცემა. მოცემულ შემთხვევაში FUSN წარმოადგენს ინფორმაციის დამუშავების იერარქიულ ერთრანგიან ქსელს მწარმოებლურობით  $\Pi = \{\mathbb{I}\}$ . ქსელში მუშავდება  $r$ -ტიპის განაცხადი  $B = \{b_q\}$ , ( $q = 1 \dots r$ ) რომელიც შეიძლება გადაიცეს კვანძებს შორის. ყოველი ტიპის განაცხადისათვის მოცემულია გამოთვლების მოცულობა  $0 = \{o_q\}$ . კავშირის არხის გამტარუნარიანობა აღვნიშნოთ სიმრავლით  $-D$ . მოცემულია კვანძებს შორის შეტყობინების გადაცემის ინტენსივობის მატრიცა  $H = \|h_{ij}\|$  [16].

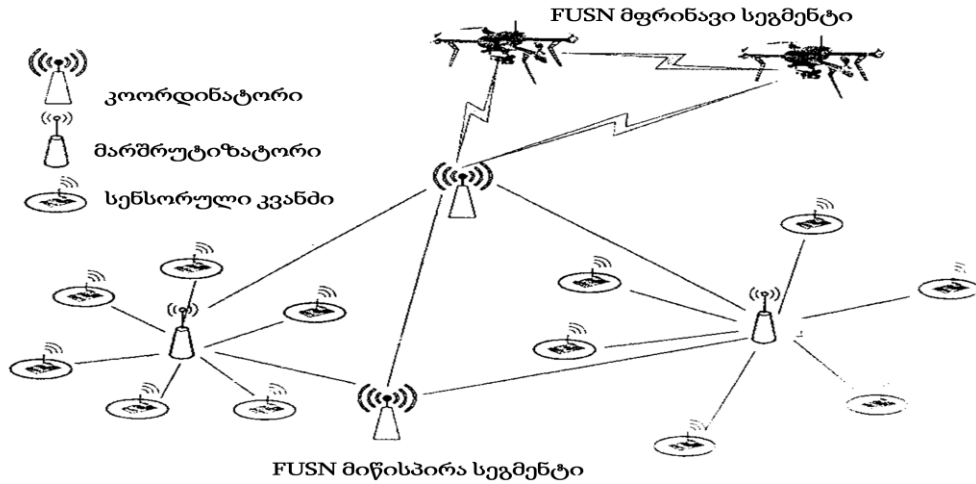
ქსელის საერთო გამტარუნარიანობა ხასიათდება გარე ნაკადების ჯამური სიდიდით, რომელსაც გადასცემს ქსელი და გამოითვლება:

$$H_{\Sigma} = \sum_i \sum_j h_{i,j} \quad (2.12)$$

იმ პირობებით, რომ

$$T^q \leq T_{\text{მოც}}, \quad q = 1 \dots r$$

$T^q$  და  $T_{მოც}$  q-ური ტიპის განაცხადის დამუშავების საშუალო და მოცემული დროა.



ნახ.2.4. FUSN მიწისპირა სეგმენტის ტიპიური სტრუქტურა

FUSN ფუნქციონირების პროცესში კავშირის კვანძებზე და არხებზე იმოქმედებს ზემეში, 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.

ხელშეშლამდგრადობის მაჩვენებლად გამოვიყენოთ ეფექტურობის კოეფიციენტი  $K_{ce}$ , რომელიც ახასიათებს FUSN გამტარუნარიანობის შემცირებას ხელშეშლების ზემოქმედებით კერძოდ, განვსაზღვროთ:

$$K_{ce} = \frac{H_{\Sigma}^{\Pi}}{H_{\Sigma}} \quad (2.13)$$

$H_{\Sigma}^{\Pi}$  -  $H_{\Sigma}$  განაცხადების ჯამური ნაკადია, რომელიც გამომუშავდება FUSN-ში ზემეში-ს ზემოქმედებისას და არარსებობის პირობებში შესაბამისად.

$K_{ce}$  მაჩვენებლის ამაღლებისათვის არსებობს ზემეში-ს ზემოქმედებისაგან დაცვის საშუალებების სიმრავლე  $M = \{m_j\}, j = i \dots 1$ , რომელთაგანაც თითოეული ხასიათდება

მახასიათებლების სიმრავლით  $m = \{w_y\}$ ,  $y = i \dots u$ , თუ ცნობილია დანახარჯები  $j$ -ური საშუალების შემუშავებაზე  $C_j$ . თითოეული საშუალება შეიძლება გამოყენებული იქნას ქსელის ნებისმიერ კვანძში, მაშინ მიღებული იქნება ქსელის ხელშეშლამდგრალობის მაჩვენებლის  $K_{ce}$  ნაზრდი  $\Delta K_{cej}$   $j$ -ური დაცვის საშუალების გამოყენების ხარჯზე -  $\Delta K_{cej} = f\{\Delta K_{ij}(\mathbb{X})\}$ ,  $i = 1, j = 1, e$ ;  $\Delta K_{ij}$  -  $i$ -ური კვანძის  $K_{ce}$  -ს ნაზრდია მასში  $j$ -ური საშუალების გამოყენების ხარჯზე.  $\mathbb{G}(V, E), O, \Pi, D, B, E, M$  -FUSN-ის მახასიათებლების, ელექტრომაგნიტური გარემოს და დაცვის საშუალებების სიმრავლე.

ვთქვათ  $X = \{x_{ij}\}$ - ორობითი ცვლილების მატრიცაა, რომელშიც

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{თუ ქსელის } j - \text{ურ კვანძში გამოიყენება } i - \text{ური საშუალება;} \\ 0, & \text{თუ არ გამოიყენება} \end{cases}$$

ამ საწყისი მონაცემებისათვის ამოცანა შეიძლება ფორმირებული იქნას ასე: განისაზღვროს ისეთი მატრიცა

$$C = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M C_{ij} X_{ij}^* \quad (2.14)$$

შეზღუდვისას

$$K_{ce} = K_0 + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \Delta K_{ij}(\mathbb{X}^*) \geq K_{ce}^{\text{მოც}} \quad (2.15)$$

$K_0, K_{ce}^{\text{მოც}}$  FUSN მდგრალობის საწყისი და მოცემული მნიშვნელობებია, (2.14) და (2.15) გამოსახულებებით  $K_0$  და  $K_{ce}^{\text{მოც}}$  მნიშვნელობების განსაზღვრა წარმოადგენენ ოპტიმიზაციის ამოცანას მთელრიცხვიანი პროგრამირებისას. მსგავსი ამოცანების გადასაწყვეტად შემუშავებულია ოპტიმიზაციის მეთოდები.

დღეისათვის  $K_{ce}$  -ს ნაზრდის ანგარიში ზემოქმედებისაგან დაცვის საშუალების გამოყენებით თითქმის შეუძლებელია. ეს განპირობებულია იმით, რომ ჯერ ერთი არ არსებობენ ანალიტიკური დამოკიდებულებები ამ ორ მახასიათებელს შორის და მეორე - გამოთვლების პროგრამული რეალიზაცია გამოთვლითი პროცედურების უსაზღვროდ დიდი რაოდენობის გამო პრაქტიკულად შეუძლებელია.

ზემოთ-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 - მათი გამოყენება მიზანშეწონილია პაკეტური გადაცემის პირობებში, დაყოვნებებისადმი ტოლერანტულ ქსელებში.

FUSN-ქსელში ზემომხედებით გამოწვეული ხელშეშლამდგრადობის 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. გამოთვლების რეალიზებად ჩარჩოებში მოქცევისათვის შესაძლებელია ოპტიმიზაციის ამოცანა დაყვანილი იქნას ხელშეშლამდგრადობის ამა თუ იმ საშუალების რეალიზაციისათვის დანახარჯების (C) მინიმიზაციაზე [17-18].

**დასკვნა.** 1. ნაჩვენებია თუ როგორ შეიძლება გამოყენებული იქნას მობილური საბაზო სადგურები უსქ-ს სათავო კვანძებად.

2. გასაზღვრულია უსქ-ს კვანძებიდან შეტყობინების მიტანის ალბათობა სხვა მობილური ქსელების საბაზო სადგურების გამოყენებით.

3. აღწერილია ყველგანშეღწევადი სენსორული ქსელის ახალი კლასი - მფრინავი სენსორული ქსელები FUSN (Flying Ubiquitous sensor networks).

4. ნაჩვენებია უსქ-ზე გარე მადესტაბილიზირებელი ზემოქმედების ფაქტორის - ზემოკლე ელექტრომაგნიტური იმპულსები (ზემემი) გავლენა. დამტკიცებულია, რომ ამ პრობლემის გადასაწყვეტად კონსტრუქციაში გამოყენებული უნდა იქნას დაცვის ისეთი სპეციალური აპარატურულ-პროგრამული მეთოდები და საშუალებები, როგორცაა ფართოზოლოვანი ფილტრები, მონაცემთა სიჭარბის შეტანა და სხვ.

5. განსაზღვრულია ეფექტურობის კოეფიციენტი  $K_{ce}$ , რომელიც ახასიათებს FUSN გამტარუნარიანობის ფარდობით შემცირებას ხელშეშლების ზემოქმედებით.

6. ნაჩვენებია, რომ FUSN-ქსელში ზემომი-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.

## თავი III. ყველგანშეღწევადი სენსორული ქსელები და მათი ფუნქციონირების ალგორითმები

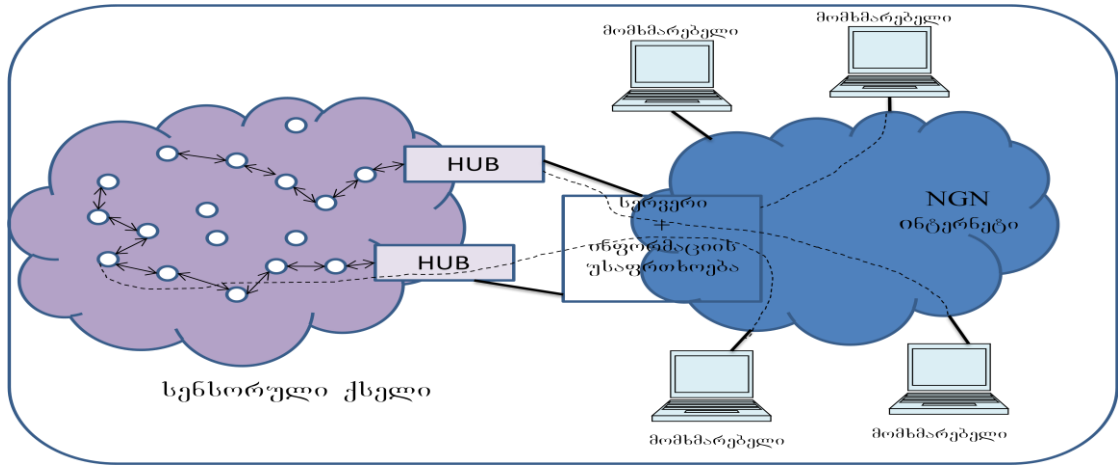
### 3.1. სენსორული ქსელების არქიტექტურა

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

სენსორული ქსელი განისაზღვრება-როგორც „განაწილებული ქსელი“, რომელიც შედგება დიდი რაოდენობით გაფანტული პატარა უსადენო კვანძებისაგან, განთავსებული რაღაც ზედაპირზე ან სფეროში. რადიო სიგნალის დაფარვის ზონაში ყოველი 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 - ცალკეულ სენსორს გააჩნია შეზღუდული აღქმის სფერო, გამოთვლის სიმძლავრე, მეხსიერება და კვება. რადიოშელწევის ტექნოლოგია, რომელიც გამოიყენება სენსორებში დაფუძნებულია IEEE 802.15.4 სტანდარტზე (ZigBee) რომელიც, საშუალებას იძლევა მონაცემები გადაიცეს რამდენიმე ათეულ მეტრზე. ზოგიერთ სივრცეში სადაც აგებულია სენსორული ქსელი, სენსორები იქნებიან განაწილებული საკმაოდ მაღალი სიმკვრივით და შესაბამისად დიდი რაოდენობით. ამ ქსელს როგორც წესი გააჩნია საერთო სარგებლობის სატელეფონო ქსელთან (PSTN) მიერთების შესაძლებლობა შეგროვებული მონაცემების მომხმარებლისთვის გადაცემისათვის (ნახ.3.1).

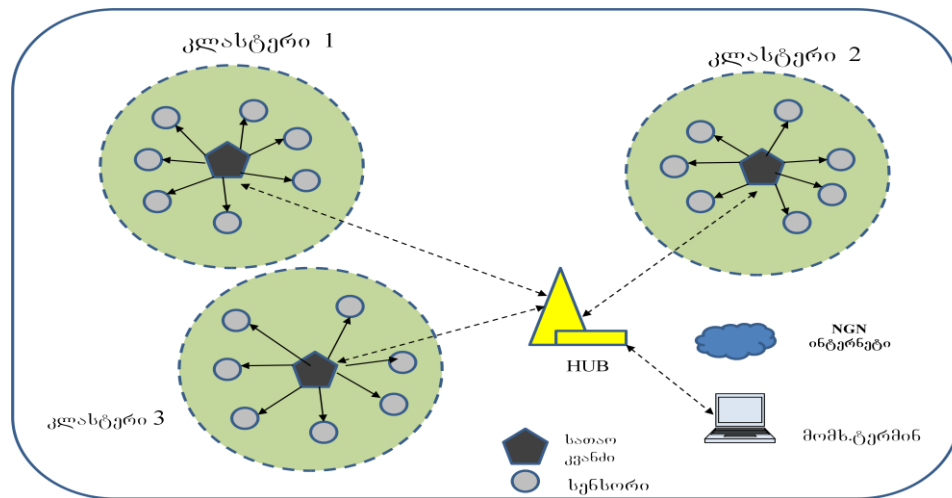
მიერთება ხდება რაბის საშუალებით, რომელსაც ასევე შეუძლია დაცვის ფუნქციების რეალიზება. აღსანიშნავია რომ რაბი ჩვეულებრივ არ წარმოადგენს სენსორს იგი წარმოადგენს უფრო სტაბილურ ქსელურ კვანძს (კვების და რესურსების წყაროს თვალსაზრისით). მონაცემები შეიძლება გადაიცეს როგორც სერვერზე დამუშავებისათვის, ასევე პირდაპირ დაინტერესებულ მომხმარებელს.





ნახ.3.1. სენსორული ქსელის შეერთება PSTN-თან

სენსორული ქსელი, რომელიც შედგება დიდი რაოდენობის სენსორებისაგან, უნდა იყოს სტრუქტურირებული, ანუ გადასაცემი ინფორმაციის დიდმა მოცულობამ შეიძლება შეამციროს იმ კვანძის საიმედოობა, რომელიც იმყოფება უშუალოდ რაბის სიახლოვეს - ტრანზიტული მონაცემების მუდმივმა გადაცემამ შეიძლება მწყობრიდან გამოიყვანოს კვების წყარო, ხოლო ტრაფიკის დიდმა მოცულობამ გადაავსოს მიმღების ბუფერი. მსგავსი ამოცანების ეფექტურ და მასშტაბურად გადაწყვეტას წარმოადგენს ქსელის კლასტერული ორგანიზება (ნახ.3.2).



ნახ.3.2. USN კლასტერული არქიტექტურა

$t_1$  დროის მომენტში არსებული სათავო სენსორული კვანძი არაა აუცილებელი იყოს სათავო დროის ყველა მომენტში, ვინაიდან არსებულ მთავარ კვანძს შეუძლია

დახარჯოს საკმაოდ დიდი ენერჯის რაოდენობა შეტყობინების გადაცემაზე კლასტერის ყველა სენსორული კვანძიდან  $t_2$  დროის მომენტისათვის. ამიტომ  $t_2$  დროის მომენტში კლასტერში მთავარ კვანძად შეიძლება დაინიშნოს სხვა სენსორული კვანძი, რომელსაც შენახული აქვს ამ დროისათვის მეტი ენერჯის მარაგი. ერთერთი ცნობილი მექანიზმი, რომელიც უზრუნველყოფს სენსორული ქსელის ფუნქციონირებას და სათავო კვანძის არჩევას წარმოადგენს ალგორითმი LEACH (Low Energy Adaptive cluster Hierarchy). LEACH ალგორითმი ითვალისწინებს სენსორული კვანძის ნამდვილ არჩევას სათავოს როლზე, სენსორული ქსელის ფუნქციონირების დასაწყისში, როტაციით, სხვა სენსორული კვანძების ენერგეტიკული მახასიათებლების საფუძველზე. მსგავსი გადაწყვეტა, ბუნებრივად ახანგრძლივებს სენსორული კვანძის და ქსელის ფუნქციონირებას, მაგრამ არ წყვეტს უკეთესი დაფარვის უზრუნველყოფის ამოცანას საკმაოდ ხანგრძლივი დროის განმავლობაში. (ეს ბუნებრივიცაა, რადგან LEACH შექმნისას ასეთი ამოცანა არ იდგა. არსებობს სხვა, უფრო LEACH-ის გაუმჯობესებული ალგორითმი. ეს ალგორითმი გამოიყენება დარჩენილი ენერჯის რაოდენობის კრიტერიუმის სახით. მაგ.: HEED (Hybrid Energy-Efficient Distribution) ალგორითმი სათავო კვანძის არჩევისათვის იყენებს ჰიბრიდულ კრიტერიუმს დარჩენილი ენერჯის ანალიზით და ახლო მდებარე კვანძების განლაგების გათვალისწინებით. ყველა ეს ალგორითმი პირველ რიგში მიმართულია მთლიანად სენსორული კვანძის და ქსელის ფუნქციონირების ხანგრძლივობის მაქსიმიზაციაზე. სენსორული ქსელების განვითარებასთან ერთად წარმოიშვა სხვა ამოცანებიც: მომსახურების ხარისხი, რომელიც წარმოადგენს ნებისმიერი ქსელისათვის მნიშვნელოვან საკითხს. სენსორული ქსელის სიცოცხლის გახანგრძლივების პრობლემა ძალიან მნიშვნელოვანია, ოღონდ თუ ეს ქსელი ვერ შეასრულებს თავის ფუნქციებს ინფორმაციის მოთხოვნილი რაოდენობის გადაცემისათვის, მაშინ სენსორული ქსელის თვით სიცოცხლის გახანგრძლივების ამოცანაც, მომსახურების ხარისხის პრობლემაც იქნება დაუკმაყოფილებელი.

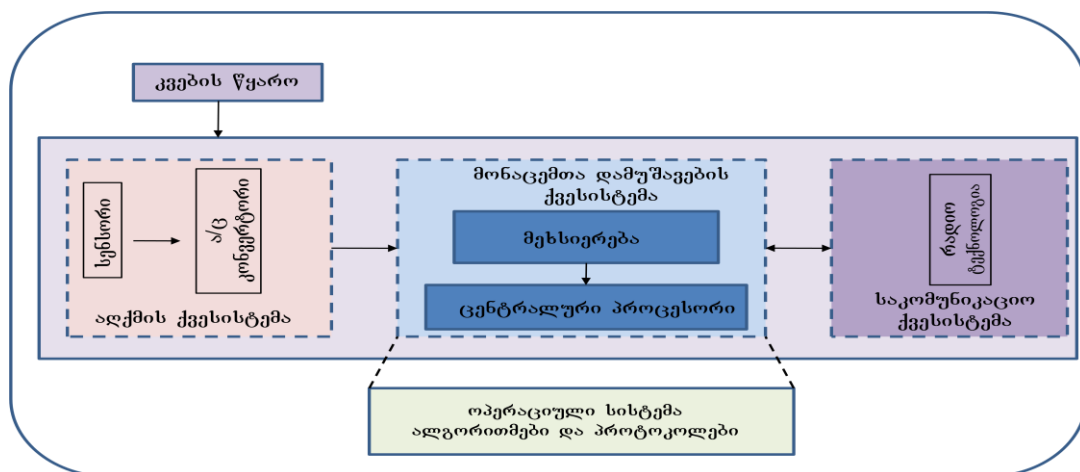
სენსორული ქსელის აგებისას ერთერთ მნიშვნელოვან პარამეტრს წარმოადგენს ენერჯის მოხმარება. სენსორული კვანძი თავისი ზომების შესაბამისად შეიძლება იყოს აღჭურვილი არც თუ დიდი რესურსის მქონე კვების წყაროთი. უმეტესად სენსორული

კვანძი წარმოადგენს მოუმსახურებელ მოწყობილობას და კვების წყაროს შეცვლა შეუძლებელია. იმის გათვალისწინებით, რომ სენსორულმა კვანძმა შეიძლება შეასრულოს როგორც ტერმინალის 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.

მობილური კვანძის მიერ მოხმარებული ენერჯის კლასიკური თანაფარდობა ასე განისაზღვრება: „გადაცემა - მიღება - ლოდინის რეჟიმი - ძილის რეჟიმი“ - „13:9:7:1“. გაძლიერებული ყურადღება ეთმობა ინფორმაციის გადაცემის და მიღების ინტერვალების შემცირებას და დროის იმ წილების ამალვებას, როცა სენსორი იმყოფება ლოდინის ან ძილის რეჟიმში ეს აუცილებლად გასათვალისწინებელია მარშრუტიზაციის ალგორითმების შემუშავებისას.

### 3.2. სენსორული კვანძების არქიტექტურა

სენსორი როგორც ნებისმიერი სატელეკომუნიკაციო კვანძი და/ან ტერმინალი, შედგება აპარატურული ნაწილისაგან და პროგრამული უზრუნველყოფისაგან. ნახ.3.3. მოყვანილი სენსორული კვანძი შედგება შემდეგი ქვესისტემებისაგან: მონიტორინგის, ალქმის, მონაცემთა დამუშავების, საკომუნიკაციო ქვესისტემისაგან და კვების წყაროსაგან.



ნახ.3.3. სენსორული კვანძის არქიტექტურა

მონიტორინგის და აღქმის ქვესისტემა სენსორს საშუალებას აძლევს შეაგროვოს ისეთი მონაცემები გარე გარემოზე როგორცაა ტემპერატურა, სინათლის ძალა, ვიბრაცია, აჩქარება, მაგნიტური ველი, ჰაერის ქიმიური შემადგენლობა, სინოტივე, აკუსტიკა და სხვ. სწორედ ეს ქვესისტემა განსაზღვრავს იმ სფეროს ან დანართებს, რომელშიც შეიძლება გამოყენებული იქნას სენსორი. სენსორს შეიძლება დაემატოს სხვა ქვესისტემა, როგორც მაგ. პოზიციონირება, ელექტრო ენერჯის 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.

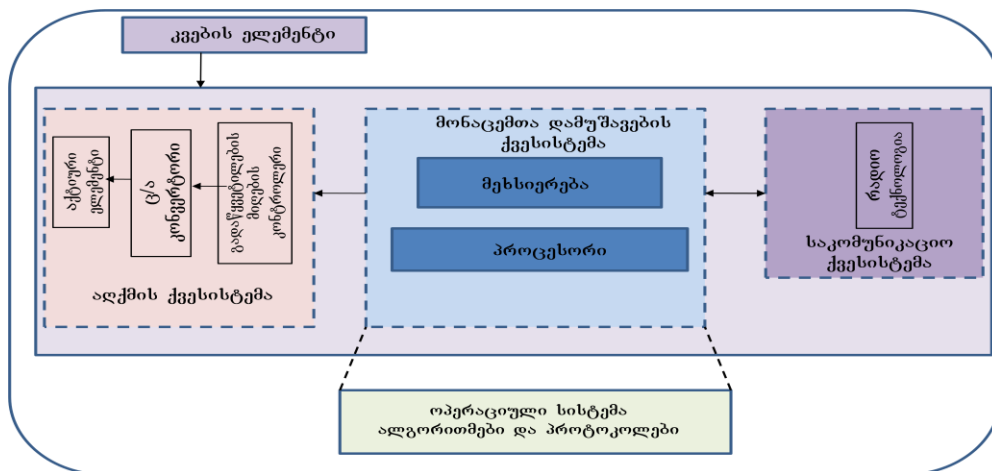
სენსორის, როგორც მცირე ზომის რთული ფუნქციების სატელეკომუნიკაციო მოწყობილობის რეალიზაციის მნიშვნელოვან ტექნიკურ ასპექტს წარმოადგენს:

- **არქიტექტურა.** დღეისათვის მოთხოვნა სენსორის აპარატურული ნაწილისადმი შემდეგია: ცენტრალური პროცესორის სიხშირე არანაკლებ 20 მგჰც, ოპერატიული მეხსიერების მოცულობა არანაკლებ 4 კბიტ, გადაცემის სიჩქარე არანაკლებ 20 კბიტ/წმ. აპარატურული უზრუნველყოფის ოპტიმიზაცია საშუალებას იძლევა შემცირებული იქნას სენსორის ზომა, ოღონდ როგორც წესი ეს იწვევს მისი ღირებულების გაზრდას.
- **ოპერაციული სისტემა (OS).** ოპერაციული სისტემის (OS) ოპტიმიზაცია გამოიყენება ცენტრალური პროცესორის არქიტექტურის გათვალისწინებით. დღეისათვის უფრო პოპულარულს წარმოადგენს OS ღია კოდით Tiny OS,

რომელიც საშუალებას იძლევა საკმაოდ მოქნილად იმართოს სხვადასხვა მწარმოებლების სენსორი.

- **ქსელური ურთიერთქმედება.** ცენტრალური პროცესორის შეზღუდული მწარმოებლურობა არ იძლევა საშუალებას გამოყენებული იქნას IP-ქსელით მარშრუტიზაციის სტანდარტული პროტოკოლები - ოპტიმალური ალგორითმის გათვლის მაღალი სირთულე გადატვირთავს სენსორის ცენტრალურ პროცესორს. შემუშავებულია დიდი რაოდენობით მარშრუტიზაციის სპეციალური პროტოკოლები.

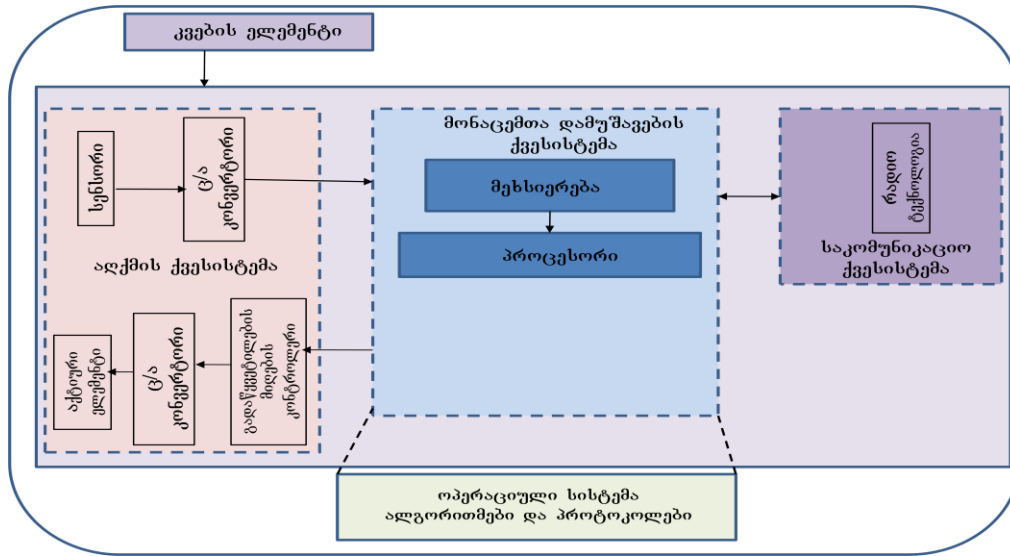
არსებობს სენსორული კვანძის სხვადასხვა არქიტექტურა, რომელიც დაკავშირებულია არა მარტო გასაზომი მახასიათებლების მონიტორინგისა და კონტროლისათვის, არამედ გასაზომ ობიექტზე ზემოქმედებისათვის, ასეთ ელემენტს რომელსაც გაჩნია ობიექტზე ზემოქმედების შესაძლებლობა **აქტორი** ეწოდება. ნახ.3.4.



ნახ.3.4. აქტორული კვანძის არქიტექტურა

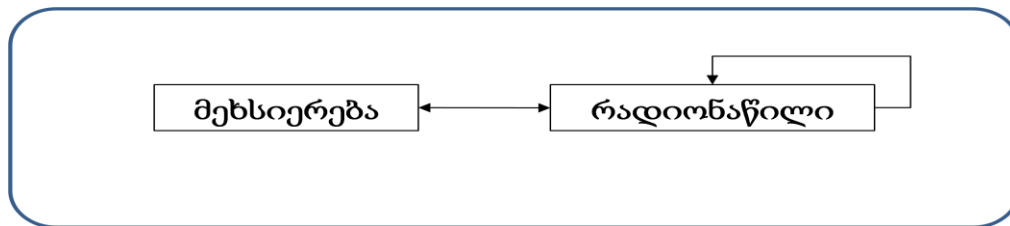
აქტორის არქიტექტურა მსგავსად სენსორული კვანძის არქიტექტურისა, განსხვავდება იმით რომ გარემოსთან ურთიერთქმედებს აქტიური ელემენტი. მაგ., დიაბეტიტ დაავადებული ადამიანისათვის ინსულინის შეყვანა მოწყობილობით. აქტორის არქიტექტურაში ცალკე გამოიყოფა გადაწყვეტილების მიღებაზე ზემოქმედების კონტროლერი. შესაძლებელია აქტორისა და სენსორის გაერთიანება ნახ.3.5. სენსორი და აქტორი შესაძლებელია განიხილებოდეს როგორც

რადიოიდენტიფიკატორი RFID (Radio Frequency Identification), რომელსაც არ გააჩნია გამზომი ნაწილი, მაგრამ ფართოდ შეიძლება მათი გამოყენება, მაგ. პოზიციონირების სისტემებში. RFID-ს შეიძლება ჰქონდეს აქტიური ან პასიური არქიტექტურა. RFID აქტიური არქიტექტურა პრაქტიკულად არ განსხვავდება სენსორული კვანძის არქიტექტურისაგან.



ნახ.3.5. კომბინირებული სენსორული კვანძის არქიტექტურა

პასიურ RFID აქვს უფრო მარტივი არქიტექტურა, რომელიც ხასიათდება კვების ელემენტის არ არსებობით და სპეციალურ ტექნიკური მოწყობილობების - რიდერის აუცილებლობით მისგან ინფორმაციის ამოკითხვისათვის (ნახ.3.6).



ნახ.3.6. პასიური RFID-ის არქიტექტურა

არსებობს ტექნიკური საშუალებების დიდი ნაირსახეობები, რომელთაგანც შეიძლება აიგოს სენსორული ქსელი. სენსორული კვანძებისათვის კონკრეტული გადაწყვეტილების არჩევა, უსადენო სენსორული ქსელის შექმნისას, პირველ რიგში

დამოკიდებულია მათ ფუნქციონალურ შესაძლებლობაზე, ზომაზე, დანახარჯებზე, ენერგეტიკულ მახასიათებლებზე, მოთხოვნილი მომსახურების ხარისხის უზრუნველყოფაზე [19-20].

### 3.3. USN-ში მარშრუტიზაციის ალგორითმების კლასიფიკაცია

რამდენადაც სენსორულ ქსელს შეიძლება არ ჰქონდეს მუდმივი ინფრასტრუქტურა, კლასიკური მარშრუტიზაციის ალგორითმების გამოყენება სენსორული ქსელისათვის შეუძლებელია. ამასთან USN მონაცემთა ტრაფიკი შეიძლება გენერირებული იქნას ისე, რომ ერთი და იგივე ინფორმაცია მიღებული იქნას სხვადასხვა სენსორული კვანძებიდან, რომლებიც ფუნქციონირებს ამა თუ იმ ზონაში. ამასთან სენსორის ზომა და დანახარჯები ლიმიტირებულია. კერძოდ ლიმიტირებულია მათი რესურსი - ენერგია, მეხსიერება, გამოთვლის შესაძლებლობები. ამიტომ ერთი და იგივე ინფორმაციის გადაცემა ქსელით ბევრი სენსორული კვანძის გავლით არამიზნობრივია. აქედან გამომდინარე უსაღებო სენსორული ქსელებისათვის მარშრუტიზაციის ალგორითმების შემუშავებისას გათვალისწინებული უნდა იქნას შემდეგი ფაქტორები:

- *თვითორგანიზება.* სენსორულ ქსელს უნდა გააჩნდეს თვითორგანიზების შესაძლებლობა. აქედან გამომდინარე გამოთვლის შესაძლებლობები, კავშირის და მართვის უზრუნველყოფის შესაძლებლობა საკმარისი უნდა იყოს ავტონომიური არსებობის უზრუნველყოფისათვის.
- *ენერგეტიკული ეფექტურობა.* სენსორული კვანძები პროექტირდება, როგორც წესი ელემენტიდან კვების უზრუნველყოფით და შესაბამისად მათი სიცოცხლის ხანგრძლივობა პირველ რიგში განისაზღვრება ელექტროკვების სისტემით. საკმაოდ ხშირად ენერგიის წყარო შეცვლილი ვერ იქნება. რადგანაც სენსორული კვანძები შეიძლება განთავსდებული იქნას, ადამიანისათვის მიუწვდომელ ადგილზე. ამიტომ ენერგომომხმარებლის მინიმუმიზაცია - ერთერთი მნიშვნელოვანი საკვლევი ამოცანაა უსაღებო სენსორული ქსელისათვის.

- **მოქნილობა.** სენსორულ ქსელებში ალგორითმები უნდა ფლობდნენ საკმაოდ მოქნილობას, რომ შეძლონ ადაპტირება USN სხვადასხვა დანართებთან. სხვადასხვა დანართების ფუნქციონირების პირობა, გარემო და თვით სენსორული კვანძის შესაძლებლობა იცვლება ფართო საზღვრებში. თუმცა ზოგიერთი პირობები შეიძლება წინასწარ იქნას პროგნოზირებული ან მრავალჯერ იცვლებოდეს USN ფუნქციონირების პროცესში ახალი კვანძების შემოტანის მიმდევრობით. ყველა ეს შესაძლებლობები გათვალისწინებული უნდა იქნას უსადენო სენსორული ქსელების ალგორითმების შემუშავებისას.
- **მასშტაბირება.** უსადენო სენსორულ ქსელებში სენსორული კვანძების რიცხვი გადასაწყვეტი ამოცანის მიხედვით შეიძლება იცვლებოდეს რამდენიმე ასეულიდან ათასეულამდე. არაა შემთხვევითი რომ Zigbee სპეციფიკაციაში ერთ ზონაში განთავსებული სენსორული კვანძების რიცხვი, შეიძლება შეადგენდეს 64 000-ს. დიდი მასშტაბის ქსელმა და მაღალი სიმკვრივის ლიმიტირებულმა გატარების ზოლმა უნდა უზრუნველყოს მომსახურების ხარისხი განსაზღვრული დონით.
- **ტოლერანტობა** უარისთქმისადმი. ტრადიციული ქსელებისაგან განსხვავებით სენსორული ქსელი ორგანიზდება შემთხვევითი სახით, სენსორულ კვანძებს შორის ურთიერკავშირიც შემთხვევითია დროში. სენსორული კვანძები შეიძლება გამოვიდეს მწყობრიდან ელექტროკვების დონის არასაკმარისობის გამო, გარემოში კრიტიკული პირობების წარმოშობით, აპარატურული ნაწილის მწყობრიდან გამოსვლით და სხვ. თუ მწყობრიდან გამოვიდა რამდენიმე სენსორული კვანძი ამათ არ უნდა გამოიწვიოს არსებითი შედეგები, როგორც სენსორული ქსელისათვის მთლიანად ასევე მისი ფრაგმენტებისათვის. სხვა სიტყვებით USN უნდა იყოს უგრძობი ამა თუ იმ სენსორული კვანძის უარისთქმისადმი და უნდა გააგრძელოს ფუნქციონირება მომსახურების ხარისხის მოთხოვნილი დონით.

ალგორითმა გარანტია უნდა მოგვცეს, რომ უსადენო სენსორული ქსელით მონაცემები გადაცემული იქნება მოთხოვნილ დროში და საჭირო სიზუსტით.



იდეალურმა ალგორითმა უნდა უზრუნველყოს ინფორმაციის დროული გადაცემა მოცემული სიზუსტით და მინიმალური ენერგო დანახარჯებით.

ცხრ.3.1.-ში მოცემულია USN მარშრუტიზაციის ალგორითმების მარტივი კლასიფიკაცია ტიპური მიდგომის გამოყენებით. ერთდონიან ქსელში ყველა კვანძი თამაშობს ერთნაირ როლს და გააჩნიათ ერთნაირი ფუნქციონალური შესაძლებლობები. შეგროვილი მონაცემები ქსელში გადაიცემა მრავალრანგული მარშრუტიზაციის საშუალებით. ერთდონიან ქსელში ალგორითმებმა უნდა უზრუნველყოს დიდი მოცულობის სატრანზიტო ინფორმაციის გადაცემა.

ერთდონიანი ქსელისათვის ალგორითმები ძირითადად წარმოადგენენ ცენტრალიზებულს, რამდენდაც მათი ძირითადი ამოცანა მდგომარეობს მონაცემთა ტრანზიტის უზრუნველყოფაში ერთდონიანი სენსორული ქსელით. უმეტეს შემთხვევაში ერთდონიანი ქსელისათვის ალგორითმები საკმაოდ რთულია, რადგანაც არსებობს როგორც მასშტაბირება, ასევე USN ტოპოლოგიის დინამიური ცვლილება.

ცხრ.3.1. 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

ალგორითმი SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation) და DD (Direct Diffusion) წარმოადგენენ საბაზოს ერთდონიანი უსადენო სენსორული ქსელებისათვის, და მათ საფუძველზე შემუშავებულია ყველა ერთდონიანი ალგორითმები. იერარქიულ ქსელებში სენსორული კვანძები თამაშობენ სხვადასხვა როლს, წარმოიქმნება სენსორული

კვანძების ორი კატეგორია: სათავო კლასტერის კვანძი CH (Cluster Head) და კლასტერის წევრები. სენსორული კვანძების უფრო მაღალი დონე აგროვებს ინფორმაციას კლასტერის წევრებისაგან და მართავს უფრო დაბალი დონით. მონაცემთა აგრეგაციის შემდეგ, კვანძები უფრო მაღალი დონის აუცილობლობისას მიმართავენ მას შემდგომ დონეზე.

სამდონიან იერარქიულ უსადენო სენსორულ ქსელში კლასტერის სათავო კვანძები ურთიერთქმედებენ საერთო სარგებლობის კავშირის კვანძებთან. ყოველი სათავო კვანძი აგროვებს მონაცემებს თავისი კლასტერის კვანძებიდან. აგრეგირებას უკეთებს მათ და გადასცემს შემდგომში. იერარქიული მარშრუტიზაციის ყველა ალგორითმმა უნდა უზრუნველყოს უკეთესი CH არჩევა. რამდენდაც კლასტერის სათავო კვანძები პასუხისმგებელია მონაცემთა შეგროვებაზე, აგრეგაციაზე და გადაცემაზე საკმაოდ დიდ მანძილზე, ისინი უნდა იყვნენ ენერგეტიკულად დამოუკიდებელი დიდი ხნით, ვიდრე რიგითი კლასტერის წევრები.

კლასტერის სათავო კვანძის ამორჩევის ალგორითმი ითვალისწინებს როტაციას და პერიოდულად კლასტერის სათავო კვანძის ფუნქციების შეცვლას დატვირთვის განაწილებისაგან დამოკიდებულებით.

ერთდონიანი და იერარქიული მარშრუტიზაციის ალგორითმების შედარებისას უნდა აღინიშნოს რომ იერარქიული ალგორითმები გვთავაზობს დიდ შესაძლებლობებს USN სხვადასხვა დანართების განხორციელებისათვის. იერარქიული ალგორითმების მახასიათებლებია:

- იერარქიული მარშრუტიზაცია ქსელში წარმოადგენს ეფექტურს ენერგოდანახარჯების შემცირების გზით. სინამდვილეში, კლასტერის წევრების მართვა კლასტერის სათავო კვანძის მხრიდან ამცირებს დატვირთვას კლასტერის წევრებზე (დროის ყოველ მომენტში ენერგიას ხარჯავს მხოლოდ აქტიური კვანძი, CH უზრუნველყოფს ტრანზიტს). მონაცემთა აგრეგაციის ხარჯზე კლასტერის სათავო კვანძი ამცირებს მონაცემების ნაკადს გარე ქსელში.

- იერარქიული მარშრუტიზაცია საშუალებას იძლევა მოქნილად გადაწყდეს სხვადასხვა ამოცანები სენსორული კვანძების შესაძლებლობების გათვალისწინებით. იერარქიული მარშრუტიზაცია საშუალებას იძლევა ქსელის დატვირთვის ბალანსირების. ამასთან კვანძებმა მაღალი ენერგოტევადობით (შესაძლებელია მუდმივი ენერგო დატვირთვით) შეიძლება მონაცემები დააგრეგიროს და გადასცეს ისინი საერთო სარგებლობის კავშირის ქსელს, ამავე დროს კვანძები დაბალი ენერგოტევადობით შეიძლება გამოყენებული იქნას გამონაკლისად მონაცემთა შეგროვებისათვის.
- იერარქიული მარშრუტიზაცია საშუალებას იძლევა საკმაოდ უბრალოდ მოხდეს კოლიზიის თავიდან აცილება. კლასტერის წევრები სათავო კვანძის ხელმძღვანელობით უნდა მიყვნენ ინფორმაციის გადაცემის, მიღების და ინფორმაციის წაკითხვის სრულად განსაზღვრულ გრაფიკს. შესაბამისად, სენსორულ კვანძებს შეუძლიათ დახარჯონ ნაკლები ენერგია, როცა ისინი იმყოფებიან თავისუფალ რეჟიმში და აქტიურდებიან მხოლოდ გადაცემის, მიღების და წაკითხვის დროის ინტერვალში. შედეგად, ბუნებრივია რომ კლასტერში მცირდება კოლიზია, და ქსელს შეუძლია მოემსახუროს უფრო მაღალ დატვირთვას. ამასთან დაკავშირებით იერარქიული მარშრუტიზაცია ხშირად გამოიყენება მსხვილმასშტაბურ უსადენო სენსორული ქსელებისათვის, რომელიც შედგება ასეულობით და ათასეულობით კვანძისაგან.
- იერარქიული მარშრუტიზაცია მარტივია რეალიზაციაში. თუმცა ერთდონიანმა მარშრუტიზაციამ შეიძლება გამოიყენოს ოპტიმალური მარშრუტი. სენსორული კვანძების შეზღუდული შესაძლებლობა შეიძლება გახდეს პრობლემა რთული ალგორითმების და სქემების რეალიზაციისათვის. იერარქიული მარშრუტიზაცია გვთავაზობს დაყოფილ შეერთებას - შიდაკლასტერულს და გარეს. მხოლოდ კლასტერის სათავო კვანძია პასუხისმგებელია გარე შეერთებაზე, იმ დროს როცა კლასტერის წევრები ურთიერთქმედებენ შიდა კლასტერულ დონეზე. ასეთი მარტივი მარშრუტიზაცია ამცირებს შეტყობინებების რიცხვს კლასტერში.

- იერარქიული მარშრუტიზაცია ამარტივებს მოთხოვნის დაგზავნას ერდონიანთან შედარებით. როცა, მაგალითად გარე ქსელიდან ან რაბის მხრიდან აუცილებელია მოთხოვნის გაგზავნა, ეს მოთხოვნა მიემართება მხოლოდ კლასტერის სათავო კვანძისაკენ. ყოველი კლასტერის სათავო კვანძი აგზავნის შემდგომ მოთხოვნას კლასტერის წევრების შესაძლებლობის და აუცილებლობის გათვალისწინებით. ასეთი მიდგომა ასევე საშუალებას იძლევა შემცირდეს შეტყობინებების რიცხვი.

თუმცა იერარქიული მარშრუტიზაცია ფლობს ნაკლოვანებებს - მაგალითად, სინქრონიზაციაზე დამატებითი დროის დახარჯვა და კლასტერული მართვისათვის საჭირო დიდი სათაური. ამის მიუხედავად იერარქიული მარშრუტიზაცია წარმოადგენს სასურველს USN-ის აგებისათვის, განსაკუთრებით მსხვილმასშტაბურისას [21-22].

### **3.4. კლასტერში სათავო კვანძის ამორჩევის ალგორითმები**

სენსორული ქსელებისათვის ალგორითმების შექმნის ძირითად პრობლემას წარმოადგენს კლასტერის სათავო კვანძის ამორჩევა. არსებობს კლასტერის სათავო კვანძის ამორჩევის ორი მიდგომა: შემთხვევითი და წინასწარ განსაზღვრული ამორჩევა. შემთხვევითი ამორჩევისას სათავო კვანძის როტაცია შეიძლება მოხდეს კლასტერის ყველა წევრს შორის, მათი მახასიათებლების ჩათვლით მიმდინარე დროის მომენტში.

#### **3.4.1. სათავო კვანძის შემთხვევითი ამორჩევის ალგორითმი LEACH**

იერარქიული ალგორითმი ადაპტიური კლასტერიზაციით ენერჯის დაბალი მოხმარებით LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) გვთავაზობს ენერჯის ხარჯის ბალანსირების უზრუნველყოფას უსადენო სენსორულ ქსელებში. LEACH ალგორითმი წარმოადგენს საბაზოს, რომელიც იმაში მდგომარეობს, რომ სენსორული კვანძი შეიძლება მთავარ კვანძად იქნას არჩეული შემთხვევითი გზით, მათი ფუნქციონირების შესახებ ინფორმაციის საფუძველზე, წინმსწრებ დროის მომენტში.

ყოველ სენსორულ კვანძს აქვს ზღვარი  $T_h(\text{LEACH})$ , რომელიც შეესაბამება წინასწარ განსაზღვრული მთავარი სენსორული კვანძების რიცხვს ქსელში. თუ კვანძების

ინტეგრირებული შემთხვევითი რაოდენობა მცირეა ვიდრე  $T_h(\text{LEACH})$ , მაშინ სენსორული კვანძი შეიძლება გახდეს სათავო, წინააღმდეგ შემთხვევაში ეს კვანძი რჩება მხოლოდ კლასტერის წევრად.  $T_h(\text{LEACH})$  გამოთვლა წარმოადგენს მთავარ ამოცანას LEACH ალგორითმის რეალიზაციისას.

$$T_h(\text{LEACH}) = \begin{cases} \frac{p}{1-p \left( r \bmod \frac{1}{p} \right)}, & h \in G \\ 0 & \text{დანარჩენ შემთხვევებში} \end{cases} \quad (3.1).$$

$p$ -სათავო კვანძის წინასწარ განსაზღვრული %-ია ყველა სენსორულ კვანძებს შორის.  $G$ -სენსორული კვანძების რიცხვია,  $r$ -სენსორული ქსელის ფუნქციონირების მიმდინარე ინტერვალი.  $p$ -ს ოპტიმალური მნიშვნელობა ფასდება 5%-ით საერთო სენსორული კვანძების რაოდენობიდან.

სენსორული ქსელის ფუნქციონირების მიმდინარე ინტერვალი განისაზღვრება როგორც  $r$ ,  $G$ -სენსორული კვანძების რაოდენობა, რომელიც არ იყო არჩეული სათავოდ ბოლო  $1/p$  ინტერვალის განმავლობაში. ეს ტოლობა განსაზღვრავს იმ ფაქტს, რომ კვანძს რომელიც იყო არჩეული სათავოდ სენსორული ქსელის ფუნქციონირების ბოლო ინტერვალში, აღარ გააჩნია შანსი საერთოდ, ან გააჩნია მინიმალური შანსი ისევ გახდეს სათავო განხილულ ინტერვალში. შედეგად სათავო კვანძის ასეთ არჩევას უნარი შესწევს ქსელის ყოველი სენსორული კვანძის ენერგეტიკული დანახარჯების ოპტიმიზაციისათვის. ამასთან სათავო კვანძის არჩევისას სხვა სენსორული კვანძები ირჩევენ კლასტერის ერთერთ წევრს სათავო კვანძად მისაღები სიგნალის სიმძლავრის კონტროლისათვის RSS (Received Signal Strength).

იმის შემდეგ რაც კლასტერი ფორმირებულია, სათავო კვანძი დააგზავნის გადაცემის განრიგს და მოსთხოვს თავისი კლასტერის წევრებს მონაცემთა გადაცემას TDMA ცნობილი მიდგომის საფუძველზე. სათავო კვანძი შემდგომ ფაზაში პასუხისმგებელია მონაცემთა აგრეგირებაზე და მათ გადაცემაზე რაბისათვის და საერთო სარგებლობის კავშირის ქსელში. მონაცემთა მთელი ნაკრები ლოკალიზდება კლასტერში. განსაზღვრული დროის შემდეგ სტაბილურ ფაზაში ყოფნისას, ქსელი ისევ გადადის ფორმირების სტადიაში. ამასთან უნდა აღინიშნოს, რომ ფორმირების სტადია

არსებითად ხანმოკლეა, ვიდრე სტაბილური. ამიტომ LEACH გააჩნია საკმაოდ მოკლე სათაური.

LEACH წარმოადგენს ძალიან ეფექტურ ალგორითმს, მისი საშუალებით მიიღწევა ენერგო დანახარჯების შემცირება 7-ჯერ და მეტად სენსორული კვანძების პირდაპირ ურთიერთქმედებასთან შედარებით და 4,8-ჯერ სხვა ალგორითმებთან შედარებით. სათავო სახით შეიძლება აირჩეს კლასტერის წევრი ადრე აურჩეველი არადამაკმაყოფილებელი ენერგეტიკული მახასიათებლებით [23].

### **3.4.2. HEED ალგორითმი სათავო კვანძის წინასწარ განსაზღვრული არჩევით**

ჰიბრიდული განაწილებული ენერგო ეფექტური კლასტერიზაციის ალგორითმი HEED (Hybrid Energy Efficient Distributed) წარმოადგენს LEACH ალგორითმის განვითარებას. „ცუდი“ კლასტერის ამორჩევის პრობლემის გადალახვისათვის LEACH-ში სათავო კვანძის ამორჩევის სახით, HEED ალგორითმი გვთავაზობს სათავო კვანძის წინასწარ განსაზღვრულ ამორჩევას.

HEED ალგორითმი აყენებს კვანძის არჩევის ალბათობას სათავოდ მისი არსებული ენერგო შესაძლებლობის მიხედვით და გადაწყვეტილება მიიღება ენერგო დანახარჯებზე დამოკიდებულებით. HEED ალგორითმი ითვალისწინებს მრავალრანგულ ურთიერთქმედების ბუნებას უსადენო სენსორულ ქსელებში ენერგიის შემდგომი დაზოგვისათვის.

HEED იყენებს სენსორული კვანძის მიმდინარე ენერგო ტევადობის ინფორმაციას, როგორც ძირითად პარამეტრს კლასტერის წევრის არჩევისათვის სათავო კვანძის სახით. სათავო კვანძის სახით არჩეული კვანძი ინფორმაციას აწვდის ახლომდებარე კვანძებს იმის შესახებ, რომ ის გახდა სათავო. ეს შეტყობინებები სათავო კვანძიდან გამოიყენება სენსორული კვანძების მიერ თავისთვის საუკეთესო სათავო კვანძის ამორჩევისათვის და შესაბამისად კლასტერის არჩევისათვის. იმ შემთხვევაში თუ კლასტერის სათავო კვანძი იმყოფება შორს საერთო სარგებლობის კავშირის ქსელის რაბისაგან, მას შეუძლია გადასცეს აგრეგირებული ინფორმაცია სხვა კლასტერის სათავო კვანძის გავლით [24].

### 3.4.3. სათავო კვანძის შემთხვევითი ამორჩევის ალგორითმი ERA

სათავო კვანძის შემთხვევითი ამორჩევის ალგორითმი ERA (Energy Residue Aware) წარმოადგენს დარჩენილი ენერჯის შესახებ შეტყობინების კიდევ ერთ იერარქიული მარშრუტიზაციის ალგორითმს. ERA ალგორითმიც LEACH ალგორითმის განვითარებაა და მოიცავს კლასტერში სათავო კვანძის ამორჩევის საკითხის ანალიზს ურთიერთქმედებისას დანახარჯების საფუძველზე. ურთიერთქმედების დანახარჯები მოიცავს: კლასტერის სათავო კვანძის დარჩენილ ენერჯიას ( $E_{CH-rem}$ ), ენერჯის დანახარჯებს სათავო კვანძის ურთიერთქმედებაზე საბაზო სადგურთან ( $E_{t0BS}$ ), ენერჯის დანახარჯებს კლასტერის წევრის ურთიერთქმედების სათავო კვანძთან ( $E_{t0CH}$ ).

ამაში მდგომარეობს HEED ალგორითმის პრინციპული განსხვავება: ERA ალგორითმი იყენებს იგივე სქემას სათავო კვანძის არჩევისას რასაც LEACH (შემთხვევითი ამორჩევის), მაგრამ უზუნველყოფს უკეთეს არჩევას სათავო კვანძისას დამატებითი პატამეტრების გამოყენების ხარჯზე.

$$\begin{cases} (E_{CH-res})_i = (E_{CH-rem})_i - (E_{t0BS})_i, & i \in S_c \\ (E_{nonCH-res})_j = (E_{nonCH-rem})_j - (E_{t0BS})_{ji}, & j \in S_N, \forall i \in S_c \\ \max\{(E_{CH-res})_i + (E_{nonCH})_j | \forall i \in S_c\} & j \in S_N \end{cases} \quad (3.2)$$

(3.2) ტოლობა საშუალებას იძლევა განისაზღვროს კლასტერის დანახარჯები სათავო კვანძის ამორჩევისას და იპოვნოს კლასტერის სათავო კვანძი მაქსიმალური დარჩენილი ენერჯოტევადობით. (3.2)-ში სიმრავლე  $S_c$  წარმოადგენს სიმრავლეს სათავო კვანძებისათვის, სიმრავლე  $S_N$  წარმოადგენს სიმრავლეს კლასტერის წევრებისათვის. ERA ალგორითმი შეიძლება გამოყენებული იქნას როგორც შიდაკლასტერული ასევე კლასტერებს შორს დაკავშირებისათვის [25].

### 3.4.4. PEGASIS ალგორითმი და იერარქიული PEGASIS

PEGASIS (Power-Efficient Gathering Sensor Information Systems) ალგორითმი ეფექტურია სენსორებისაგან სიმძლავრის ინფორმაციის შეკრების სისტემისათვის. არ აქვს პირდაპირი კავშირი უსადენო სენსორული ქსელების კლასტერულ ორგანიზაციასთან.

PEGASIS ალგორითმი დაფუძნებულია LEACH ალგორითმზე სენსორული კვანძების მიმდევრობით ჯაჭვში ორგანიზებისათვის და ჯაჭვში პირველი კვანძის პერიოდული განახლებისათვის ისევე როგორც გათვალისწინებულია კლასტერულ USN-ში. PEGASIS ალგორითმში ჯაჭვი ფორმირდება ისე რომ სენსორული კვანძები ურთიერთქმედებენ მხოლოდ ახლომდებარესთან და მხოლოდ ერთი კვანძში იყოს საბაზო სადგურის გადამცემი სენსორული ქსელის ფუნქციონირების ყოველ ინტერვალში.

ყოველი კვანძი ახლომდებარე კვანძის განსაზღვრისათვის იყენებს RSS მნიშვნელობას, კვანძამდე დაშორების განსაზღვრისათვის და შემდეგ ირჩევს სიგნალის სიმძლავრის მნიშვნელობას ისე, რომ ურთიერთქმედებს მხოლოდ ახლოსმდებარე კვანძებთან. ჯაჭვის აგება საშუალებას იძლევა მინიმიზირდეს დაშორება, რომელზედაც გადაიცემა ინფორმაცია, ხოლო ჯაჭვში პირველი სენსორის როტაცია ზრდის ცალკეული სენსორული კვანძების ფუნქციონირების ხანგრძლივობას, ასეთი მიდგომა ამცირებს უსადენო სენსორული ქსელის საერთო ენერგომოხმარებას და საერთო ჯამში გაზრდის USN ფუნქციონირების ხანგრძლივობას.

PEGASIS ალგორითმის ჯაჭვები ქმნიან დამატებით დაყოვნებას ინფორმაციის გადაცემისას. PEGASIS ალგორითმში ტოპოლოგიის დინამიური ცვლილება მოითხოვს რომ ყოველმა სენსორულმა კვანძმა იცოდეს თავისი ახლო მეზობლის კვანძის ენერგეტიკული შესაძლებლობის შესახებ, მონაცემთა გადაცემის მარშრუტის გამოთვლისათვის. ეს უკანასკნელი არსებითად ართულებს სათაურს და გარდა ამისა მიდის სენსორული ქსელის ფუნქციონირების პრობლემებთან დიდი დატვირთვის პირობებში. დაყოვნების შემცირებისათვის შემოთავაზებული იქნა იერარქიული ალგორითმი PEGASIS. იერარქიული ალგორითმი PEGASIS იყენებს სიგნალების CDMA კოდირებას და სენსორული კვანძების სივრცით დაყოფას. ალგორითმი აიგება იერარქიული ხის სახით, ამასთან რომელიმე დონის ყოველი ამორჩეული კვანძი, მონაცემებს იერარქიის ზედა დონის კვანძში გადასცემს. ეს მეთოდი საშუალებას იძლევა უზრუნველყოთ მონაცემთა პარალელური გადაცემა.



### 3.4.5. RRCH ალგორითმი

RRCH (Round Robin Cluster Head) კლასტერში სათავო კვანძის ციკლური რიგითობის ამორჩევის ალგორითმი გვთავაზობს კლასტერის ფორმირებას ერთდროულად. სათავო კვანძის ამორჩევისათვის კლასტერის ფიქსაციის შემდეგ მისი ფუნქციონირების განმავლობაში გამოიყენება ცნობილი ციკლური რიგითობის მეთოდი. LEACH-ში კლასტერის ყოველი წევრი შეიძლება გახდეს სათავო კვანძი, რომელიც სათავო კვანძი კლასტერის წევრებისათვის აწესებს განრიგს.

კლასტერის ფორმირების პროცესის სიმარტივის გათვალისწინებით RRCH თავიდან იცილებს ენერჯის დანაკარგს რეკლასტერიზაციისას. ენერგეტიკული პარამეტრების თვალსაზრისით RRCH აქვს უკეთესი შედეგები ვიდრე LEACH. ოღონდ კლასტერის ხისტი ფიქსაცია მიდის იქამდე რომ კლასტერიდან ერთმა შეიძლება შეწყვიტოს მომსახურების თავისი ფუნქციები დაკისრებული ხარისხით, ვიდრე LEACH-მა, რომელშიც რეკლასტერიზაცია უზრუნველყოფს განაწილდეს რესურსები ერთი სენსორული ქსელის ყველა კლასტერებს შორის თანაბრად.

## 3.5. კლასტერიზაციის განაწილებული ალგორითმი

### 3.5.1. მობილური სენსორული ქსელი

მობილურ სენსორულ ქსელში MSN (Mobile Sensor Networks) შენარჩუნებულია USN უსადენო სენსორული ქსელის ყველა განსაკუთრებულობები და ამასთან დამატებულია მობილურობა.

MSN-ში გამოიყენება კლასტერული არქიტექტურა, ამიტომ MSN-ისათვის კლასტერის ორგანიზაციის საუკეთესო ვარიანტის ძებნა და სათავო კვანძის ამორჩევა წარმოადგენს აქტუალურ ამოცანას. სტაციონარულ USN-ში კლასტერიზაციის ალგორითმს არ შეუძლია ადეკვატურად ასახოს MSN-ში მიმდინარე პროცესები, მოითხოვს ახალი ალგორითმების შემუშავებას.

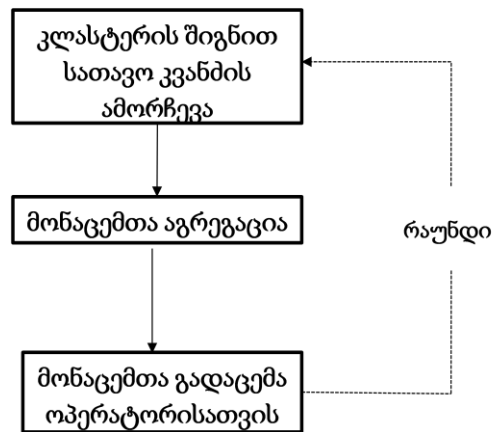
მობილურ სენსორულ ქსელში სენსორული კვანძები, როგორც წესი დგებიან მობილურ პლატფორმაზე და აუცილებლობისას შეუძლიათ გეოგრაფიული გადაადგილება. აღსანიშნავია რომ სხვა ტიპის უსადენო ქსელებისგან განსხვავებით - მობილური AdHoc ქსელს უწოდებენ MANET, სადაც მობილობა განიხილება როგორც არაკონტროლირებადი ფაქტორი. MSN-ში მობილობა შეიძლება განიხილებოდეს, როგორც ღირებული მართვადი შესაძლებლობა, რის საშუალებითაც შეიძლება მიღებული იქნას უფრო მეტად ინტელექტუალური და უფრო მეტად მოქნილი და გარემო პირობების ადექვატური სენსორული ქსელი, ვიდრე სტაციონარული USN. მაგალითად, მართვადი მობილობა შეტანილია სენსორულ კვანძში ქსელის სიმყარის უზრუნველყოფისათვის. მითითებული მიდგომა, დაფუძნებული წინასწარ განსაზღვრული კაბელური ქსელის გამოყენებაზე, არ იძლეოდა საშუალებას აგებულიყო ქსელი შემთხვევითი მოვლენისათვის. ასეთ პირობებში ბუნებრივად გამოიყურება ალგორითმის გამოჩენა LEACH-Mobile (LEACH-M), როგორც LEACH ვარიანტი, რომელიც მოიცავს მობილურობას. ძირითადი სხვაობა LEACH-M-სა და ახალი ალგორითმის შექმნას შორის არის ის, რომ შემოთავაზებული ალგორითმი უზრუნველყოფს არსებითად ქსელის სიცოცხლის დროის გაზრდას და ფორმირებული კლასტერის სტაბილურობას, პროგნოზირების კომბინირებული კრიტერიუმების გამოყენების ხარჯზე (იხ.3.5.2).

უსადენო სენსორული ქსელის ახალი კლასტერიზაციის ალგორითმი, SCA (Static Cluster Algorithm), საშუალებას იძლევა უზრუნველყოფილი იქნას ქსელით რაციონალური დაფარვა მაქსიმალური სიცოცხლის ციკლისას და ითვალისწინებს სენსორული კვანძების მობილურობას. ალგორითმი გვთავაზობს მუშაობას ჰომოგენური მობილური უსადენო სენსორული ქსელის კვანძების შემთხვევითი განთავსებით საბაზო სადგურის (სს) არსებობისას, რომელიც წარმოადგენს რაბს სენსორულ ქსელსა და ოპერატორს შორის [26].

ქსელის კლასტერული ორგანიზება გულისხმობს ორ როლს, რომელიც სენსორულმა კვანძებმა შეიძლება ითამაშონ - სათავო კვანძი და კლასტერის წევრი. ჰომოგენური სენსორული ქსელი შედგება ერთნაირი მახასიათებლების მქონე

კვანძებისაგან, ყოველ კვანძს შეუძლია თავის თავზე აიღოს ნებისმიერი როლი. კლასტერის სათავე კვანძი დაკავებულია კლასტერის წევრებიდან მონაცემთა მიღებით, მათი აგრეგაციით და შემდგომ გადაცემაზე სს-სათვის, კავშირის შედგენის გაწერით კლასტერის წევრებთან. სენსორული ქსელის სიცოცხლის ციკლი დაყოფილია რაუნდებად.

ყოველ რაუნდში სათავე კვანძი იღებს ინფორმაციას კლასტერის წევრებიდან, გადასცემს აგრეგირებულ ინფორმაციას რაბს და აუცილებლობისას სათავე კვანძის ფუნქციებს გადასცემს კლასტერის სხვა წევრებს შესაფერისი პარამეტრებით (ნახ.3.7). ორ კვანძს შეუძლია გაცვალოს ინფორმაცია, თუ მათ შორის დაშორება არ აჭარბებს კავშირის მაქსიმალურ რადიუსს. წინააღმდეგ შემთხვევაში ეს კვანძი არ მიიღებს მონაწილეობას მიმდინარე რაუნდში, თუ დისტანცია შეწყდება, ის შეძლებს მონაწილეობა მიიღოს შემდგომ რაუნდებში. სენსორი ითვლება „მკვდრად“ თუ მისი სათადარიგო ენერჯია გამოილია, ხოლო კლასტერი ითვლება „მკვდრად“ თუ არ არის მასში ცოცხალი კვანძი.



ნახ.3.7. რაუნდი

ქსელის ყოველი კვანძი აღჭურვილია კოორდინატის განსაზღვრის სისტემით: ეს შეიძლება მოხდეს გლობალური პოზიციონირების ერთ-ერთი GPS სისტემით. სივრცეში კვანძების მოძრაობის კანონი უზრუნველყოფს მოძრაობის მიმართულების გათვლას სამ სიბრტყეში  $(dx_n, dy_n, dz_n)$ , მოძრაობის სიჩქარეს  $V_n$ , კოორდინატებს  $(x_n, y_n, z_n)$ , სადაც  $n$  რაუნდის ნომერია, და ეს პარამეტრები ექვემდებარება ქვემოთ მოცემულ გამოსახულებებს:

- მიმართულება:

$$(dx_n, dy_n, dz_n) = (dx_{n-1}k_1 + rand_x k_2, dy_{n-1}k_1 + rand_y k_2, dz_{n-1}k_1 + rand_z k_2) \quad (3.3)$$

- სიჩქარე:

$$V_n = V_{n-1}k_1 + rand_v k_2 \quad (3.4)$$

- კოორდინატები:

$$(x_n, y_n, z_n) = (x_{n-1} + V_n dx_n, y_{n-1} + V_n dy_n, z_{n-1} + V_n dz_n) \quad (3.5)$$

კოეფიციენტები  $k_1$  და  $k_2$  საშუალებას იძლევა შეიცვალოს მოძრაობა, წინა რაუნდში მოძრაობის ხასიათის გათვალისწინებით, rand- შემთხვევითი რიცხვია.

ალგორითმის ძირითადი განსაკუთრებულობაა - კლასტერის ფიქსირებული განთავსება და ზომა. ქსელის ინიციალიზაციის პროცესში, რომელიც ხდება მუშაობის დაწყებისას, ერთხელ განისაზღვრება კოორდინატები და ქსელის კლასტერის ზომა. ყოველი კვანძი ცნობს კლასტერების ცენტრების კოორდინატორებს და სს-დან მის რიგით ნომერს, რომელსაც გადასცემს მათ ფართო მაუწყებლობის პაკეტებით. შემდეგ ყოველმა სენსორმა იცის თავისი ადგილმდებარეობა, განსაზღვრავს თავის რეიტინგს Rtg, რომელიც წარმოადგენს კლასტერის ახლომდებარე ცენტრამდე დაშორებას და გამოთვლის თავისი კლასტერის ნომერს. კლასტერის სათავო კვანძად ხდება კვანძი, რომელიც ყველაზე ახლოა კლასტერის ცენტრალურ წერტილთან და გააჩნია ენერჯის საკმარისი მარაგი. დანარჩენი კვანძები, რომლებიც იმყოფებიან ამ კლასტერში, ხდებიან მისი წევრები და გადასცემენ მონაცემებს თავის სათავო კვანძს ერთხელ რაუნდის განმავლობაში, რომელიც აგრეგირებს მონაცემებს და გადასცემს მათ შემდეგ რაბით ოპერატორს.

უსადენო მობილური სენსორული ქსელის კვანძებს შორის კავშირი აიგება TDMA მეთოდით. ყოველი სათავო კვანძი ადგენს განრიგს თავისი კლასტერებისათვის, არეზერვებს სლოტებს განრიგში ახალი კვანძების ჩართვისათვის, რომელიც გადასულია ერთი კლასტერიდან მეორეში. ალგორითმს შეუძლიათ უზრუნველყოს მონაცემთა გადაცემა სათავო კვანძიდან სს-სათვის სათავო კვანძის გავლით მეზობელი კლასტერიდან, იცის ქსელში ყველა კლასტერის განთავსება, იმ შემთხვევაში თუ

მანძილი სს-მდე აჭარბებს კვანძის რადიოკავშირის მანძილს, ამისათვის TDMA-ში განრიგები რეზერვირდება დამატებითი სლოტებით.

კლასტერის წევრი უგზავნის სათავო კვანძს შეტყობინებას, რომელიც შედგება: კლასტერის და გამგზავნის მისამართის, მონაცემების მიმდინარე რეიტინგის –  $Rtg$ -სგან. სათავო კვანძი აგზავნის პასუხს, რომელიც ადასტურებს მიღებას. პასუხში მითითებულია კლასტერის და მიმღების მისამართი, ასევე მიმდინარე რეიტინგი  $Rtg_h$ , თუ  $Rtg_h \leq Rtg$ . წინააღმდეგ შემთხვევაში სათავო კვანძის როლი გადაეცემა თანამოსაუბრეს. თუ კვანძის ენერჯია  $E$  ნაკლებია ზღვრულზე  $E_{min}$ , მაშინ რეიტინგი ხდება მაქსიმალური, რაც ხელს უშლის სათავო კვანძად მის დანიშვნას:

$$\begin{cases} Rtg = d, E > E_{min} \\ Rtg = 0xFFFF; E \leq E_{min} \end{cases} \quad (3.6)$$

სენსორულ კვანძებს შეუძლიათ იმოძრაონ როგორც კლასტერის შიგნით, ასევე მათ შორის. ერთი კლასტერიდან მეორეში გადასვლისას სენსორული კვანძი განსაზღვრავს თავის კოორდინატებს. კლასტერებს შორის გადაადგილებისას სენსორი ელოდება სლოტს კლასტერის განრიგში, რომელიც დარეზერვებულია ახალი წევრებისათვის და აგზავნის მონაცემებს. სათავო კვანძი გამოყოფს სლოტს თავის განრიგში ახალი კვანძებისათვის. შეტყობინების არარსებობისას შესაბამის TDMA-სლოტში სათავო კვანძი ათავისუფლებს სლოტს.

ალგორითმი LEACH-M ფლობს ყველა უპირატესობას საბაზო LEACH-თან შედარებით, მაგრამ ასევე შეიძლება გამოყენებული იქნას უსადენო მობილური სენსორული ქსელისათვის.

შეტყობინების მიღება-გადაცემაზე დახარჯული ენერჯია:

$$E_{tx} = E_{elec} m + E_{amp} m d^2 \quad (3.7)$$

$$E_{rx} = (E_{elec} + E_{ag})m \text{ (სათავო კვანძისათვის)} \quad (3.8)$$

$$E_{rx} = E_{elec} m \text{ (კლასტერის წევრისათვის)} \quad (3.9)$$

LEACH-M ალგორითმის საწყისი პარამეტრების შეტყობინების სიგრძე შეიძლება შედგებოდეს 80 ბიტისაგან სათავო კვანძის როლის შემთხვევაში და 40 ბიტისაგან შეტყობინების დადასტურებისას. ასევე გათვალისწინებულია ენერჯის დანახარჯი TDMA განრიგის ფორმირებაზე და მარშრუტიზაციის ცხრილის შედგენაზე, მეზობელი კლასტერებიდან მონაცემთა გადაცემისათვის სათავო კვანძით (ცხრ.3.2).

ცხრ.3.2. LEACH-M ალგორითმის პარამეტრები

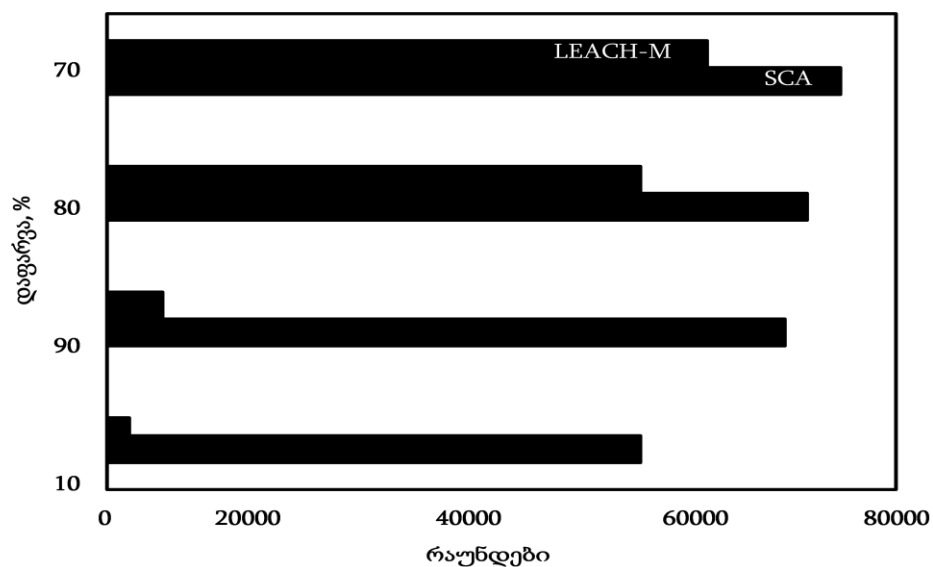
აღნიშვნა	მნიშვნელობა	განზომილება	კომენტარი
N	4000	ცალი	კვანძების რიცხვი
P	5	%	LEACH-M-ისთვის პარამეტრი
x	100	მ	სენსორული ველის სიგრძე
y	100	მ	სენსორული ველის სიგანე
z	100	მ	სენსორული ველის სიმაღლე
E <sub>s</sub>	1	ჯ	კვანძის საწყისი ენერჯია
E <sub>elec</sub>	50	ნჯ	მიღებაზე დანახარჯები
E <sub>amp</sub>	10	პჯ/ბიტ/მ <sup>2</sup>	არამწარმოებლური დანახარჯები
m	80/40	ბიტ	შეტყობინების სიგრძე
E <sub>ag</sub>	5	ნჯ	აგრეგაციაზე დანახარჯები
R <sub>max</sub>	30	მ	კავშირის მაქსიმალური მანძილი

LEACH-M ალგორითმისათვის ოპტიმალური პარამეტრი P=5%, 4000 კვანძისათვის კლასტერების საშუალო რაოდენობაა - 200, პარამეტრები k<sub>1</sub> და k<sub>2</sub> ტოლია 0,9 და 0,1, და ეს შესაბამისად უზრუნველყოფს სენსორის მოძრაობის შესაძლებლობას.

რამდენადაც სათავო კვანძის ამორჩევას აქვს შემთხვევითი ხასიათი, მაშინ კლასტერის ზომები LEACH-M ალგორითმის გამოყენებისას, შეიძლება იყოს სხვადასხვა. შემოთავაზებული ალგორითმი აწარმოებს კლასტერს შედარებითი ზომით, სათავო კვანძის არჩევა დამოკიდებულია მანძილზე კლასტერის ცენტრამდე, რაც ამცირებს მანძილს კლასტერის წევრებს შორის და სათავო კვანძამდე და ამით ამცირებს ენერჯო დანახარჯებს მონაცემთა გადაცემაზე. ამ ალგორითმის კიდევ ერთი ღირსება არის შეტყობინების მარტივი მარშრუტიზაცია მეზობელ კვანძებს შორის სს-ს მიმართულებით.

ალგორითმის მუშაობის ძირითად შეფასებით პარამეტრებს წარმოადგენს სენსორული ქსელის სიცოცხლის საერთო დრო, „ცოცხალი“ კვანძების რაოდენობა ყოველ რაუნდში, დაფარვა და ქსელის ყველა კვანძის ნარჩენი ენერგიების ჯამი.

SCA ალგორითმის გამოყენებისას სენსორული ქსელის სიცოცხლის დროის ხანგრძლივობა და კვანძების ენერგიის მარაგის ხარჯის ეფექტურობა იზრდება, ყველა კვანძებს შეუძლიათ იყვნენ დაკავშირებული ყოველ რაუნდში, LEACH-M ალგორითმის გამოყენებისას იშვიათ შემთხვევებში დაფარვა აღწევს 100%. ალგორითმებისათვის დაფარვის შედარების შედეგები მოცემულია ნახ.3.8.-ზე.



ნახ.3.8. LEACH-M და SCA ალგორითმებისათვის დაფარვის შედარება

SCA ალგორითმთან მუშაობისას სათავო კვანძები აირჩევა წინასწარ განსაზღვრული კლასტერის ცენტრთან ახლოს. ეს ამარტივებს ფრენის ტრაექტორიის გათვლას და ინფორმაციის შეგროვებას მფრინავი სენსორული ქსელების გამოყენებისას, რომელშიც ინფორმაციის შეგროვება ხორციელდება მფრინავი აპარატებით.

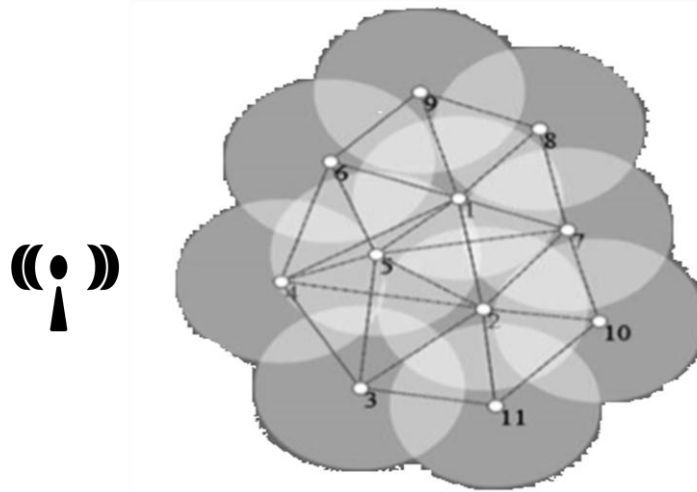
უსადენო მობილური სენსორული ქსელის კლასტერიზაციის ახალი ალგორითმის უპირატესობაა სენსორული ქსელის სიცოცხლის დროის გაზრდა, კლასტერებს შორის მონაცემთა მარშრუტიზაციის სიმარტივე, სათავო კვანძის განთავსების მაღალი ალბათობის წილი კლასტერის ცენტრალურ ზონაში [27].

### 3.5.2. პროგნოზირების კომბინირებული კრიტერიუმი

პროგნოზირების კომბინირებული კრიტერიუმი დაფუძნებულია შემდეგი ფუნქციების შესრულებაზე.

#### 3.5.2.1. დაკავშირების კრიტერიუმი

დაკავშირება წარმოადგენს ნებისმიერი სენსორული კვანძის ურთიერთქმედების შესაძლებლობას ქსელის ნებისმიერ სხვა სენსორულ კვანძთან. ნახ.3.9-ზე მოყვანილია მობილური უსადენო სენსორული ქსელი, რომელიც შედგება საკმაოდ დიდი რაოდენობის სენსორული კვანძების რიცხვისაგან, რომელიც აღნიშნულია როგორც  $S = \{s_1, \dots, s_n\}$ . სენსორული კვანძები განაწილებულია დიდ სენსორულ ველზე და აღნიშნულია სპეციალური მოვლენების დეტექტირებისათვის.



ნახ.3.9. თანხვედრა სენსორულ ქსელში

$S$  სენსორული კვანძის ურთიერთკავშირის სფეროს ვუწოდოთ სფეროს, რომელშიც  $S$  სენსორული კვანძი შეიძლება ურთიერთქმედებდეს პირდაპირ სხვა სენსორულ კვანძთან. სენსორულ კვანძებს შორის მაქსიმალური დაშორებაა  $N_i$  და სხვა ნებისმიერ სენსორულ კვანძთან  $N_j$ , სადაც  $N_j$  ხვდება ურთიერთკავშირის დიაპაზონში.  $N_i$  ვუწოდოთ  $N_j$  სენსორული კვანძის ურთიერთკავშირის ზღვარი.



სენსორულ კვანძთან უმეტესობა ახლომდებარე სენსორები წარმოვიდგინოთ როგორც  $N(S_i)$ . მაშინ  $N(S_i)$  განისაზღვრება შემდეგი ტოლობით:

$$N(S_i) = \{S_j : d(S_i, S_j) < R_i\} \quad (3.10)$$

(3.10)-ში  $d$  პარამეტრი -  $S_i$  და  $S_j$  სენსორულ კვანძებს შორის ევკლიდეს დაშორებაა. მოცემულის გათვალისწინებით  $T$  დროის მომენტში დაკავშირების კრიტერიუმი  $ConC(S_i)$  შეიძლება ჩაწერილი იქნას შემდეგი სახით:

$$ConC(S_i) = |N(S_i)| \quad (3.11)$$

### 3.5.2.2. დაფარვის კრიტერიუმი

კლასტერში სათავო კვანძის ამორჩევის მიდგომების უმეტესობა დაფუძნებულია სენსორული კვანძის ენერგეტიკული ბალანსის შესაძლებლობაზე. მომსახურების ხარისხის მხრივ აუცილებელია განხილული იქნას მთლიანი დაფარვის პრობლემა დროის საკმაოდ დიდი პერიოდის განმავლობაში, განსაკუთრებით მონიტორინგის სისტემებისათვის.  $S$ -სენსორული კვანძის  $r$ -მოქმედების ზღვარი განისაზღვრება, როგორც  $S$ -სენსორებს შორის მაქსიმალური დაშორება და  $S$ -სენსორის მოქმედების  $\rho$ -ნებისმიერი წერტილით სფეროში.  $\rho$ -წერტილი იფარება  $S$ -სენსორით, თუ ევკლიდეს დაშორება  $\rho$ -სა და  $S$ -ს შორის ნაკლებია, ვიდრე  $S$ -სენსორული კვანძის მოქმედების ზღვარი  $r$ .

$Seg_{ij}$  სეგმენტი არის  $S_i$  სენსორული კვანძის დაფარვის პერიმეტრის სექცია, რომელიც თავის მხრივ იფარება სენსორული კვანძით  $S_j$ .  $Seg_{ij}$  სეგმენტი წარმოადგება როგორც დახურული ინტერვალი  $[\theta_{ij}^s, \theta_{ij}^e]$ , სადაც  $\theta^s$  და  $\theta^e$  წარმოადგენენ შესაბამისად  $Seg_{ij}$  სეგმენტის დასაწყის და დასასრულ კუთხეებს, საწყისი და დამაბოლოებელი წერტილისათვის.

განვიხილოთ ორი სენსორული კვანძი  $S_i$  და  $S_j$  და მათ შორის მანძილი  $d$ . მაშინ  $Seg_{ij}$  სეგმენტის სიგრძე  $L_{ij}$  :

$$L_{ij} = \arccos \left\{ \frac{r_i^2 + d^2 - r_j^2}{2d + r_i} \right\} \quad (3.12)$$

დასაწყისი და დასასრული კუთხე შეიძლება განისაზღვროს როგორც  $\theta_{ij}^s = \frac{\theta_{ij} - L_{ij}}{2}$  და  $\theta_{ij}^e = \frac{\theta_{ij} - L_{ij}}{2}$ , სადაც  $\theta_{ij}$  არის  $S_i$  სენსორული კვანძის კუთხური კოორდინატია  $S_i$  განსაზღვრული მიმართულებისას წარმოსახვითი პოლარული ღერძის ხაზის მიმართ.

დაფარვის კრიტერიუმი  $CovC(S_i)$   $t$  დროის მომენტში შეიძლება ჩაიწეროს შემდეგი სახით:

$$CovC(S_i) = \frac{Cov(S_i)}{2\pi} \quad (3.13)$$

თუ  $CovC(S_i)$  არის  $S_i$  სენსორული კვანძის პერიმეტრული დაფარვა მაშინ სამართლიანია შემდეგი ტოლობა :

$$Cov(S_i) = \sum_{\forall Seg_{ij} \in S_i} |Seg_{ij}| - \sum_{\forall Seg_{ij}, Seg_{ik} \in S_i; j \neq k} |Seg_{ij} \cap Seg_{ik}| \quad (3.14)$$

### 3.5.2.3. მობილურობის კრიტერიუმი

მობილურობა წარმოადგენს მნიშვნელოვან ფაქტორს სათავო კვანძის ამორჩევის გადაწყვეტილების მიღებისას. სათავო კვანძის ფუნქციის ხშირი ცვლილების ჩათვლით მიზანშეწონილია სათავო კვანძად არჩეული იქნას კვანძი, რომელიც გადაადგილდება არც თუ სწრაფად. როცა სათავო კვანძი გადაადგილდება სწრაფად, სენსორული კვანძი შეიძლება ამოვარდეს კლასტერიდან და შედეგად დგება რეაფილაცია. რეაფილაციას ადგილი აქვს მაშინ, როცა ერთი ან რამდენიმე სენსორული კვანძი გადადის ერთი კლასტერიდან მეორე კლასტერში, კლასტერის სტაბილური ინტერვალის არსებობის განმავლობაში. ყოველი  $S_i$  სენსორული კვანძისათვის მობილურობის სიჩქარის გამოთვლა ხდება ფორმულით:

$$MC(S_i) = \frac{\sqrt{(X_t - X_{t-1})^2 + (Y_t - Y_{t-1})^2}}{\Delta t} \quad (3.15)$$

$(X_t - Y_t)$  და  $(X_{t-1} - Y_{t-1})$  –  $S_i$  სენსორული კვანძის კოორდინატებია  $t$  და  $t-1$  დროის მომენტში, ხოლო  $\Delta t$  – დროის ინტერვალი  $t$  და  $t-1$  -ს შორის.

### 3.5.2.4. დარჩენილი ენერჯის კრიტერიუმი

კლასტერის სათავო კვანძი პასუხისმგებელია კლასტერის წევრების ურთიერთქმედების კოორდინაციაზე, მონაცემთა აგრეგაციაზე და მათ გადაცემაზე პირდაპირ საბაზო სადგურისათვის. რამდენადაც კლასტერის სათავო კვანძი საჭიროებს პაკეტების დიდი რაოდენობის მიღებას, ის ხარჯავს დიდ ენერჯიას ვიდრე სხვა კვანძები. DCA (Distributed Clustering Algorithm) ალგორითმში კლასტერის სათავო კვანძები პერიოდულად გადიან როტაციას, რაც ახანგრძლივებს სენსორული ქსელის სიცოცხლის ციკლს. დარჩენილი ენერჯის კრიტერიუმი  $REC(S_i)$  განისაზღვრება ყოველი კვანძისათვის შემდგომი ფორმულით:

$$REC(S_i) = E(S_i) \quad (3.16)$$

(2.11), (2.13), (2.15), (2.16) გამოსახულებების გათვალისწინებით კომბინირებული კრიტერიუმი  $CC(S_i)$   $S_i$  სენსორული კვანძის  $t$  დროის მომენტში განისაზღვრება შემდეგი ფორმულით:

$$CC(S_i) = \alpha \cdot ConC(S_i) + \beta CovC(S_i) + \frac{\gamma}{1+MC(S_i)} + \xi \cdot REC(S_i) \quad (3.17)$$

### 3.6. დაფარვა და სიმკვრივე უსადენო სენსორულ ქსელებში

უსკ-ს დაგეგმარებისას არსებობს ურთიერთ დაკავშირებული მაჩვენებლების სიმრავლე, რაც წარმოადგენს გადამწყვეტს ქსელის საბოლოო ფუნქციონირებისათვის. პირველ რიგში მას მიეკუთვნება: სივრცეში სენსორული კვანძების განლაგების სტრატეგია (დეტერმინირებული ან შემთხვევითი) სენსორული კვანძების განთავსების სიმკვრივე, დაფარვის ზონა, კავშირის ხარისხი, დამოკიდებულება დაფარვის რადიუსსა და კავშირის სიშორეს შორის. დაფარვის ზონის გაზრდა წარმოადგენს ფუნდამენტალურ მოთხოვნას უმეტესობა სენსორული ქსელების დანართებისათვის მაგ. მონიტორინგი, მართვა, თვალყურის დევნება.

სენსორული კვანძები შეიძლება სივრცეში განთავსებული იქნას ორგვარად: დეტერმინირებულად და შემთხვევით. უსკ-ს დეტერმინირებული მეთოდით

განთავსდება მხოლოდ სივრცის განსაზღვრულ წერტილებში, გამოთვლილი მომხმარებლის მიერ. ეს მეთოდი იძლევა სივრცის სრული დაფარვის გარანტიას განსაზღვრული დროის განმავლობაში, სენსორული კვანძების სიმკვრივეზე დამოკიდებულებით, მათი კლასტერიზაციის მეთოდზე და სხვა. ზოგიერთ უსქ-ში კვანძების დეტერმინირებული განთავსება არამიზნობრივია ან შეუძლებელია და შემთხვევითი განთავსება შეიძლება იყოს ერთადერთი შესაძლო სტრატეგია, მაგ. კვანძების მაღალი სიმკვრივის დროს ან არარსებულ ან საშიშ გარემოცვაში მათი განთავსების დროს.

სენსორული კვანძების შემთხვევითი განთავსებისას ისინი განთავსდებიან შემთხვევით მფრინავი აპარატების გამოყენებით, სხვა მობილური საშუალებებით. ამასთან აუცილებელია ერთის მხრივ მოხდეს დაფარვის მაქსიმიზაცია რაც შეიძლება დიდი დროის განმავლობაში და მინიმიზირდეს ენერგომომხმარება აქტიური კვანძების რიცხვის შემცირებით, რომლებიც ასრულებენ ერთიდაიგივე ფუნქციებს თავისი მოქმედების რადიუსის საზღვრებში. უკანასკნელი შესაძლებელია რეალიზებული იქნას მაშინ თუ ცნობილია სენსორული კვანძების განთავსების აუცილებელი სიმკვრივე.

რაიმე ობიექტზე (სამიზნეზე) თვალყურის დევნების დანართებში კვანძების მინიმალური რიცხვი, რომელიც მოთხოვნილია გარემოს სრული დაფარვისათვის, განისაზღვრება, როგორც სენსორული კვანძების სიმკვრივის კრიტიკული მნიშვნელობა, რომელიც საშუალებას იძლევა აღმოჩენილი იქნას ნებისმიერი ობიექტი, რომელიც კვეთს უსქ-ს სიბრტყეს. ამიტომ ნებისმიერი ობიექტის ეფექტურად აღმოჩენისათვის, რომელიც კვეთს უსკ სიმკვრივის სივრცეს კვანძების განლაგების სიმკვრივე უნდა იყოს კრიტიკულ მნიშვნელობაზე მაღალი (განსაზღვრული სიმკვრივის ზღვარი).

ვივარაუდოთ რომ  $n$  სენსორული კვანძები განაწილებულია შემთხვევითი გზით. სენსორული კვანძების სიმკვრივე და დაფარვის ზონა წარმოადგენს წრეს რადიუსით, რომლის ფართობია:

$$S = \pi R_s^2 \quad (3.18)$$

მაშინ სენსორული კვანძების სიმკვრივე  $\rho = n/s$ . დაფარვის წილი  $C$ , რომელიც განისაზღვრება, როგორც დაფარვის ზონის დამოკიდებულება ან  $V$  საერთო ფართობის მოცულობა, ან სენსორული კვანძების განლაგების შემდეგ მოცულობა დროის მომენტში  $t > 0$ , გამოითვლება ფორმულით:

$$C = 1 - e^{-\rho S} \quad (3.19)$$

(3.19) გამოსახულება შეიძლება გამოყენებული იქნას უსქ-ს დაგეგმარებისას უსკ-ს მოთხოვნილი რაოდენობის განსაზღვრისათვის.

დაფარვის  $C$  სასურველი სამიზნე ზონის მიღწევისათვის ( $0.9 \leq C \leq 1$ ),  $\rho S$  იცვლება დიაპაზონში  $4.6 \div 2.3$ .

საერთო ჯამში მოთხოვნილი უსქ-ს სიმკვრივე:

$$\rho = \frac{-\log(1-C)}{\pi r^2} \Leftrightarrow R_s = \sqrt{\frac{-\log(1-C)}{\pi \rho}} = \sqrt{\frac{-\log(1-C)S}{\pi n}} \quad (3.20)$$

სენსორული კვანძები  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$  შემთხვევითი გზით განაწილებულია სამგანზომილებიან სფეროში  $V$ , ყოველ სენსორულ კვანძს  $S_i$ ,  $i=1 \dots n$  გააჩნია კოორდინატები  $x_i$ ,  $y_i$ ,  $z_i$ , მოცულობაში  $V$  და დაფარვის რადიუსი  $R_s$ . ამგვარად, დაფარვის ზონა  $S_i$ -თვის შეიძლება წარმოდგენილი იქნას სფეროს სცენარით ( $x_i, y_i, z_i$ )-ში და რადიუსით  $R_s$ :

$$V_s = \frac{4}{3} \pi R_s^3 \quad (3.21)$$

უსკ-ს რიცხვი, რომელიც განთავსებულია  $V$  მოცულობაში შეადგენს:

$$n = v\rho \quad (3.22)$$

$\rho \cong \frac{n}{V_s}$  და  $V_s = \frac{4}{3} \pi R_s^3$  -ის დაფარვის წილი  $C$  განისაზღვრება (3.19) ანალოგიურად:

$$C = 1 - e^{-\rho V_s} \quad (3.23)$$

ამ შემთხვევაში სასურველი დაფარვის სამიზნე ზონის მიღწევისათვის  $C$  ( $0.9 \leq C \leq 1$ ) კვანძების სიმკვრივე შეიძლება განსაზღვრული იქნას ზემოთ მოყვანილი შემთხვევის ანალოგიურად. საერთო ჯამში უსქ-ის აუცილებელია სიმკვრივე:

$$\rho = \frac{-\log \frac{1-c}{4}}{\frac{4}{3}\pi R_s^3} \Leftrightarrow R_s = \left[ \frac{-\log \frac{1-c}{4}}{\frac{4}{3}\pi \rho} \right]^{1/3} = \left[ \frac{-\log \frac{1-c}{4} V_s}{\frac{4}{3}\pi n} \right]^{1/3} \quad (3.24)$$

$C$ -დაფარვის წილია,  $\rho$ -სიმკვრივე,  $R_s$ -სენსორული კვანძების დაფარვის რადიუსი.

უსქ-ის უწყვეტი ფუნქციონირების უზრუნველყოფისათვის ძალიან მნიშვნელოვან ფაქტორს წარმოადგენს დამოკიდებულება დაფარვის რადიუსსა და კავშირის რადიუს შორის  $R_c/R_s$ . ცხრ.3.3. მოყვანილია ქსელის მწარმოებლურობის დამოკიდებულება  $R_c/R_s$ -ზე.

ცხრ.3.3.  $R_c/R_s$  დამოკიდებულების გავლენა ქსელის მწარმოებლურობაზე

დამოკიდებულება $R_c/R_s$	რაუნდში პირველი კვანძის დაღუპა	40% კვანძები ილუპება $n$ რაუნდისას	მიღებული პაკეტების რიცხვი
$R_c \geq 2R_s$	140	1200	1525
$R_c = R_s$	70	460	790
$R_c < R_s$	67	370	770

როგორც ცხრილიდან ჩანს კვანძების 40% მეორე და მესამე შემთხვევაში ილუპებიან მცირე დროის განმავლობაში, ვიდრე პირველში. თუმცა ქსელი აგრძელებს მუშაობას, რამდენადაც კვანძებს შორის არის დაფარვა და კავშირი. ეს ნიშნავს რომ უსქ აქვს აუცილებელი ენერგია [28].

**დასკვნა.** 1. განხილულია სენსორული ქსელების და სენსორების არქიტექტურა.

2. აღწერილია სენსორის შემადგენელი ქვესისტემა, რომელიც შედგება: მონიტორინგის, აღქმის, მონაცემთა დამუშავების, საკომუტაციო ქვესისტემისაგან და კვების წყაროსაგან.

3. მოცემულია კლასტერიზაციის ალგორითმები, რომლებმაც გარანტია უნდა მოგვცეს, რომ უსადენო სენსორული ქსელით მონაცემები გადაცემული იქნება მოთხოვნილ დროში, საჭირო სიზუსტით და მინიმალური ენერგო დანახარჯებით.

4.კლასიფიცირებულია მარშრუტიზაციის ალგორითმები: ქსელური სტრუქტურის (SPAN, LEACH), რესურსების ცოდნის (HEED, Directed Diffusion) და პროტოკოლებით მართვის (SPAN, GFG, SAR, COUGAR) მიხედვით.

5.განსაზღვრულია სენსორული ქსელის აგებასთან დაკავშირებული აუცილებელი კრიტერიუმები: დაკავშირების კრიტერიუმი, დაფარვის კრიტერიუმი, მობილურობის კრიტერიუმი, დარჩენილი ენერჯის კრიტერიუმი, უსქ-ს სიმკვრივე, დაფარვის წილი.

## თავი IV. უსადენო სენსორული ქსელის სიცოცხლის დრო

### 4.1. ტერმინი „ქსელის სიცოცხლე“

სენსორული ქსელის კონცეფცია ვარაუდობს, რომ ნებისმიერი კვანძი მუშაობს კვების ავტონომიური კვანძიდან. თუ ასეთ წყაროს წარმოადგენს ჩვეულებრივი ბატარეა (AA,AAA ტიპის და მსგავსი), რომლის მუშაობის პროცესში მას არ ემატება ენერჯია, მაშინ დროის რაღაც პერიოდის შემდეგ ის განიმუხტება და ავტონომიური მოწყობილობა წყვეტს მუშაობას. ნებისმიერი კვანძი, რომელიც ასრულებს ამოცანათა ნაკრებს, რაც მასზეა დაკისრებული, მწყობრიდან გამოსვლით იწვევს: კვანძის მიერ ამოცანათა ნაკრების შეუსრულებლობას, რამაც შეიძლება დაადაბლოს ქსელის მომსახურების ხარისხი (დროებით ან საბოლოოდ). მომსახურების ხარისხის დროებითი გაუარესება ვარაუდობს, რომ რაღაც დროის შემდეგ მწყობრიდან გამოსული კვანძის ამოცანები შესასრულებლად გადაცემული იქნება ქსელის სხვა მოწყობილობებში. საბოლოო მომსახურების ხარისხის დაცემისას ქსელი წყვეტს ერთი ან რამდენიმე ფუნქციის შესრულებას.

თუ კვანძი წარმოადგენს სისტემის საკვანძო რგოლს, მაგ. ასრულებს დიდი რაოდენობის ნაკადების მარშრუტიზაციას, მაშინ მისი უარი და დინამიური შეცვლის შეუძლებლობა ნიშნავს მთელი ქსელის მწყობრიდან გამოსვლას.

უსქ-ის ყველა ელემენტი წარმოადგენს ავტონომიურს, 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). პრობლემა მდგომარეობს იმაში რომ ყოველ ცალკეულ შემთხვევაში ქსელის მწყობრიდან გამოსვლის მომენტი შეიძლება განისაზღვროს სხვადასხვანაირად, მომსახურების ხარისხისადმი მოთხოვნაზე დამოკიდებულებით. სენსორულ ქსელს გააჩნია ორი განსაკუთრებული ფუნქცია - თვითორგანიზება და თვითაღდგენა. თვითორგანიზება წარმოადგენს პროცესების ფუნქციონირების დამოუკიდებლად წარმოების შესაძლებლობას, უსადენო ქსელის მუშაობის პარამეტრების დინამიური რეგულირებით



და გარე ფაქტორებზე დამოკიდებულებით. თვითორგანიზების მიზანს წარმოადგენს ავტონომიური ქსელის ისეთი მოწყობა, რომელიც გაშლის შემდეგ ფუნქციონირებს ოპერატორის ჩარევის გარეშე.

თვითაღდგენა მჭიდროდაა დაკავშირებული თვითორგანიზებასთან და ვარაუდობს, რომ ქსელის ცალკეული კვანძის მწყობრიდან გამოსვლის შემთხვევაში ქსელი დროის განსაზღვრულ ინტერვალში გადაეწყობა და ისევ აგრძელებს მასზე დაკისრებული ფუნქციების შესრულებას.

უსქ-ის ავტონომიურ ბაზაზე ამოცანების პრაქტიკული გადაწყვეტისათვის წარმოიშობა ორი ძირითადი ამოცანა, რომელიც დაკავშირებულია სიცოცხლის დროის მაჩვენებელთან:

1. ქსელის სიცოცხლის დროის სავარაუდო მახასიათებლების შეფასება და მისი მუშაობა გარკვეული ალგორითმებით.
2. სიცოცხლის დროის გაზრდა მთელი რიგი მეთოდების და ალგორითმების გამოყენებით.

შესაძლებელია განვსაზღვროთ უსქ-ს ენერგოეფექტურობის კოეფიციენტი:

$$\Xi = \frac{W_b}{W_b + W_{აშდ}} \quad (4.1)$$

$W_b$  - გამოყენებული სასარგებლო ენერგია;

$W_{აშდ}$  - არამწარმოებლური დანახარჯები.

## 4.2. უსქ-ს სიცოცხლის დროის გაზრდის მეთოდები

უსქ-ის ავტონომიურად მუშაობის დროის გაზრდისათვის შესაძლებელია მოწყობილობების აპარატურული მახასიათებლების გაუმჯობესება: ცალკეული კომპონენტების ენერგომოხმარების შემცირება, მათი კრისტალზე განთავსების ოპტიმიზაცია ან მკვებავი ელემენტის ტევადობის გაზრდა. მოცემული

შესაძლებლობების კვლევა მიეკუთვნება შერეულ სფეროებს (ელექტრონიკა, რადიოფიზიკა, ქიმია, სქემოტექნიკა და სხვა).

უნდა აღინიშნოს რომ ქსელის აგებისას სხვადასხვა საშუალებების გამოყენებას გააჩნია ფიზიკური (რადიოარხით მონაცემთა გადაცემა მოცემულ მანძილზე დამოკიდებულია როგორც მიკროპროცესორებით მონაცემთა დამუშავებაზე, ასევე მოითხოვს განსაზღვრულ ენერგეტიკულ დანახარჯებს) და ღირებულებითი შეზღუდვები (უფრო ენერგოეფექტური კომპონენტების გამოყენება იწვევს სისტემის გაძვირებას). დიდი ტევადობის მკვებავი ელემენტების გამოყენება ზრდის მოწყობილობის ზომას, სენსორული ქსელის კონცეფცია კი ვარაუდობს მათ მინიატურობას.

მონაცემთა დამუშავების პროგრამული ალგორითმების თვალსაზრისით სისტემის კვანძებში შესაძლებელია განხორციელდეს შემდეგი ვარიანტები:

- მონაცემთა შემჭიდროვება. მოცემულ მეთოდს გააჩნია თავისი საზღვრები, სენსორულ ქსელში თვით მონაცემები როგორც წესი, არ არის დიდი მოცულობის, ამიტომ მისი შემჭიდროვება არ იძლევა დიდ ეფექტს.
- მონაცემთა შეგროვება და მისი შემდგომი გადაცემა დიდი ბლოკებით. მეთოდი დაფუძნებულია იმაზე რომ თანამედროვე უსადენო სტანდარტებში ნებისმიერი ციფრული პაკეტის გადაცემა დაკავშირებულია დამატებით დანახარჯებთან, ამიტომ სასარგებლოა გადაიცეს მონაცემები დიდი ბლოკებით ერთ პაკეტში.

შესაძლებელია სრულიად ავტონომიური სენსორული ქსელის კვანძების შექმნა მისი პატარა ზომების შენარჩუნებით. შესაძლებელია კვანძის კვება მინიატურული მზის ელემენტების გამოყენებით. თუმცა დღეისათვის ენერჯის შეკრებისა და გარდაქმნის ვერც ერთმა ალტერნატიული გადაწყვეტამ ჯერ კიდევ ვერ ნახა მასიური გამოყენება მონაცემთა შეგროვების რეალურ ქსელებში, რომელიც შედგება ასეულობით კვანძისაგან.

### 4.3. ენერგეტიკული ბალანსირების მეთოდები

სენსორული ქსელი იქმნება მონაცემთა შეგროვებისათვის, რაც ნიშნავს რომ არსებობს ერთი ან რამდენიმე გამოყოფილი კვანძი რომელშიც შეედინება მთელი ქსელის ინფორმაცია. მოცემულ კვანძებს გააჩნიათ მუდმივი კვების წყარო, შეუღლებული ინტერფეისი ლოკალურ გლობალურ ქსელებთან და უფრო მძლავრ გამომთვლელ მანქანებთან. ამგვარად სენსორულ ქსელში არსებობს სასარგებლო ტრაფიკის მოძრაობის უპირატესობითი მიმართულებები, მარშრუტიზაცია კვანძებით, რომელშიც გაედინება ტრაფიკის მეტი მოცულობა.

თანამედროვე ტექნოლოგიურმა მიღწევებმა საშუალება მოგვცეს შეიქმნას მიკროპროცესორები ძალიან დაბალი მოხმარების სიმძლავრით, რომლებიც ასრულებენ ამოცანათა ფართო სპექტრს. თუმცა უსადენო კავშირის არხით მონაცემთა გადაცემისას აუცილებელია დიდი მოცულობის ენერჯის დახარჯვა. რაც მეტი მონაცემები გადის უსადენო ქსელის კვანძში მით მეტია მოხმარებული სიმძლავრე. ქსელში წარმოიშვება ენერგომოხმარების დისბალანსი, რაც მიდის იქამდე რომ ავტონომიური კვანძი, რომელიც განთავსებულია მონაცემთა შეგროვების ცენტრალური კვანძის გვერდით, სხვაზე ადრე გამოდის მწყობრიდან, საკუთარი კვების წყაროს განმუხტვის გამო და მცირდება სენსორული ქსელის ავტონომიური მუშაობის დრო.

ქსელის ყველა კვანძის მოხმარებული სიმძლავრის გათანაბრებისათვის გამოიყენება ენერგეტიკული ბალანსირების სხვადასხვა მეთოდები (energy balancing), კერძოდ:

- ელემენტის ტევადობის ინდივიდუალური შერჩევა ქსელის სტრუქტურაში მოწყობილობის განთავსების გათვალისწინებით და მის მიერ შესრულებულ ფუნქციებზე დამოკიდებულებით. ამ შემთხვევაში რეტრანსლაციის მოწყობილობები შეიძლება აღიჭურვოს დიდი ტევადობის კვების წყაროებით. ეს მიდგომა მიდის ქსელის დაბალ მასშტაბურობასა და მისი ფუნქციონირების გაუარესებასთან. სხვადასხვა ელემენტების სხვადასხვა კონსტრუქციული

გადაწყვეტილების შემუშავების აუცილებლობა საბოლოოდ მიდის სისტემის ღირებულების ზრდასთან.

- კონკრეტულ ზონაში ქსელის კვანძების განთავსება სხვადასხვა სიმკვრივით, სავარაუდო ტრაფიკის ინტენსივობაზე დამოკიდებულებით. მოცემული გადაწყვეტა მიმართულია ქსელის სტრუქტურაში სიჭარბის შეტანაზე და ცალკეული კვანძების ფუნქციების დუბლირებაზე. რიგითი მარშრუტიზატორის მწყობრიდან გამოსვლის შემთხვევაში მისი ფუნქციები გადაცემული იქნება მეზობელ ელემენტზე, რომელიც ამ მომენტამდე არ ყოფილა გამოყენებული.

პროგრამულ მეთოდებს მიეკუთვნება მარშრუტიზაციის პროტოკოლების გამოყენება, რომელიც ეფუძნება კვანძების ნარჩენ ენერგიას ან ვირტუალურ კოორდინატს, ახლო და შორეული გადაცემის მონაცვლეობას, კვანძების პოზიციონირებას, ასევე კლასტერიზაციას.

ტრადიციული ქსელების მარშრუტიზაციის პროტოკოლებში გამოიყენება საზომი, რომელიც მიმართულია ქსელის გამტარუნარიანობის გაზრდისაკენ ან გადასაცემი მონაცემების დაყოვნებების შემცირებისაკენ. მსგავს საზომად შეიძლება იყოს ადრესატამდე შუალედური კვანძების რაოდენობა, კავშირის არხის გამტარუნარიანობა, ხაზის დატვირთვის დონე. სენსორულ ქსელებში ხშირად გამოიყენება კვანძების ნარჩენი ენერგიის საზომი. ამ შემთხვევაში ალტერნატიული მარშრუტის უმრავლესობიდან აირჩევა ის, რომელზედაც კვანძებს აქვთ დიდი ნარჩენი ენერგია.

ბალანსირების პერსპექტიულ მეთოდათ ითვლება ქსელის ცალკეული კომპონენტების მობილურობის გამოყენება. მობილურობამ პოტენციურად შეიძლება უზრუნველყოს ქსელის ავტონომიური მუშაობის ხანგრძლივობის გაზრდა. მობილურობა ქსელისათვის ითვლება პარაზიტულ ფაქტორად, რომელიც მოითხოვს დამატებით რესურსებს, რომ შეინარჩუნოს მოცემული მომსახურების ხარისხი.

მობილურობის მართვა (Mobility Management) მოიცავს ალგორითმებისა და პროტოკოლების ნაკრებს, რაც აუცილებელია იმისათვის რომ მობილურმა

მოწყობილობებმა შეძლონ ეფექტურად გაცვალონ მონაცემები უსადენო არხით იმ სიტუაციაში, როცა მათი ადგილმდებარეობა იცვლება დროის განმავლობაში.

არსებობს მობილურობის მართვის ამოცანების შემდეგი კლასიფიკაცია:

- მობილური მოწყობილობების ადგილმდებარეობის კონტროლი შემდეგი ძირითადი პარამეტრებით:
  - მობილური მოწყობილობების სივრცეში ადგილმდებარეობის განსაზღვრის საშუალება;
  - მობილური მოწყობილობების ადრესაციის მეთოდი;
  - მონაცემთა ბაზის ფორმატი და ინფორმაცია განთავსებულ მობილური ელემენტის გეოგრაფიულ მდებარეობაზე;
  - ადგილმდებარეობაზე ინფორმაციის განახლების ალგორითმი.
- გადართვის მართვა - მობილური ელემენტის ქსელთან მიერთების წერტილის ცვლილება, რომელიც მოიცავს შემდეგ ამოცანებს:
  - გადართვის პროცედურის გაშვების პირობის განსაზღვრა (სიგნალის ძალის შესუსტება, კავშირის ხაზის გადატვირთვა, უკეთესი შეერთების არსებობა, ქსელის ტოპოლოგიის ცვლილება და სხვა);
  - ახალი შეერთების დამყარება;
  - პაკეტების მარშრუტიზაციის ორგანიზება ახალი შეღწევის წერტილებით.

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

წარმოვადგინოთ რეკონფიგურირებადი N ქსელი შემდეგი სამეულით (4.2):

$$N = (G_s, \Gamma_n, \Pi) \quad (4.2)$$

$G_s = (V_s, E_s)$  - 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:

$$|V_s| = \binom{m}{s} = \frac{m!}{s!(m-s)!} \quad (4.3)$$

$S$ -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:

$$|V_s| = 2^n \quad (4.4)$$

ავღნიშნოთ, 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 ენერგიით  $E_i$  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 მდებარეობის დრო.

მოდელი გამოიყენება მხოლოდ ისეთი ქსელებისათვის, რომლის კვანძები ხასიათდებიან უცვლელი მოხმარებული სიმძლავრით ყოველ შესაძლო კონფიგურაციაში. მოხმარებული სიმძლავრე  $p_k^i$  პირდაპირაა დამოკიდებულია კვანძის მიერ გენერირებულ და რეტრანსლირებულ ტრაფიკზე [29].

#### 4.4. უსქ-ის სიცოცხლის დროის და მოხმარებული სიმძლავრის გამოთვლა

ქსელის ცალკეული ელემენტების ენერგომოხმარება დამოკიდებულია შემდეგ ფაქტორებზე:

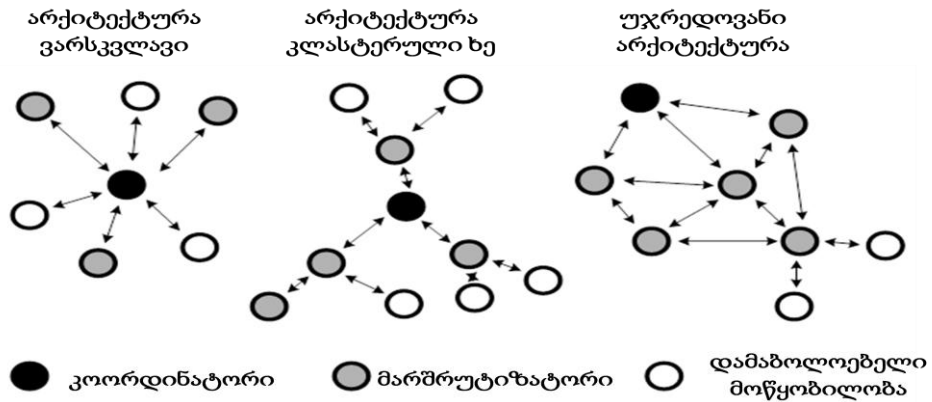
- აპარატურული საშუალებების მახასიათებლები (ელემენტის ტევადობა, მიკროკონტროლერის, მიმღებ-გადამცემის, გადამწოდის და სხვა ელექტრონული კომპონენტების მოხმარებული სიმძლავრე);

- მონაცემთა შეგროვებისა და გადაცემის სიხშირე დამოკიდებული დანართებზე. მაგ. კლიმატ-კონტროლის, ეკოლოგიური მონიტორინგის სისტემებში საკმარისია შეგროვდეს ინფორმაცია რამდენიმე წამში ერთხელ, ან ათეულ წამში. დიდი დროის განმავლობაში სენსორს შეუძლია იყოს ძილის რეჟიმში. ბგერის გადაცემა მოითხოვს მონაცემთა შეგროვების მაღალ სიხშირეს (8 კჰც, 16 კჰც, 32 კჰც და მეტი), რაც ფაქტიურად გამოიწვევს ქსელის ელემენტი იმყოფებოდეს დადაბლებული ენერგომომხმარების რეჟიმში.
- ფიზიკური და საარხო დონის პროტოკოლები, რომელიც განსაზღვრავს გარე შეღწევის მაკონტროლებელ მექანიზმებს. ასინქრონულ რეჟიმში მაგ., CSMA/CA რეტრანსლიატორებს არ შეუძლიათ იმყოფებოდნენ ძილის რეჟიმში, წინააღმდეგ შემთხვევაში დამაბოლოებელი მოწყობილობები ვერ შეძლებენ გადასცენ თავისი მონაცემები. გარემოში შეღწევის ასინქრონული რეჟიმი ხასიათდება იმით, რომ ყველა ელემენტს შეუძლია გადავიდეს დადაბლებული ენერგომომხმარების რეჟიმში, მთელი ქსელის ფუნქციონირება კოორდინირდება სპეციალური ასინქროფრეიმებით (ქსელის ყველა ელემენტმა იცის თავისი შემდგომი კადრის გადაცემის დრო). თუმცა ასეთი რეჟიმის რეალიზება რთულია განაწილებულ ქსელებში, რომელშიც გამოიყენება ათეულობით ან ასეულობით მარშრუტიზატორი.

შემუშავებულია ალგორითმები და პროტოკოლები ქსელის მოწყობილობების მიერ მოხმარებული სიმპლავრის შემცირებისათვის: Berkeley MAC (B-MAC), Sensor MAC (S-MAC), D-MAC შეტყობინების სწრაფი მიტანის ადაპტური ალგორითმი.

- ქსელის ტოპოლოგია. სენსორულ ქსელებში გამოიყენება, როგორც უბრალო (ვარსკვლავი, რგოლი, ხე) ასევე უფრო რთული უჯრედოვანი ტოპოლოგიები (ნახ.4.1).





ნახ.4.1. უსქ ქსელის ტოპოლოგიები

დამაბოლოებელი მოწყობილობის და რეტრანსლიატორის სიცოცხლის დროის გათვლა ეფუძნება შემდგომ დაშვებებს:

- მოწყობილობის მუშაობის ალგორითმი წარმოადგენს მკაცრად დეტერმინირებულს გარე ფაქტორებისადმი, რომელიც წარმოადგენს შემთხვევით სიდიდეს ცნობილი მათემატიკური მოლოდინით.
- ელემენტის აღდგენის ეფექტი არ არსებობს. აუცილებლობისას შეიძლება გათვალისწინებული იქნას საწყისი ენერჯის გაზრდა.
- ელემენტის საწყისი ენერჯია  $E_0$  და სიმძლავრე  $P$ , რომელსაც მოიხმარს მოწყობილობა. ამ პარამეტრებით დაახლოებით შეიძლება შეფასდეს კვანძის სიცოცხლის დრო:

$$t = \frac{E_0}{P} \quad (4.5)$$

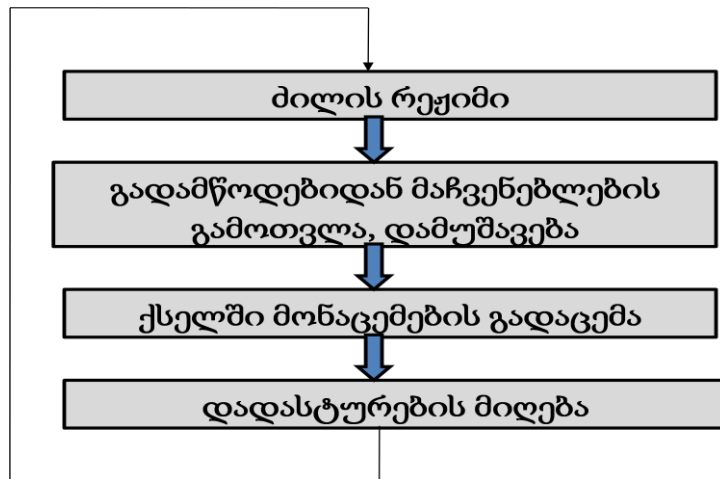
#### 4.5. დამაბოლოებელი მოწყობილობის სიცოცხლის დრო

დამაბოლოებელი მოწყობილობა დანიშნულია საკუთარი გადამწოდებიდან მაჩვენებლების ასათვლელად და ქსელში მათ გადასაცემად. რეტრანსლიატორისაგან იმით განსხვავდება, რომ მონაცემებს გადაცემს თავის გავლით, ორმხრივად.

დამაბოლოებელი მოწყობილობა მუშაობს ნახ.4.2 გამოსახული სქემით. დამაბოლოებელი მოწყობილობის მიერ მოხმარებული სიმძლავრე:

$$P_{ed} = \frac{P_f t_f + P_a t_a + P_s (t_c - t_f - t_a)}{t_c} \quad (4.6)$$

$t_c$  - 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).



ნახ.4.2. დამაბოლოებელი მოწყობილობის მუშაობის ციკლი

ითვლება რომ  $t_a + t_f < t_c$  ე.ი. დამაბოლოებელ მოწყობილობას აქვს საკმარისი დრო გადავიდეს ძილის რეჟიმში.

(4.6) გამოსახულებაში  $P_a$  და  $P_s$  სიდიდეები მუდმივებია და განისაზღვრება მოწყობილობის კონკრეტული აპარატურული რეალიზაციის განსაკუთრებულობით.  $t_a$  დრო დამოკიდებულია გამოყენებული პროცესორის და გადამწოდის მახასიათებლებზე, ასევე მონაცემთა დამუშავების ალგორითმის პროგრამულ რეალიზებასა და სირთულეზე.

$t_f$  დრო, ასევე სიმძლავრე  $P_f$  დამოკიდებულია გამოყენებულ უსადენო გადაცემის სტანდარტზე, გადასაცემი მონაცემების ზომაზე, შეცდომების ალბათობაზე გადაცემისას.

თუ ჩავთვლით რომ  $(n+1)$ -ზე შეცდომების ალბათობა  $P_e$  არ არის დამოკიდებული წინა  $n$  გადაცემების რაოდენობაზე, მაშინ იმის ალბათობა, რომ გადაცემა მოხდება ერთჯერ ტოლი იქნება  $(1 - P_e)$ , ორჯერ -  $P_e(1 - P_e)$ ,  $n$ -ჯერ -  $P_e^{n-1}(1 - P_e)$ . იმის გათვალისწინებით რომ გადაცემის მაქსიმალური რაოდენობა ყოველთვის შეზღუდულია პროგრამულად რაღაც  $N$  მნიშვნელობით, მივიღებთ გამოსახულებას საშუალო დროისათვის, რომელიც იხარჯება კადრის გადაცემაზე განმეორებითი გადაცემის პირობებში:

$$t_{real} = t_f \left[ (1 - P_e) \sum_{i=1}^{N-1} i P_e^{i-1} + N \cdot P_e^{N-1} \right] \quad (4.7)$$

აქ  $t_f$  - მონაცემთა გადაცემის დროა დადასტურების განმეორებითი გადაცემის გათვალისწინების გარეშე.

$N$ -გადაცემის მაქსიმალური რაოდენობაა,  $N=1,2,3,\dots$

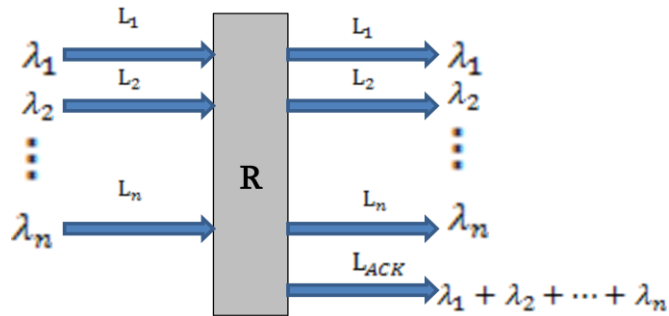
$P_e$  - პარამეტრი დამოკიდებულია ქსელის გარე ფაქტორებთან ურთიერთქმედებასთან (დამოკიდებულება სიგნალი/ხმაური და სხვა). ასევე ქსელის აგების შიდა განსაკუთრებულობაზე. მაგ.: გადაცემის გარემოსთან შემთხვევითი შეღწევის შემთხვევაში შეცდომების წარმოშობის ალბათობა დამოკიდებული იქნება კვანძების რაოდენობაზე, რომელიც მდებარეობს მიმღებ-გადამცემის დაფარვის ზონაში, მონაცემთა ნაკადების ინტენსიურობაზე.

#### 4.6. მარშრუტიზატორის სიცოცხლის დრო

სენსორულ ქსელში ასინქრონული შეღწევისას მარშრუტიზატორი წარმოადგენს ქსელის სიცოცხლის სუსტ ადგილს. ეს აიხსნება იმით, რომ ინფორმაციის დროულად მიტანისათვის მარშრუტიზატორი მუდმივად უნდა იმყოფებოდეს ჩართული მიღება-გადაცემის რეჟიმში.

აღსანიშნავია, რომ რეტრანსლატორის ენერგომოხმარება დამოკიდებულია გამოყენებული მარშრუტიზატორის პროტოკოლზე, რომელიც განსაზღვრავს სასამსახურო ტრაფიკს, რაც გენერირდება მარშრუტიზაციის ცხრილების შექმნისა და შენარჩუნებისათვის.

ვთქვათ მარშრუტიზატორის შესასვლელში შედის შემავალ მონაცემთა  $n$  ნაკადი.  $i$ -ური ნაკადის ინტენსიურობა ავლნიშნოთ  $\lambda_i$ .  $i$ -ნაკადში კადრები ერთნაირი  $L_i$  სიგრძისაა. გამოსასვლელზე დუბლირებული იქნება შემავალი ნაკადები. ასევე დამატებულია დადასტურების კადრები, რომელიც იგზავნება უკან ყოველი მოსული პაკეტებისათვის (ნახ.4.3).



ნახ.4.3. ციფრული ქსელის მარშრუტიზატორის მოდელი

მაშინ ყველა კადრის მიღებაზე დახარჯული დრო:

$$k_{rx} = \sum_{i=1}^n \tau_i \lambda_i \quad (4.8)$$

აქ  $\tau_i$ - ერთი პაკეტის მიღებაზე დახარჯული დროა (დადასტურების გაგზავნის გარეშე), რომელიც დამოკიდებულია  $L_i$  სიგრძეზე. დროის წილი დადასტურების გაგზავნასთან ერთად, რომელიც იხარჯება ყოველი კადრის გადაცემაზე:

$$k_{tx} = \sum_{i=1}^n t_i \lambda_i + t_{ACK} \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (4.9)$$

$t_i$ -დრო, დახარჯული ერთი პაკეტის გადაცემაზე,  $t_{ACK}$ -დრო საჭირო ყოველი შემავალი კადრის დადასტურების გაგზავნისათვის (წმ), რომელიც არ არის დამოკიდებული მის (პაკეტის) ზომაზე.

როცა  $k_{rx} + k_{tx} < 1$  მაშინ რეტრანსლიატორი ასწრებს მონაცემთა შემავალი ნაკადის დროულ დამუშავებას. მის მიერ მოხმარებული სიმძლავრე იქნება:

$$P_r = P_{tx} k_{tx} + P_{rx} k_{rx} + (1 - k_{tx} - k_{rx}) P_{idle} \quad (4.10)$$

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

საკვანძო პარამეტრს წარმოადგენს  $P_{idle}$ , რომელსაც აქვს არსებითი გავლენა მარშრუტიზატორის სიცოცხლის დროზე. მისი მნიშვნელობა განისაზღვრება უსადენო ქსელის მუშაობის ალგორითმებითა და პროტოკოლებით. თუ მონაცემთა გადაცემის დაყოვნებისადმი მოთხოვნა ნებას რთავს მარშრუტიზატორს გადავიდეს დადაბლებული ენერგო მოხმარების რეჟიმში ან გამოყენებული იქნას ერთერთი ენერგოდაზოგვის MAC-დონის პროტოკოლი, მაშინ  $P_{idle}$  ახლოს იქნება  $P_s$  მოხმარებულ სიმძლავრესთან ძილის რეჟიმში, წინააღმდეგ შემთხვევაში ის ტოლი იქნება  $P_{rx}$ , და შესაბამისად, რეტრანსლიატორის ავტონომიურად მუშაობის დრო იქნება რამდენიმე თანრიგით ნაკლები.

#### 4.7. მოწყობილობის მიერ მოხმარებული სიმძლავრის გამოთვლა

გამავალ მონაცემთა პაკეტების (ფრეიმების) გადაცემისათვის საჭირო სიმძლავრის საანგარიშოდ შემოვიტანოთ აღნიშვნები: ნაკადის პაკეტების (ფრეიმების) სიხშირე  $f$ , პაკეტის სიგრძე  $L$  (ბიტი), ენერგია  $E_{bit}$ , რომელიც იხარჯება 1 ბიტის გადაცემაზე და დამოკიდებულია კონკრეტული მიმღებ-გადამცემის მახასიათებლებზე. მაშინ ორ კვანძს შორის მონაცემთა გადაცემისათვის საჭირო სიმძლავრე გამოითვლება გამოსახულებით:

$$P_t = E_{bit} * L * f \quad (4.11)$$

IEEE 802.15.4 სტანდარტით განისაზღვრება არხში შეღწევის ლოდინის დრო:

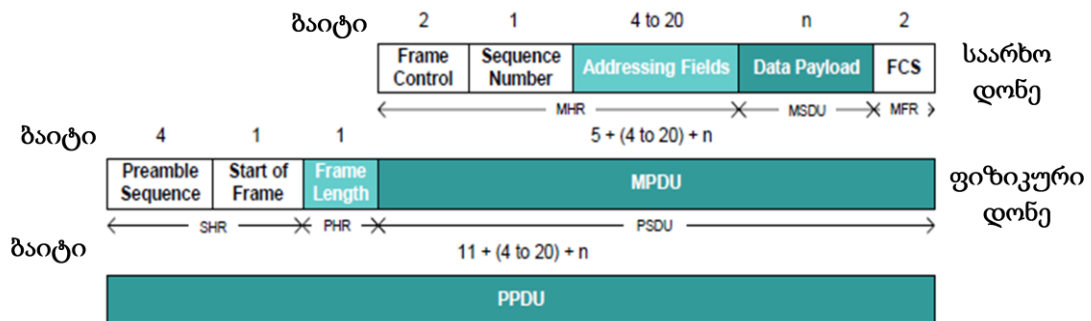
$$t_{wait} = R * aUnitNackOffPeriod \quad (4.12)$$

$R$ -წარმოადგენს მთელ რიცხვს, რომელიც აირჩევა შემთხვევით ყოველ ჯერზე დიაპაზონიდან  $[0..2^{BE} - 1]$ , ხარისხის მაჩვენებელი  $BE$  ტოლია 3-ის,  $aUnitNackOffPeriod$  წარმოადგენს კონსტანტს, რომელიც ტოლია 20 სიმბოლოს პერიოდის. IEEE 802.15.4 სტანდარტში სიხშირული დიაპაზონისათვის 2.4 გჰც ერთი სიმბოლოს პერიოდი ტოლია 16 მწმ.

თუ არხი თავისუფალია, მოწყობილობა გადასცემს მონაცემებს, წინააღმდეგ შემთხვევაში აირჩევა ახალი ლოდინის დრო. უარეს შემთხვევაში R აირჩევა 7-ის ტოლად, მაშინ ლოდინის დრო იქნება 2,24 წმ.

არხის მოსმენის დრო  $t_{CCA}$  მისი მუდმივად დაკავებულობის განსაზღვრისათვის, ტოლია 8 სიმბოლოს პერიოდის, ე.ი. 128 მწმ.

კადრის ფორმა. IEEE 802.15.4 კადრის ფორმა მოცემულია ნახ.4.4-ზე. სასარგებლო დატვირთვის მაქსიმალური ზომა დამოკიდებულია კადრის სასამსახურო ველის სიგრძეზე. ფიზიკური დონის კადრის მაქსიმალური სიგრძე  $aMaxPHYPacketSize=127$  ბაიტი. თუ გამოიყენება ადრესაცია მინიმალური ზომის ფორმატით (4 ბაიტი), მაშინ სასარგებლო დატვირთვის მაქსიმალური ზომა ტოლია 112 ბაიტის. მაქსიმალური სამისამართო ნაწილის შემთხვევაში სასარგებლო დატვირთვა იზღუდება 96 ბაიტით.



ნახ.4.4. IEEE 802.15.4 სტანდარტის საარხო და ფიზიკური დონის კადრის ფორმატი

სტანდარტი განსაზღვრავს 2.4 გჰც სიხშირულ დიაპაზონში გადაცემის საარხო სიჩქარეს  $f=250$  კბიტ/წმ. ამიტომ მონაცემების გადაცემაზე დახარჯული დრო შეიძლება გამოვთვალოთ:

$$t_{data} = \frac{L+O}{f} \quad (4.13)$$

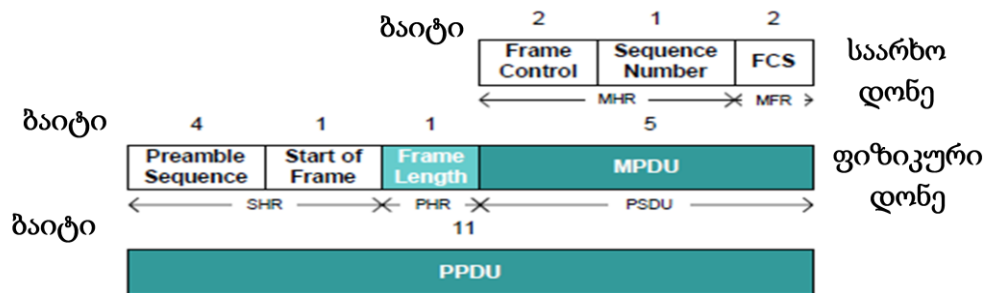
L -პაკეტის ზომაა ბიტებში, O(Overhead)-სასამსახურო ველის ზომა ბიტებში.

დასტურის მიღება. მონაცემთა მიღების დასტურის კადრი შედგება 11 ბაიტისაგან (ნახ.4.5). (4.13) ფორმულის გამოყენებით შეიძლება ვიპოვოთ პირდაპირ გადაცემაზე დადასტურების დრო:

$$t_{ack} = 0.352 \text{ წმ}$$

დადასტურების გაგზავნის წინ არის დაყოვნება 192 მკწმ, რომელიც აუცილებელია მოწყობილობის მიღების რეჟიმიდან გადაცემის რეჟიმში გადასასვლელად. მოწყობილობას, რომ მივცეთ საკმარისი დრო მიღებული მონაცემების დამუშავებისათვის, სტანდარტში განსაზღვრულია მინიმალური დაყოვნებები, რომელიც მიდის დადასტურების კადრის შემდეგ:

- 18 ბაიტამდე კადრის სიგრძისათვის - 18 სიმბოლური პერიოდი (288 მკწმ).
- 18 ბაიტზე მეტი სიგრძის კადრისათვის - 40 სიმბოლური პერიოდი (640 მკწმ).



ნახ.4.5. IEEE 802.15.4 სტანდარტის დადასტურების კადრის ფორმატი

როგორც წესი ეს დაყოვნებები იფარება ახალი კადრის მომზადების გადაცემის დროს. ყოველი კადრის გადაცემისას მოწყობილობა გადის 4 სხვადასხვა სტადიას: პასიური ლოდინის (WAIT), არხის მოსმენის (CCA), კადრის გადაცემის (DATA) და დადასტურების მიღების (ACK) (ცხრ.4.1).

ცხრ. 4.1. დროის განაწილება პაკეტის გადაცემის სტადიებზე IEEE 802.15.4  
ციფრული ქსელის სტანდარტებში

R=3	WAIT=20%	R=7	WAIT=37%
	CCA=3%		CCA=2%
	DATA=70%		DATA=55%
	ACK=7%		ACK=2%

სენსორული ქსელისათვის ეს განაწილება მნიშვნელოვანია გადაცემის რეჟიმის ყოველი სტადიისათვის. მოწყობილობის მუშაობის და მოხმარებული სიმძლავრის შედარება მოცემულია ცხრილში 4.2.

ცხრ.4.2. პაკეტის გადაცემის სტადიისა და უსქ-ის მოწყობილობის მუშაობის რეჟიმების შესაბამისობა

გადაცემის სტადია	მუშაობის რეჟიმი
WAIT	აქტიური
CCA	მიღება
DATA	გადაცემა
ACK	მიღება

მოწყობილობის საშუალო სიმძლავრე მონაცემთა გადაცემის მთელი პროცედურის განმავლობაში იქნება:

$$P_f = \frac{P_a t_{wait} + P_{rx} t_{CCA} + P_{tx} t_{data} + P_{rx} t_{ACK}}{t_f} \quad (4.14)$$

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 ძილის რეჟიმიდან  $t_r$  გამოსვლის დრო. მაშინ აქტიურ რეჟიმში ყველა მოქმედების შესრულებისათვის საჭირო დრო იქნება:



$$t_a = \frac{M \cdot C}{f_{proc}} + t_r \quad (4.15)$$

მაგალითისათვის ავიღოთ პარამეტრების მნიშვნელობა:  $E_o = 20$  კჯ (2 ელემენტი)  $C=3$ ,  $M=5000$ ,  $f_{proc} = 16$ მჰც,  $L=100$ ,  $t_c = 2$ წმ,  $t_r = 8$ მწმ. ამ შემთხვევაში დამაბოლოებელ მოწყობილობას შეუძლია იმუშაოს ელემენტით სამ წელზე მეტი დროით.  $t_c = 0,5$ წმ-ისას ეს დრო შეადგენს დაახლოებით 320 დღეს.

#### 4.8. ქსელის სიცოცხლის მაჩვენებელი

ქსელის სიცოცხლის დრო დამოკიდებულია მისი ცალკეული ელემენტების მუშაობის ხანგრძლივობაზე.

ქსელის სიცოცხლის დროის მაჩვენებლებია:

1) მაჩვენებელი დამოკიდებული კვანძების რაოდენობაზე -  $T_k^n$  - დრო სანამ მუშაობენ ქსელის  $k$  და  $n$ -კვანძები. დანარჩენი კვანძებისათვის გამოიყენება  $T_k^{n-m}$  საზომი. ხშირად გამოიყენება  $T_k^n$  მაჩვენებელი, რომელშიც  $k=n$ . ამ შემთხვევაში ქსელი ითვლება მუშაუნარიანად, იქამდე სანამ მისი ყველა კვანძები მუშაობენ:

$$T_n^n = \min_{i \in V_n} T_i \quad (4.16)$$

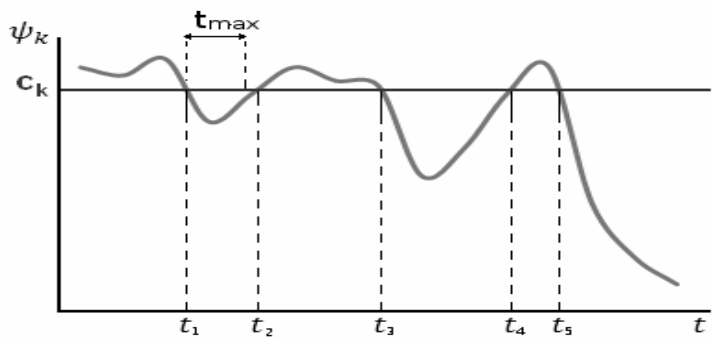
$V_n$ -ქსელის კვანძების სიმრავლეა  $T_i$  -  $i$ -ური კვანძების სიცოცხლის დროა.

2) მაჩვენებელი დამოკიდებული ქსელის დაფარვის ზონის ზომაზე. მოცემული პარამეტრის გამოყენება განპირობებულია სენსორული ქსელის დანიშნულებით - დაკვირვება განსაზღვრულ სფეროში (მედიცინა, გარემოზე დაკვირვება). არსებობს ორი მიდგომა მოცემული ჯგუფის მაჩვენებლის განსაზღვრისადმი. პირველი მიდგომის თანახმად ქსელი ითვლება მუშად იქამდე სანამ  $\alpha$  პროცენტი სამიზნე სფეროდან დაფარულია ერთი სენსორული კვანძით მაინც ( $\alpha$ -დაფარვა). მეორე მიდგომა მიმართულია სიჭარბეზე, მოითხოვს რომ ყოველი წერტილი სამიზნე სფეროდან იყოს დაფარული მინიმუმ  $k$  კვანძით ( $k$ -დაფარვა). ამ მაჩვენებლის ნაკლოვანებას წარმოადგენს ალგორითმის სახით რთული ფორმალიზება.

3) მაჩვენებელი დაფუძნებული ქსელის კავშირების გრაფზე. სენსორული ქსელი წარმოადგენს მონაცემთა შეგროვების განაწილებულ სისტემას. მნიშვნელოვანია ინფორმაციის წაკითხვა გადამწოდებიდან და მისი მიტანა დანიშნულების წერტილში ან წერტილებში. გადაცემისას მონაცემები გადიან შუალედურ რეტრანსლატორებში, რომლებიც უნდა იყვნენ აქტიურ მდგომარეობაში. ამიტომ მოცემული ჯგუფის მაჩვენებლების გამოყენებისას ქსელი ითვლება შრომისუნარიანი იქამდე, სანამ არსებობს მოვლენის მიტანის მარშრუტი ყველა დამაბოლოებელი მოწყობილობებიდან (ან განსაზღვრული წილის დამაბოლოებელი მოწყობილობებიდან) სტოკამდე.

4) მაჩვენებელი დამოკიდებული მონაცემთა გადაცემის დაყოვნებაზე. დაფარვის ყოველი ზონისათვის შემოვიტანოთ ქსელის მუშაობის ხარისხის მაჩვენებელი  $t$  დროის მომენტში. განვიხილოთ დროის რაღაც ინტერვალი  $(t - \Delta t_k, t)$ .  $N_k(t)$  მოვლენების საერთო რაოდენობაა, მოცემულ დროის ინტერვალში წარმოშობილი  $k$  ზონაში.  $L_k(t)$  - მოვლენების რაოდენობა  $N_k(t)$  საერთო რიცხვიდან, რომელიც მიდის სტოკთან დასაშვებ დროში.  $\Delta t_k$  პარამეტრის მნიშვნელობა აირჩევა მოვლენის ინტენსიურობიდან კონკრეტულ ზონაში და მომსახურების ხარისხის უზრუნველყოფის დანართების მოთხოვნით. ქსელის მუშაობის ხარისხის მაჩვენებელი  $k$  ზონაში  $t$  დროის მომენტში იქნება (ნახ.4.6).

$$\psi_k(t) = \begin{cases} \frac{L_k(t)}{N_k(t)}, & \text{თუ } N_k(t) \neq 0 \\ 1, & \text{თუ } N_k(t) = 0 \end{cases} \quad (4.17)$$



ნახ.4.6. ქსელის სიცოცხლის დროის მაჩვენებლის ცვლილება

ვთქვათ  $c_k$  არის  $\psi_k$  მაჩვენებლის ზღვრული მნიშვნელობა, რომლის ქვემოთაც ქსელი ითვლება შრომისუუნაროდ. მაშინ ქსელის ავტონომიური მუშაობის დროის ერთერთი შესაძლო განსაზღვრა იქნება მაქსიმალური  $\tau_1$  დრო:

$$\forall t < \tau_1, \forall k \in [1..m] : \psi_k(t) \geq c_k \quad (4.18)$$

მოცემული განსაზღვრა არ ითვალისწინებს ქსელის თვითაღდგენის შესაძლებლობას.

5) თვითაღდგენის ქსელის სოცოცხლის დრო. ნახ.4.6.-დან ჩანს, რომ დროის რაღაც მომენტში ცალკეული კვანძების მწყობრიდან გამოსვლის გამო, რომელიც გამოწვეულია გარე ფაქტორების მიერ, ამ მაჩვენებლის მნიშვნელობა ეცემა დასაშვებ ზღვარზე ქვემოთ, თუმცა ქსელის ხელახლა აღდგენის შემდეგ ის ისევ შედის დასაშვებ ინტერვალში.

დავუშვათ  $\Theta_k$  წერტილების სიმრავლეა, რომელშიც  $\psi_k$  გადადის  $c_k$  ზღვარს ზემოდან ქვევით და პირიქით:

$$\Theta_k = \{t_i, i = 1, 2, \dots : \psi_k(t_i) \geq c_k \wedge (\psi_k(t_i + \epsilon) < c_k \vee \psi_k(t_i - \epsilon) < c_k), t_i < t_{i+1}, \epsilon \rightarrow 0 \quad (4.19)$$

ნახ.4.6-ზე  $\Theta_k$  სიმრავლე წარმოდგენილია წერტილებით  $t_1, t_2, t_3 \dots t_5$ .

განვსაზღვროთ ქვესიმრავლე  $\Theta'_k \leq \Theta_k - c_k$  საზღვრის გადასვლის წერტილები, ზემოდან ქვევით, შემდგომი გადასვლა უკუმიმართულებით ხდება მოგვიანებით  $t_{max}$  ან საერთოდ არ ხდება.

$$\Theta'_k = \{t_{\pi(i)}, i = 1, 2, \dots : \pi(i) \in [1..|\Theta_k|-1] : \forall t \in (t_{\pi(i)}..t_{\pi(i+1)}) \psi_k(t) < c_k \wedge t_{\pi(i)+1} - t_{\pi(i)} > t_{max}\} \cup \{t_{|\Theta_k|}\} \quad (4.20)$$

ნახ.4.6-ზე დამოკიდებულებისათვის ის მოიცავს წერტილებს  $t_1, t_3, t_5$ -ს, შემდეგ აღდგენა ხდება დასაშვები დროით ( $t_2 - t_1 < t_{max}$ ). მაშინ დროის მომენტი რომლის შემდეგაც ქსელი გამოდის მწყობრიდან ცალკეული  $k$  ზონისათვის იქნება  $\tau_k = \inf \Theta'_k$ , და სოცოცხლის დრო  $T$  მთელი ქსელისათვის:

$$T = \min_k \tau_k \quad (4.21)$$

#### 4.9. დინამიურად რეკონფიგურირებადი ქსელის სიცოცხლის დროის შეფასება

კვანძების ნარჩენი ენერჯის გამოთვლა შეიძლება სტოკის  $\Pi$  მარშრუტის წერტილების გავლის შემდეგ:

$$E_{r_i}(l) = E_i - \sum_{j=1}^l t_i \cdot p_{\pi(j)}^i - \sum_{j=1}^{l-1} e_{\pi(j)-\pi(j+1)}^i, \quad i = \overline{1..n} \quad (4.22)$$

$E_{r_i}(l)$  ნარჩენი ენერჯიაა  $i$ -ური კვანძის სტოკის გავლის შემდეგ  $l (l \leq q)$  მოცემული მარშრუტის  $\Pi$  წერტილში.

$l$ -ის მაგივრად  $q$ -ს ჩასმით მივიღებთ კვანძების ნარჩენ ენერჯიას სტოკის მოძრაობის დასრულებისას. თუ  $E_{r_i}(q)$ , მაშინ  $i$ -კვანძი გამოდის მწყობრიდან სტოკის მოძრაობის დასრულებამდე.

ქსელის სიცოცხლის დროის შეფასება დამოკიდებულია იმაზე თუ როგორაა მასში მოთხოვნები მომსახურების ხარისხისადმი და ასევე როგორაა  $\Pi$  მარშრუტი აგებული.

მარშრუტის წერტილი რომელზედაც პირველი კვანძი მწყობრიდან გამოდის:

$$l' = \min(l \in [1..q] : \exists i \in [1..n] : E_{r_i}(l) < 0) \quad (4.23)$$

ქსელის სიცოცხლის დროის შეფასება შეიძლება:

$$T = \sum_{j=1}^{l'-1} t_j + \min_{i \in [1..n]} \frac{E_{r_i}(l'-1)}{p_{\pi(l')}^i} \quad (4.24)$$

სადაც  $E_{r_i}(0) = E_i, \forall i \in [1..n]$ .

თუ  $\forall i \in [1..n] : E_{r_i}(q) > 0$ , სტოკის მოძრაობისას ყველა კვანძს გააჩნიათ დადებითი ნარჩენი ენერჯია.

თუ მარშრუტიზატორში ბოლო პოზიციაზე სტოკის მოსვლის დროს მაქსიმალური ზრდის ნამატი ტოლი იქნება  $\Delta t = \min_{i \in [1..n]} \frac{E_{r_i}}{p_{\pi(q)}^i}$ , მაშინ ქსელის სიცოცხლის დრო:

$$T_2 = \sum_{j=1}^q t_j + \Delta t \quad (4.25)$$

ზემოთ მოყვანილი მეთოდით სიცოცხლის დროის შეფასება შეიძლება გამოყენებული იქნას იმ შემთხვევაში, როცა მარშრუტი მკაცრად ფიქსირებულია [30].

#### 4.10. სტოკის მოძრაობის დაგეგმვა

თუ რეკონფიგურირებადი სენსორული ქსელი წარმოადგენილია სამეულით:

$$N = (G_s, \Gamma_n, \Pi) \quad (4.26)$$

სადაც  $G_s$  -გრაფის კონფიგურაციაა და  $\Gamma_n$  -ქსელური გრაფის სიმრავლე. აუცილებელია სტოკის  $\Pi$ -ოპტიმალური მარშრუტის პოვნა ქსელის სიცოცხლის დროის მაქსიმიზაციის კრიტერიუმით, ე.ი. უნდა განისაზღვროს, როგორც მიმდევრობა  $(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_q)$ ,  $1 \leq \pi_i \leq m$  სტოკის გადაადგილების  $q$  პოზიციაზე, ასევე  $t_{\pi_i}$  - ყოველ პოზიციაზე მისი ყოფნის დრო.

$$T(t_1, t_2, \dots, t_m) = \sum_{k=1}^m t_k \rightarrow \max \quad (4.27)$$

შემდეგი შეზღუდვების დროს

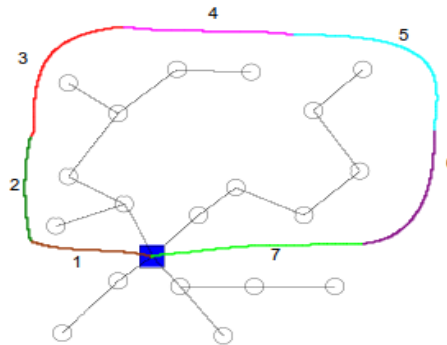
$$\sum_{k=1}^m p_k^i t_k \leq E_i, \quad i = \overline{1..n} \quad (4.28)$$

$$t_k \geq 0, \quad k = \overline{1..m} \quad (4.29)$$

ამოცანის მიზანს წარმოადგენს (4.27) ოპტიმიზაცია, ყველა პოზიციაზე სტოკის ყოფნის ჯამური დროის მაქსიმიზაცია, რაც წარმოადგენს ქსელის ავტონომიური მუშაობის საერთო დროს იმ პირობებში, რომ ყოველი კვანძი მუშაობს თავისი სათადარიგო ენერჯით  $E_i$ -ის ფარგლებში. ბოლო გარანტირებულია (4.28) შეზღუდვის ნაკრებით. ამოცანის გადაწყვეტის შედეგი იქნება  $(t_1, t_2, \dots, t_m)$  მნიშვნელობის ნაკრები.  $T = \sum_{k=1}^m t_k$  წარმოადგენს ქსელის სიცოცხლის დროის ზედა საზღვარს.

#### 4.11. პროგნოზირებადი მობილური სტოკი

პროგნოზირებადი მობილური სტოკის შემთხვევაში მისი მოძრაობა არ კონტროლირდება ქსელის მიერ, თუმცა დიდი ალბათობით შეიძლება ვიწინასწარმეტყველოთ მისი ადგილმდებარეობა დროის ყოველ მომენტში. ნახ.4.7-ზე წარმოადგენილია მობილური კვანძის ციკლური მოძრაობა მოცემული ტრაექტორიით. მობილური კვანძის ციკლური მოძრაობის საერთო პერიოდი  $\tau$  ტრაექტორიის ნაწილებზე მისი ყოფნის დრო  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_l$ .



ნახ.4.7. სტოკის პროგნოზირებადი მობილურობა

ქსელის დინამიური რეკონფიგურაციის განხორციელებისათვის არსებობს ორი ძირითადი შესაძლებლობა:

1. ქსელი თავდაპირველად მუშაობს რეჟიმში - სტოკის პოზიციის განსაზღვრა ტრაექტორიის პირველ ნაწილზე ( $t_1$  დროის განმავლობაში). ამან შეიძლება მოითხოვოს მრავალჯერ სტოკის გავლა ციკლური მარშრუტით. იქამდე სანამ პირველ რეჟიმში მუშაობის საერთო დრო არ მიაღწევს ოპტიმალურს  $t_1$ , სხვა რეჟიმები არ იმოქმედებენ.  $t_1$  ზღვრის მიღწევის შემდეგ ხდება გადასვლა მეორე კონფიგურაციაზე, რომელიც შეიძლება გამოყენებული იქნას სტოკის მეორე ტრაექტორიაზე ყოფნის დროს. მოცემული გადაწყვეტის დადებით მხარეს წარმოადგენს დანახარჯების შემცირება ენერგეტიკული რეჟიმების ცვლის რეგულირებაზე. ნაკლოვანებაა მონაცემთა გადაცემის დაყოვნებების არსებითი გაზრდა.

2. ქსელი თანმიმდევრობით იცვლის მუშაობის ენერგეტიკულ სქემას სტოკის გადანაცვლებისას ტრაექტორიის ნაწილებს შორის. სტოკი ყოველი  $i$  ენერგეტიკული რეჟიმებისათვის აგროვებს მასში მუშაობის საერთო დროს და სანამ ეს დრო ნაკლებია  $t_i$  ოპტიმალურზე. გადაჰყავს მასში ქსელი  $i$ -ურ მონაკვეთზე გავლისას. მიდგომის ღირსებაა ქსელის მუშაობის საწყის ეტაპზე მონაცემთა დაყოვნების შემცირება. მაგრამ თანდათანობით ქსელის მუშაობის ციკლებში იქნება მეტი და მეტი პაუზა, დაკავშირებული განსაზღვრული სქემების გამოყენების დასრულებასთან (მათთვის საერთო დრო ხდება ოპტიმალურის ტოლი  $t_i$ ).

3. ყოველ ციკლში ქსელის მუშაობის დრო  $i$ -ურ რეჟიმისას  $\Theta_i$  განისაზღვრება შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$\Theta_i = \tau_i * \frac{t_i}{T} \quad (4.30)$$

ამგვარად რეგულირდება ქსელის ფუნქციონირება მონაცემთა გადაცემისას დიდი დაყოვნების გარეშე. თუმცა მკვეთრად იზრდება ენერგია, რომელიც იხარჯება ქსელის მუდმივად კონფიგურირებაზე.

შევიტანოთ მთელრიცხოვრივი ცვლილებები:

$$x_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{თუ } (j - k) \text{ შედის კონფიგურაციის ცვლის მიმდევრობაში} \\ 0, & \text{წინააღმდეგ შემთხვევაში} \end{cases}$$

$$y_k = \begin{cases} 1, & \text{თუ } t_k > 0 \\ 0, & \text{თუ } t_k = 0 \end{cases}$$

ვთქვათ  $D = \|d_{ij}\|$   $G_s$  გრაფის მომიჯნავე მატრიცაა

$$d_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{თუ } (i, j) \in E_s \\ 0, & \text{თუ } (i, j) \notin E_s \end{cases}$$

პროგრამირებას ექნება შემდეგი სახე:

$$T(t_1, t_2, \dots, t_m) = \sum_{k=1}^m t_k \rightarrow \max \quad (4.31)$$

შემდეგი შეზღუდვებისას:

$$\sum_{k=1}^m p_k^i t_k + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1, k \neq j}^m x_{jk} e_{j-k}^i \leq E_i, \quad i = \overline{1..n} \quad (4.32)$$

$$\sum_{k=1}^m x_{0,k} = 1 \quad (4.33)$$

$$\sum_{k=1}^m x_{k,m+1} = 1 \quad (4.34)$$

$$\sum_{j=0, j \neq k}^m x_{jk} = \sum_{j=1, j \neq k}^{m+1} x_{k,j}, \quad k = \overline{1..m} \quad (4.35)$$

$$\sum_{j=0}^m x_{jk} = y_k, \quad k = \overline{1..m} \quad (4.36)$$

$$t_{\min} \cdot y_k \leq t_k \leq t_{\max} \cdot y_k, \quad k = \overline{1..m} \quad (4.37)$$

$$u_j - u_k + m \cdot x_{jk} \leq m - 1, \quad \forall j, k \in [1..m], j \neq k \quad (4.38)$$

$$x_{jk} \leq d_{jk}, \quad \forall j, k \in [1..m], j \neq k \quad (4.39)$$

$$x_{jk} \in \{0,1\}, \quad y_k, u_k \in N$$

(4.27) ამოცანასთან შედარებით მთლიანი ფუნქცია არ შეიცვალა. ძველებურად T ქსელის ავტონომიური მუშაობის საერთო დროა, რომელიც შედგება სტოკის ყოფნის ჯამური ხანგრძლივობისაგან ყველა პოზიციაზე. თუმცა ყოველ შეზღუდვას (4.32) ნაკრებიდან ემატება დამატებითი ენერგია რომელიც იხარჯება ენერგეტიკული სქემების ცვლილებაზე.

მარშრუტის აგების ამოცანაში შედის ხელოვნური დამატება. სტოკმა მოძრაობა შეიძლება დაიწყოს ნებისმიერი წერტილიდან, სტოკის პოზიციის გრაფში გამოჩნდება დამატებითი ვირტუალური წვეროები-0 და m+1, იმისათვის რომ დაფიქსირდეს მარშრუტის დასაწყისი და დაბოლოება. თავდაპირველად სტოკი იმყოფება 0 წვეროზე, შემდეგ გადაადგილდება ერთერთ წვეროში, რომელსაც განსაზღვრავს მოდელი, როგორც მარშრუტის ოპტიმალური დასაწყისი. ყველა წვეროს გავლის შემდეგ რომლისთვისაც  $t_k > 0$  სტოკი გადაადგილდება მარშრუტის ბოლო წერტილში - m+1.

განვიხილოთ ქსელი, რომელიც შედგება N კვანძისაგან, აღვნიშნოთ კვანძების სიმრავლე -  $V = \{a_1, a_2, \dots, a_N\}$ . ორი კვანძი რომელიც მდებარეობს ერთმანეთის პირდაპირ ხედვის არეში აწარმოებენ წიბოებს, ამგვარად ჩვენ მივიღებთ მოსაზღვრე სიჭარბის გრაფს  $G=[V,E]$ . კვანძი  $a_0$ - ქსელის კოორდინატია. ავაგოთ გრაფის G ყველა ქვეგრაფი  $T_k, k \in \overline{1,k}$ , რომელიც შედგება ფესვების ელემენტებით  $a_0$  და მოიცავს მის ყველა კვანძს, ამასთან  $R_k - T_k$  გრაფის ყველა მარშრუტიზატორის ნაკრებია. თუ



კვანძების როლი დინამიურად იცვლება და ქსელის ტოპოლოგია გადაეწყობა, მაშინ შეიძლება მთელი ქსელის სიცოცხლის დრო დაუახლოვდეს მის დამაბოლოებელ მოწყობილობების სიცოცხლის დროს. ერთდროულად მომუშავე მარშრუტიზატორების ნაკრები ციკლურად ცვლიან ერთმანეთს. ტოპოლოგიის გადაწყობაზე გადაწყვეტილებას ღებულობენ ქსელის კოორდინატორები.

განვიხილოთ  $\{R_k\}_{k=1}^K$  სიმრავლის თავისუფალი ქვესიმრავლე  $\{R_{k_m}\}_{m=1}^M$ . გვაქვს  $M_i$  რიცხვი  $\{R_{k_m}\}_{m=1}^M$  ნაკრებიდან, რომელიც შეიცავს  $a_i$ -ს. მაშინ  $a_i$  კვანძში მოხმარებული საშუალო დენის ძალა იქნება:

$$I_i = I_R \left( \frac{M_i}{M} \right) + I_E \left( \frac{M - M_i}{M} \right) = I_E + (I_R - I_E) \frac{M_i}{M} \quad (4.41)$$

$I_R$  მარშრუტიზატორის,  $I_E$ -კი დამაბოლოებელი მოწყობილობის დენის საშუალო ძალაა. ქსელის სიცოცხლის დრო იქნება:

$$T = \min_i \frac{Q_i}{I_i} \rightarrow \max \quad (4.42)$$

$Q_i - a_i$  მოწყობილობის მუხტია. თუ დროის საწყის მომენტში  $Q_i = Q$  მაშინ პირობა (4.42) გადადის პირობაში:

$$\max_i I_i = I_E + (I_R - I_E) \frac{\max_i M_i}{M} \rightarrow \min \quad (4.43)$$

თუ სიმრავლე  $\{R_{k_m}\}_{m=1}^M$  დამოკიდებულია, მაშინ  $\max M_i = 1$  და

$$M \rightarrow \max \quad (4.44)$$

აქედან გამომდინარეობს დაკვნა რომ ქსელის სიცოცხლის დროის მაქსიმიზაციისათვის აუცილებელია ვიპოვნოთ ქსელის გრაფის დამოუკიდებელი მარშრუტიზატორების ნაკრების მაქსიმალური რიცხვი. შეიძლება გაკეთდეს  $M$  რიცხვის შეფასება ზემოდან:

$$M \leq \min_{i \in I} k_i \quad (4.45)$$

I წვეროების ინდექსების სიმრავლეა, რომელიც არ არის კოორდინატორის მეზობელი,  $k_i - a_i$  კვანძის მეზობლების რიცხვი.

გამოვთვალოთ  $\Delta_a$  შეტყობინების მიტანის დრო  $a$  კვანძიდან კოორდინატორთან. შეტყობინება გადაიცემა ჯაჭვით  $\{b_l\}_{l=0}^d$ . სადაც  $b_0 = a_0$  და  $b_d = a$ . დრო მოვლენის წარმოშობასა და შეტყობინების გადაცემას შორის არის რაღაც შემთხვევითი სიდიდე  $\tau_1$ , განაწილებული ინტერვალში  $[0, BI-SD]$ , შემდგომი მიტანის დროის ნაწილი განისაზღვრება დაყოვნებით მარშრუტიზატორზე. მარშრუტიზატორში დაყოვნება ტოლია საკუთარ სუპერფრეიმსა და მშობლიურ სუპერფრეიმს შორის დროის შუალედის.

$\Delta_a$  განისაზღვრება დროის მომენტით, როცა მოხდა შეტყობინების გადაცემა კოორდინატორისათვის. ჩავთვალოთ ის შემთხვევით სიდიდედ  $\tau_2$ , განაწილებულად ინტერვალში  $[0, SD]$ . მაშინ

$$\Delta_a = \tau_1 + \sum_{l=1}^{d-1} \tau_{b_l} + \tau_2, \quad (4.46)$$

ჩავთვალოთ შემთხვევითი სიდიდეები თანაბრად განაწილებული თავის ინტერვალზე. მაშინ  $E(\tau_1 + \tau_2) = BI/2$ . შეტყობინების მიტანის საშუალო დრო:

$$\tau_T = \frac{1}{N-1} \sum_{a \in V/a_0} \Delta_a = \frac{1}{N-1} \sum_{a \in V/a_0} \left( \sum_{l=1}^{d(T,a)-1} \tau_{b_l(T,a)} + \frac{BI}{2} \right) \quad (4.47)$$

გავხსნათ ფრჩხილები და დავაჯგუფოთ წევრები, მივიღებთ:

$$\tau_T = \frac{BI}{2} + \frac{1}{N-1} \sum_{a \in V/a_0} \omega(T, a) \tau_a \quad (4.48)$$

$\omega(T, a)$  ქვეარხის ზომაა  $a$  ფესვებით. ე.ი. შეტყობინების მიტანის დროის მინიმუმის ამოცანა დაიყვანება ამოცანაზე:

$$\sum_{a \in V/a_0} \omega(T, a) \tau_a \rightarrow \min \quad (4.49)$$

დავყოთ შუქურებს შორის ინტერვალი  $BI$   $S=2^{BO-SO}$  - სლოტად. ყოველი მათგანი ტოლი იქნება სუპერფრეიმის  $SD$  ხანგრძლივობის. შესაბამისობისას  $a \in R$  სუპერფრეიმის სლოტის ნომერი  $s = Sf(a) \in \overline{1, S}$ ,  $\Delta t = SD \cdot s$ , სადაც  $\Delta t$  დრო  $a$  და  $a_0$  შუქურას შორის.

ფუნქციის არსებობისას  $Sf: R \rightarrow \overline{1, S}$ , შეიძლება განისაზღვროს სიდიდეები  $\tau_a = (Sf(a) - Sf(p))$  ნებისმიერი  $a \in R$ . სადაც  $p$ - მშობლიური  $a$ . ამგვარად შეიძლება ამოცანა დავიყვანოთ წინა ნაწილზე  $Sf$  ფუნქციის ძებნაზე, რომელიც ახდენს  $\tau_T$  სიდიდის მნიშვნელობის მინიმიზირებას და აკმაყოფილებს პირობებს:

- $Sf(p) \neq Sf(c)$ , თუ  $p$  წარმოადგენს  $c$ -ს მეზობელს;
- $Sf(c) \neq Sf(n)$ , თუ  $c$  წარმოადგენს  $n$ -ს მეზობელს.
- $Sf(c) \neq Sf(l)$ , თუ  $l$  წარმოადგენს  $c$  მეზობლის მშობლიურს;
- $Sf(c) \neq Sf(g)$ , თუ  $g$  წარმოადგენს შვილობილი  $c$  კვანძის მეზობელს.

დადასტურებულია რომ ნებისმიერი ტრაფიკის გავლენა მოწყობილობების სიცოცხლის დროზე ძალიან მცირეა (<2% კვანძის სიცოცხლის დროის).

ქსელის პარამეტრების გამოყენების და 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 [31].

**დასკვნა.** 1.განსაზღვრულია ქსელის სიცოცხლის დრო.

2.ჩამოყალიბებულია უსქ-ის ავტონომიური მუშაობის დროის გაზრდისათვის საჭირო აპარატურული პროგრამული მოწყობილობების საშუალებების გამოყენების პირობები.

3.დამტკიცებულია, რომ ქსელის ყველა კვანძის მოხმარებული სიმძლავრის გათანაბრებისათვის შეიძლება გამოყენებული იქნას ენერგეტიკული ბალანსირების სხვადასხვა მეთოდები (energy balancing), კერძოდ: ელემენტის ტევადობის ინდივიდუალური შერჩევა, კონკრეტულ ზონაში ქსელის კვანძების განთავსება სხვადასხვა სიმკვრივით.

4.შეფასებულია სხვადასხვა დანიშნულების კვანძის სიცოცხლის დრო – დამაბოლოებელი კვანძი, რეტრანსლატორი აქტიურ და პასიურ რეჟიმებში.

5. ნაჩვენებია, რომ ტოპოლოგიის გადართვის ალგორითმები უზრუნველყოფენ დახარჯული ენერჯის ოპტიმალურ მართვას. რის შედეგადაც კვების წყაროების საწყისი მუხტების განსხვავებულობის მიუხედავად ყველა მოწყობილობა თითქმის ერთდროულად განიმუხტება.

## თავი V. მოხმარებული ელექტროენერჯის აღრიცხვისა და მართვის სისტემა უსადენო ტელეკომუნიკაციური მეთოდების გამოყენებით

როგორც პირველ თავში იყო აღნიშნული ამჟამად უსადენო სენსორული ქსელები სულ უფრო ხშირად გამოიყენება ადამიანის ყოველდღიურ საქმიანობაში. ამ მხრივ 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). ადვილი დასათვლელია ელექტროენერჯის მრიცხველების რიცხვი საქართველოში. საქართველოს მოსახლეობა ბოლო საყოველთაო აღწერის (2014 წ.) შედეგების მიხედვით შეადგენს 3.7 მილიონ ადამიანს. თუ ოჯახის წევრთა საშუალო რიცხვად ავიღებთ 4-ს, მაშინ საქართველოში ოჯახების რაოდენობა შეადგენს 425 ათასს (ცხადია ეს მიახლოებითი რიცხვია, რომელიც ძალიან ახლოს უნდა იყოს სინამდვილესთან). თუ ჩავთვლით, რომ თითოეულ ოჯახს ქალაქად, ასევე სოფლად აქვს ელექტროენერჯის ერთი მრიცხველი და მომხმარებელთა კერძო სექტორის აბონენტებს თუ დავუმატებთ არასაცხოვრებელ სექტორსაც (წარმოება, ადმინისტრაცია, ვაჭრობა, განათლება, მედიცინა, სოფლის მეურნეობა, ტრანსპორტი და ა.შ.) ელექტროენერჯის დისტრიბუციაში გამოყენებულ მრიცხველთა რაოდენობა საქართველოში მილიონის ფარგლებშია. ქვემოთ მოყვანილი იქნება ჩვენს მიერ შექმნილი ელექტროენერჯის აღრიცხვის ავტომატიზირებული სისტემის საცდელი ვარიანტი და მისი კვლევის შედეგები. ეს სისტემა წარმოადგენს წინამდებარე სადისერტაციო ნაშრომის ნაწილს, რადგანაც იგი დაფუძნებულია სენსორული კვანძების აგების პლატფორმაზე - Arduino და სატელეკომუნიკაციო კავშირების უსადენო ტექნოლოგიების გამოყენებაზე.

### 5.1 მოხმარებული ელექტროენერჯის აღრიცხვის ორგანიზაციის მოქმედი სისტემა

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. მრიცხველები განთავსებულია დამცავ კარადებში ცალცალკე ან ჯგუფურად (რამოდენიმე ერთეული ან ათეული მრიცხველი ერთ კარადაში) მოხმარებული ელექტროენერჯის რაოდენობას გარკვეული პერიოდულობით (თვეში ერთხელ მაინც) აღრიცხავენ ამ საქმისათვის სპეციალურად გამოყოფილი თანამშრომლები, რის საფუძველზეც თითოეულ აბონენტს დადგენილი ტარიფის შესაბამისად დაერიცხება მოხმარებული ელექტროენერჯის საფასური. ცხადია ეს ტრადიციულად დამკვიდრებული სისტემაა, რომელიც ბოლო წლებში განხორციელებული ტექნიკური გადაიარაღებით მნიშვნელოვნად გაუმჯობესდა, თითქმის აღმოიფხვრა ელექტროენერჯის დატაცების პრაქტიკა, შეუძლებელი გახდა აღრიცხვისათვის ზოგიერთი არაკეთილსინდისიერი მუშაკის მიერ მოხმარებული ენერჯის დაფარვა და სხვ. მიუხედავად ამისა ჯერ-ჯერობით არ არის დანერგილი აღრიცხვის ავტომატიზირებული სისტემები, გამოუყენებელია თანამედროვე IT-ტექნოლოგიების ფართო შესაძლებლობები. ცალკეული მცდელობები ამ მიმართულებით დიდი ეკონომიკური დანახარჯების გამო ჯერ-ჯერობით არსებით შედეგებს ვერ იღებს.

## **5.2. მოხმარებული ელექტროენერჯის აღრიცხვის სისტემა Arduino-ს ელექტრონული მოწყობილობების გამოყენებით**

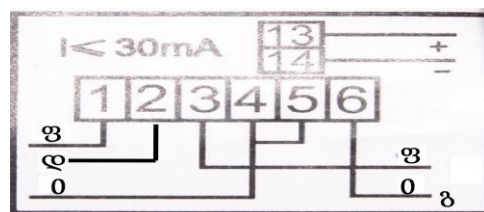
მოხმარებული ელექტროენერჯის მრიცხველებს შორის ტექნოლოგიურად ყველაზე წინწაწეულს წარმოადგენენ ელექტრონული მრიცხველები. ამჟამად მიმდინარეობს მორალურად მოძველებული ინდუქციური მრიცხველების თანდათანობითი შეცვლა ელექტრონულით. ელექტრონული მრიცხველების ცალკეულ მოდიფიკაციებს გააჩნიათ ინტერფეისები მონაცემების გადაცემის ქსელებში ინფორმაციის გადასაცემად. ამ მიზნით ზოგჯერ გამოიყენება 220/380 ვოლტიანი ელექტროენერჯის განაწილების ქსელებიც. მიუხედავად ამისა ჯერჯერობით როგორც ინდუქციური, ასევე ელექტრონული მრიცხველების მასობრივი ჩართვა მონაცემების გადაცემის ქსელებში მოხმარებული ელექტროენერჯის დისტანციური

აღრიცხვისათვის ჯერჯერობით არ ხორციელდება. ამის მიზეზი პირველ რიგში შესაბამისი ინტერფეისების მქონე ელექტრონული მრიცხველების შედარებით მაღალი ღირებულება და ძალოვანი ქსელებით ინფორმაციის გადაცემის დროს შეცდომების დიდი ალბათობაა. შესაბამისად 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. Arduino მოწყობილობების ვრცელი ჩამონათვალი, მათი ფუნქციონალური დანიშნულებებისა და შესაძლებლობების აღწერით მოცემულია წინამდებარე ნაშრომის დანართში (დანართი 1). აქ განვიხილავთ მხოლოდ მიკროკონტროლერ Arduino Uno-ს გამოყენებას მოხმარებული ელექტროენერგიის პროპორციული იმპულსების რაოდენობის დასათვლელად, ელექტრონული მრიცხველის პარალელურად, ამ ინფორმაციის შენახვისა და მონაცემების გადაცემის ქსელით მისი შემდგომი გადაცემის მიზნით [32].

ელექტროენერგიის ყველაზე მრავალრიცხოვან ელექტრონულ მრიცხველს, რომელიც ამჟამად გამოიყენება საქართველოს ელექტროენერგიის დისტრიბუციის სისტემებში წარმოადგენს KACKAD-101M (ნახ.5.1. ა), ნახ.5.1.ბ-ზე მოყვანილია ამ ელექტრომრიცხველის გამოსასვლელი კონტაქტების დანიშნულება. წარმოებული რუსეთის ფედერაციაში. ნახ.5.2. ნაჩვენებია მიკროკონტროლერ Arduino Uno-ს ამ მრიცხველთან მიერთების სქემა.



ა)

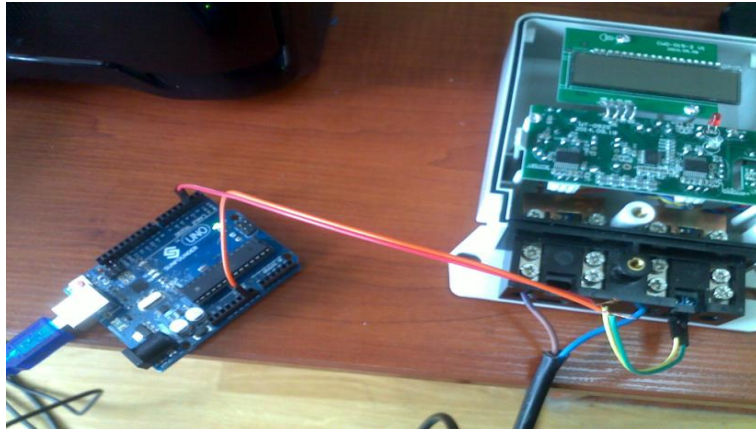


ფ-ფაზა  
დ-ელექტრომწარმოებელი  
გენერატორიდან დენი

0-ნოლი  
გ-გამოსასვლელი

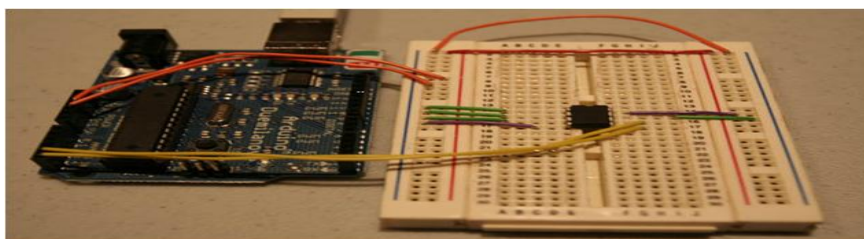
ბ)

ნახ.5.1. მრიცხველი KACKAD-101M



ნახ.5.2. 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). პირველი ვარიანტის განხორციელებისათვის საჭიროა სისტემის მუშაობის კოდში შევიტანოთ შესაბამისი ბრძანება. მეორე ვარიანტით მეხსიერების ჩიპის ჩართვის სქემა ნაჩვენებია ნახ.5.3.



ნახ.5.3. ჩიპი 24C02-ის ჩართვის სქემა



გამოყენებული ჩიპი EEPROM AT24C02, რომელიც Arduino-სთან მიერთებულია I2C პროტოკოლის გამოყენებით არის ენერგოდამოუკიდებელი, კვების გათიშვის შემთხვევაში ჩიპში არ იკარგება შეგროვებული მონაცემები. აღნიშნული კონტროლერი მუდმივად (პრაქტიკულად ელექტრონული მრიცხველის პარალელურად) ითვლის მიწოდებული იმპულსების რაოდენობას. კონტროლერი საჭირო პროგრამირებით, აღრიცხავს მოხმარებული ელექტროენერგიის რაოდენობას კვტ/სთ-ების მთელ ან წილად ერთეულებში. Arduino Uno-ს შესაბამისი პროგრამირებით შესაძლებელია მრიცხველის გამორთვა სიმძლავრის დასაშვები მნიშვნელობის გადაჭარბების შემთხვევაში. შესაბამისი მმართველი ინფორმაცია მიიღება ჩიპის 24C02 მე-3 გამოსასვლელზე.

იმპულსების დათვლისათვის Arduino-ს პროგრამულ უზრუნველყოფაში ვაინსტალირებთ შემდეგ კოდს ნახ.5.4.

კოდში საწყის პარამეტრებად აღებულია იმპულსების რაოდენობის და სიმძლავრის თანაფარდობა, ჩვენ შემთხვევაში აღებული მრიცხველისათვის 3200 იმპულსი, რაც შეესაბამება 1 კილოვატ სიმძლავრეს. არსებობს მრიცხველები რომლისთვისაც 1600 იმპულსი შეესაბამება 1 კილოვატს. პროგრამაში ასევე შეგვიძლია შევიტანოთ იმპულსების ძველი ჩვენება, ხოლო სისტემის მიერ დათვლილი იმპულსები შესაბამის მიმდინარე კილოვატებს ამატებს ძველ კილოვატებს.

Arduino სისტემა აღჭურვილია სიმძლავრის მართვის ფუნქციით, რაც გულისხმობს, რომ გადაჭარბებული მოხმარების შემთხვევაში ავტომატურად გაითიშოს მრიცხველი, რაც ორგანიზებული გვაქვს კოდში გამოსახულების შესაბამისად -  $იმპულსები\ წამში < \frac{P_{max} \cdot 3200\text{ იმპ/კვ.სთ}}{3600\text{ წმ}}$ . თუ ერთი წამის განმავლობაში იმპულსების რაოდენობა აჭარბებს 12 იმპულსს Arduino ბლოკიდან რელეს (ტექნიკური მონაცემებით - 24V-380V 60A 250V SSR-60 DA Solid State Relay Module 3-32V DC To AC) მართვის კონტაქტს (ნახ.5.5) მიეწოდება სიგნალი მრიცხველის გათიშვის შესახებ.

```
codi.txt - Notepad
File Edit Format View Help
#include <wire.h>
#include <MsTimer2.h>

volatile unsigned int state = 3200;
volatile unsigned int blinkMin = 0;
volatile unsigned int tm = 0;
unsigned int kwh = 0;
unsigned int wm = 0;
int sum=1;
int oldsum=391;
void setup(){
  serial.begin(9600);
  pinMode(2, INPUT_PULLUP);

  attachInterrupt(0, blink, RISING); // 2

  /*MsTimer2::set(60000, MsTimer);
  MsTimer2::start();
  */
}

void loop(){
  int sensorval = digitalRead(2);

  if(kwh!=0){
    // Serial.print(sum);
    sum++;
  }
  if(sum==33){
    sum=1;
    oldsum++;
    Serial.println(oldsum);
  }
  kwh=0;
  if (sensorval == HIGH) {
    digitalWrite(13, Low);
  }
  else {
    digitalWrite(13, HIGH);
  }
}

/*void MsTimer(){
  wm = blinkMin;
  blinkMin = 0;
}*/

void blink(){

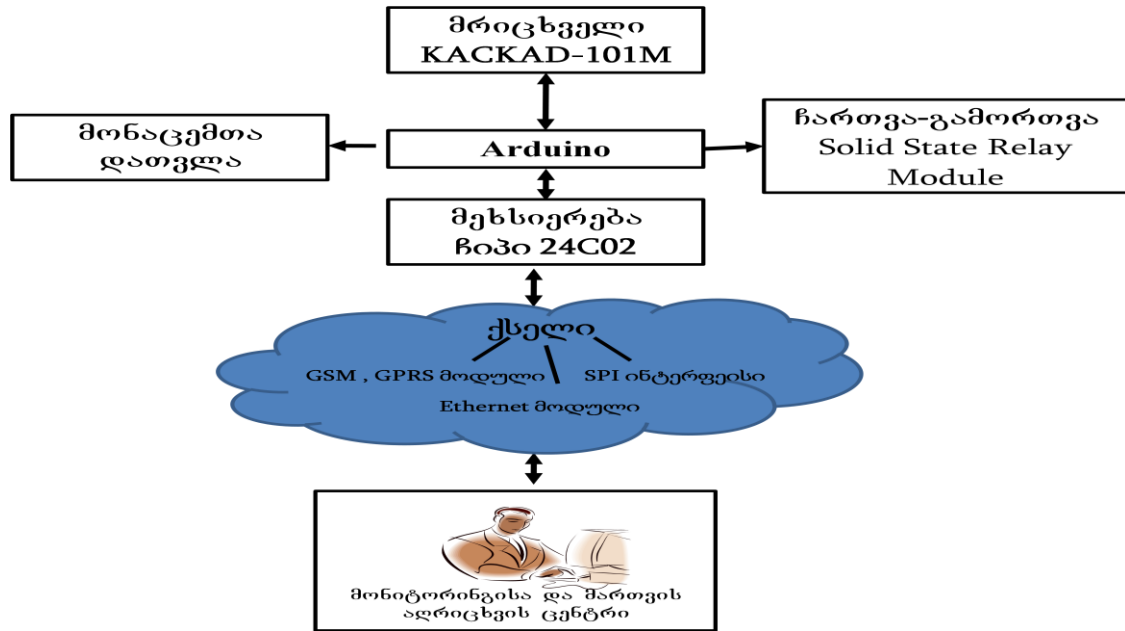
  kwh=1;
}
}
```

ნახ.5.4. Arduino პროგრამული უზრუნველყოფის კოდი



ნახ.5.5. რელე მმართველი კონტაქტით

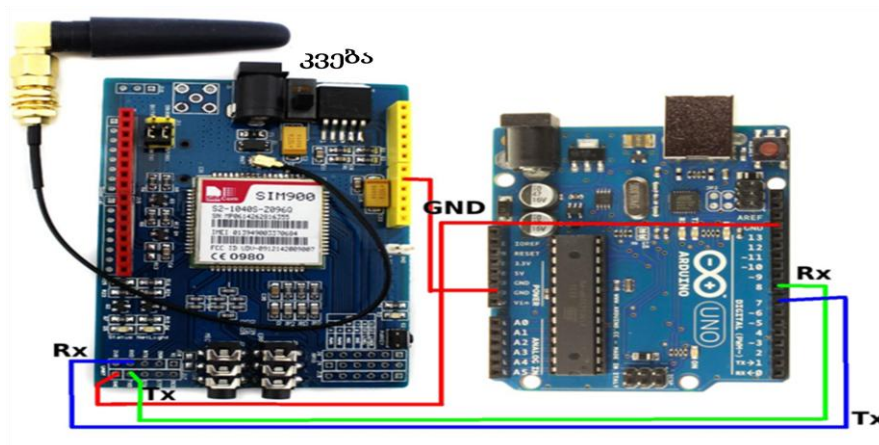
შემოთავაზებული სისტემის ბლოკ სქემა Arduino Uno კონტროლერში დაფიქსირებული ინფორმაციის ელექტროქსელის ბილინგის ცენტრში ტელეკომუნიკაციური ტექნოლოგიებით გადაცემის შესაძლებლობით ნაჩვენებია ნახ.5.6.



ნახ.5.6. ელექტროენერგიის აღრიცხვის ბილინგის ცენტრში გადაცემის სისტემის ბლოკ-სქემა

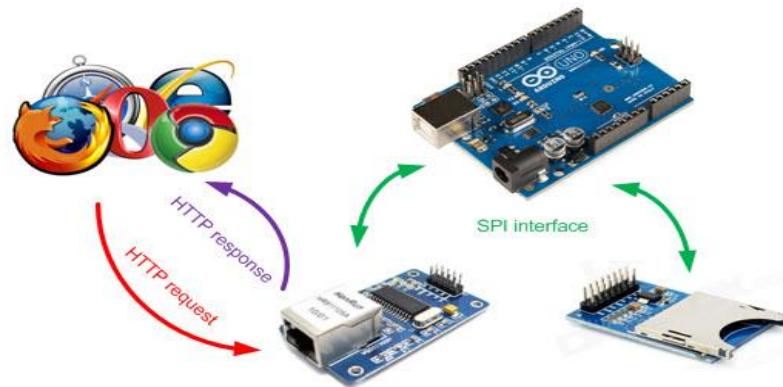
ბილინგის ცენტრში მეხსიერების ჩიპიდან მონაცემების გადაცემისათვის შეიძლება გამოყენებული იქნას შემდეგი ტექნოლოგიები:

1. GSM, GPRS მოდული SIM900, რომლის შეერთების სქემა ნაჩვენებია ნახ.5.7.



ნახ.5.7. GSM GPRS მოდული

2.SPI ინტერფეისი, რომელიც შეგვიძლია გამოვიყენოთ შენახული ინფორმაციის HTTP ტიპის პროტოკოლით გადაცემისათვის ნახ.5.8.



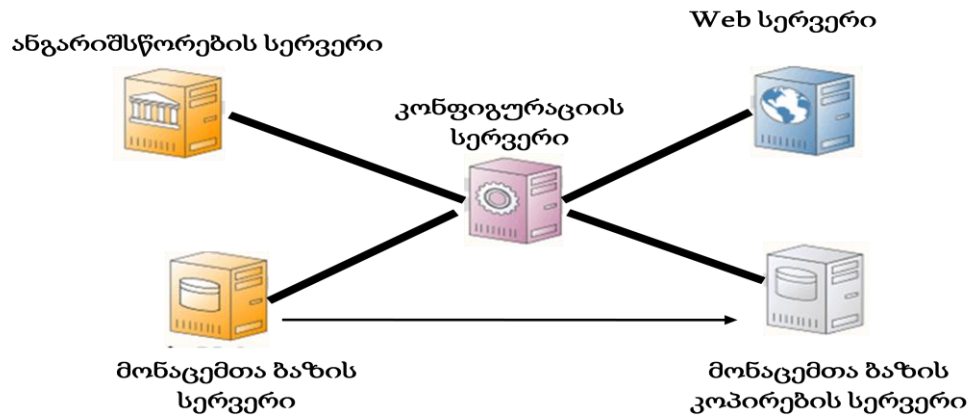
ნახ.5.8. SPI ინტერფეისით ინფორმაციის გადაცემა

3. Ethernet მოდული HanRun HR911105A12/18 (ნახ.5.9).



ნახ.5.9. 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 (ნახ.5.10.).



ნახ.5.10. საბილინგო სისტემა

საბილინგო სისტემაში ხდება ქსელიდან მიღებული ინფორმაციის დამუშავება, დახარისხება და მონაცემთა ბაზაში შენახვა. სისტემა იძლევა საშუალებას მონაცემთა ბაზა განახლებული იქნას პერიოდულად Web სერვერის გამოყენებით. მომხმარებელს შეუძლია აკონტროლოს მიმდინარე ხარჯი, მოახდინოს დავალიანების გადახდა. ანგარიშსწორების სერვერი დანიშნულია უსაფრთხოების უზრუნველყოფისათვის, აბონენტების რეგისტრაციისათვის და აუტენტიფიკაციისათვის. საბილინგო სისტემას აქვს უკუკავშირი Arduino მოწყობილობასთან, რაც გულისხმობს ბილინგის სისტემიდან Arduino მოწყობილობის მართვას (მაგ. დავალიანების 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 (თავი.3, §3.2. ნახ.3.4), (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 ჩართვის) მოხმარებული ელექტროენერჯის საფასურის გადახდის შემთხვევაში. ცხადია ჩართვა-გამორთვის ეს ოპერაციები სრულდება ბილინგის სისტემიდან ავტომატური მართვით.

**დასკვნა მე-5 თავისათვის.** 1. მოყვანილია ჩვენს მიერ შექმნილი ელექტროენერჯის აღრიცხვის ავტომატიზირებული სისტემის საცდელი ვარიანტი და მისი კვლევის შედეგები.

2. განხილულია მიკროკონტროლერ Arduino Uno-ს გამოყენება მოხმარებული ელექტროენერჯის პროპორციული იმპულსების რაოდენობის დასათვლელად, ელექტრონული მრიცხველის პარალელურად, ამ ინფორმაციის შენახვისა და მონაცემების გადაცემის ქსელით მისი შემდგომი გადაცემის მიზნით.

3. Arduino-ს ოჯახიდან დაბალბიუჯეტური ბლოკების გამოყენებით შესაძლებელია არსებული ელექტრონული მრიცხველების უმნიშვნელო მოდიფიკაციით მათთვის მონაცემების გადაცემის ქსელებში შესვლის შესაძლებლობის შექმნა.

## დასკვნა

1. შესწავლილია სენსორული ქსელების განვითარების დღევანდელი მდგომარეობა, ჩატარებულია მისი კრიტიკული ანალიზი.
2. გამოკვლეულია ზემო-ს მოქმედება მფრინავ სენსორულ ქსელებში; ჩამოყალიბებულია ასეთი ქსელების გამოყენების მიზანშეწონილობის პირობები.
3. გამოკვლეულია ქსელის ძირითადი მოწყობილობების, საბოლოო კვანძების, მარშრუტიზატორების (შუალედური კვანძების) და კოორდინატორების ენერგომომარება. შემუშავებულია მათი ენერგომომარების 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.

## დაბალბიუჯეტიანი ARDUINO კონტროლერების გამოყენება ხელსაწყოთმშენებლობაში

### დ.1.შესავალი

ამჟამად ნებისმიერი ტექნოლოგიური პროცესი ვერ ჩაივლის ელექტრონიკის საშუალებების გარეშე და მათი შეღწევა თანამედროვე ხელსაწყოთმშენებლობაში განუხრელად იზრდება. თანამედროვე მანქანების ელექტრონულ კომპონენტებს შორის მნიშვნელოვან ადგილს იკავებენ სამრეწველო გადამწოდები, ან როგორც მათ პოპულარულად უწოდებენ - სენსორები. გამოყენებული სენსორების ფართო ნომენკლატურა შეიძლება კლასიფიცირებული იქნას სხვადასხვა პოზიციებით და მიდგომებით:

- გამომავალი სიგნალის ტიპის მიხედვით (ანალოგური, ციფრული, დისკრეტული);
- მართვის ობიექტთან ურთიერთქმედების ტიპის მიხედვით (კონტაქტური, უკონტაქტო);
- მოქმედების პრინციპის მიხედვით (ოპტიკური, ინდუქციური, ტევადური, ულტრაბგერითი და სხვ.);
- გასაზომი სიდიდის და თვისებების მიხედვით (პოზიცია, მანძილი, სიჩქარე, აჩქარება, ფორმა, ფერი, კონტრასტი და სხვ.);
- დანიშნულების მიხედვით (ადამიანის მოღვაწეობის ნებისმიერ სფეროში – რობოტოტექნიკიდან – გარემოს დაცვის საშუალებების ჩათვლით).

მანქანათმშენებლობაში, რომელიც ინჟინრებისთვის წარმოადგენს პლაცდარმს ამჟამინდელი და მომავლის ინოვაციური ტექნოლოგიების დანერგვისათვის და გამოყენებისათვის, თანამედროვე სენსორები ხშირად გამოიყენება მიკროპროცესორულ მოწყობილობებთან ერთად, მათგან მიღებული სიგნალების დამუშავებისათვის, მონაცემთა გადაცემის მოწყობილობებთან, როგორც ფიზიკური წრედებით (გამტარიანი



და ოპტიკური კავშირის ხაზი), ასევე რადიოხაზით და თანამედროვე ტელეკომუნიკაციის მობილური ქსელებით.

ამჟამად მსოფლიოში წარმატებით ვითარდება ახალი ინტერნეტის კონცეფცია – საგნების ინტერნეტი (Internet of Things). ამ კონცეფციის თანახმად 2020 წლისათვის მსოფლიოში ამოქმედდება არანაკლებ 7 ტრილიონი სენსორი. ესაა სენსორების შეღწევა ნებისმიერ ნივთში რომელსაც ასე თუ ისე იყენებს ადამიანი. ამიტომ ასეთი დიდი დაინტერესებაა სენსორებისადმი, სენსორულ ტექნოლოგიებისადმი და ტექნოლოგიებისადმი, რომლებიც იყენებენ სენსორებს.

სენსორული ტექნიკის აქტიური გამოყენებისათვის, ცოდნის ამ სფეროში აქტიური, ნიჭიერი ახალგაზრდობის დიდი წრის ჩართვისათვის – 2002 წელს იტალიური ელექტრონიკის პროგრამისტების ჯგუფის მიერ - მასიმო ბანცის ხელმძღვანელობით შემუშავებული იქნა Arduino იდეოლოგია და შემდგომ 2005 წლისათვის შექმნილი იქნა Arduino პირველი სქემა. დღეისათვის, 10 წლის შემდეგ, Arduino პლატფორმა წარმოდგენილია მრავალრიცხოვანი სქემების ოჯახით. ესაა ორიგინალური მოდელი Arduino Uno. სქემა უფრო მძლავრი საშუალებით Arduino Mega, კომპაქტური–Arduino Nano და ქსელური მიერთების მხარდაჭერის სქემა - Arduino Ethernet.

Arduino ესაა ელექტრონული მოწყობილობების პროექტირების ინსტრუმენტი, სქემები რომლებიც ურთიერთქმედებენ გარემომცველ ტექნიკურ საშუალებებთან, როგორც ინფორმაციის მიღებისათვის (სენსორული გადამწოდი), ასევე სხვადასხვა შემსრულებელი მოწყობილობების მართვისათვის.

Arduino პლატფორმის პოპულარულობა მდგომარეობს პროგრამირების ენის მოხერხებულობასა და სიმარტივეში, ასევე ღია არქიტექტურაში პროგრამული კოდით. Arduino სქემა პროგრამირდება კომპიუტერიდან USB-ის საშუალებით სპეციალური პროგრამატორის გარეშე.

## **დ.2. Arduino ვერსიები და მათი გამოყენების შესაძლო სფეროები**

არსებობს Arduino პლატფორმის რამდენიმე ვერსია. ბოლო ვერსია - Arduino Leonardo შექმნილი ATmega32u4 მიკროკონტროლერის ბაზაზე, UNO ვერსია ATmega328 ბაზაზე, უფრო ადრეული ვერსიები - ATmega2560.

Arduino-ს პროგრამირებისათვის გამოიყენება C/C++ ენა, რომელიც მარტივია ათვისებისათვის და ამიტომ წარმოადგენს ყველაზე მოსახერხებელ საშუალებას მიკროკონტროლერის პროგრამირებისათვის.

Arduino სქემის ძირითადი ვერსიები და მათი გამოყენების სფეროები შემდეგია:

- Due – ახალი სქემა ARM მიკროკონტროლერის ბაზაზე - 32bit Cortex-M3 ARM SAM3U4E.
- Leonardo – Arduino პლატფორმის ბოლო ვერსია - ATmega32u4 მიკროკონტროლერის ბაზაზე. განსხვავდება microUSB კონექტორით, რომელიც ზომით ემთხვევა Uno-ს კონექტორს.
- Yun – ახალი სქემა, ჩამენებული WiFi მხარდაჭერით - Atmega32u4 an the Atheros AR9331-ის ბაზაზე.
- Micro – ახალი კომპაქტური გადაწყვეტა ATmega32u4-ის ბაზაზე.
- Uno –Arduino USB-ს საბაზო პლატფორმის ყველაზე პოპულარული ვერსია. Arduino Uno ბევრ რამეში ჰგავს Duemilanove, მაგრამ აქვს ახალი ჩიპი ATmega8u2 USB-ით მიმდევრობით ჩართვისათვის და შესასვლელი/გამოსასვლელის ახალი, უფრო მოხერხებული მარკირება. პლატფორმას შეიძლება დაემატოს გაფართოების სქემები, მაგ. სამომხმარებლო სქემები სხვადასხვა ფუნქციებით.
- Arduino Ethernet – კონტროლერი ქსელთან მუშაობის ჩამენებული მხარდაჭერით და ქსელიდან კვების ოპციური შესაძლებლობით POE (Power over Ethernet) მოდულის საშუალებით.
- Duemilanove – წარმოადგენს Arduino USB საბაზო პლატფორმის ბოლოს წინა ვერსიას. Duemilanove ჩართვა ხდება სტანდარტული USB პორტით. ჩართვის

შემდეგ ის მზადაა გამოყენებისათვის. პლატფორმას შეიძლება დაემატოს გაფართოების სქემები, მაგ. სამომხმარებლო სქემები სხვადასხვა ფუნქციებით.

- Diecimilas – Arduino USB საბაზო პლატფორმის წინა ვერსია.
- Nano – ესაა კომპაქტური პლატფორმა, რომელიც გამოიყენება როგორც მაკეტი. Nano უერთდება კომპიუტერს USB Mini-B პორტის საშუალებით.
- Mega ADK-Mega2560 სქემის ვერსია USB host ინტერფეისით ტელეფონთან კავშირისათვის, Arduino-სთან და სხვა მოწყობილობებთან - USB ინტერფეისით.
- Mega2560 - Mega სერიის სქემის ახალი ვერსია. აგებულია Atmega2560-ის ბაზაზე ATmega8u2 ჩიპის გამოყენებით, USB პორტით თანმიმდევრული შეერთებისათვის.
- Mega – Mega სერიის წინა ვერსია ATmega1280-ის ბაზაზე.
- ArduinoBT – პლატფორმა Bluetooth მოდულით უსადენო კავშირისათვის და პროგრამირებისათვის. თავსებადია Arduino გაფართოების სქემებთან.
- LilyPad – მეწამული ფერის პლატფორმა, შემუშავებულია როგორც გადასატანი მოწყობილობა, შეიძლება ჩაეკეროს ცოცხალ სხეულში.
- Fio – პლატფორმა შემუშავებულია უსადენო გამოყენებისათვის. Fio შეიცავს Xbee კონექტორს რადიოსათვის, LiPo კვების ელემენტებისათვის და ჩაშენებულ სქემას დამუხტვისათვის.
- Mini – ყველაზე პატარა Arduino პლატფორმა. არაჩვეულებრივად მუშაობს როგორც მაკეტური მოდელი ან პროექტებში, სადაც სივრცე წარმოადგენს კრიტიკულ პარამეტრს. პლატფორმა უერთდება კომპიუტერს Mini USB ადაპტერის საშუალებით.
- ადაპტერი Mini USB –სქემა, მაკონვერტირებელი შეერთება USB ხაზში 5B, GND, TX და RX Arduino Mini პლატფორმასთან შეერთებისათვის ან სხვა მიკროკონტროლერებთან.
- Pro – პლატფორმა, შემუშავებულია გამოცდილი მომხმარებლებისათვის, შეიძლება წარმოადგენდეს დიდი პროექტის ნაწილს. ის იაფია, ვიდრე

Diecimila და შეიძლება იკვებებოდეს აკუმულატორის ელემენტიდან, მაგრამ ამავედროულად მოითხოვს დამატებით ნაკრებებს და კომპონენტებს.

- Pro Mini – როგორც პლატფორმა Pro იგი ასევე შემუშავებულია გამოცდილი მომხმარებლებისათვის, რომლებიც მოითხოვენ დაბალ ღირებულებას, მცირე ზომებს და დამატებით ფუნქციონალურობას.
- Serial – საბაზო პლატფორმა RS 232 ინტერფეისით კავშირისათვის და პროგრამირებისათვის. სქემა იოლად აიწყობა დამწყები მომხმარებლის მიერ (მოიცავს CAD სქემებს და ფაილებს).
- Serial Single Sided - პლატფორმა შემუშავებულია ხელით შესრულებისათვის. ის ოდნავ დიდი ზომისაა ვიდრე Diecimila, მაგრამ თავსებადია Arduino გაფართოების სქემებთან.
- USB Serial Light ადაპტერი – იგი საშუალებას იძლევა Arduino სქემის ჩართვისას კომპიუტერთან მონაცემთა გაცვლისათვის და ესკიზის შესავსებად. მოსახერხებელია ისეთი სქემების პროგრამირებისათვის, როგორცაა Arduino Mini, Arduino Ethernet, და სხვა, რომელთაც არ აქვთ თავისი USB შესაერთებელი.

### ***დ.3. Arduino გაფართოების კონტროლერები და სქემები***

Arduino გაფართოების სქემები აგებულია სხვადასხვა მოწყობილობების მართვის ფუნქციონალურობის გაფართოებისათვის. ესენია - სქემები უსადენო ქსელებთან WiFi, ZigBee ქსელებთან (XBee Shield), ინტერნეტთან (Ethernet Shield) კავშირებისათვის და Motor Shield სქემები. ბოლო წარმოადგენს განსაკუთრებით საინტერესოს მანქანათმშენებლობისათვის, ეს სქემა შემუშავებულია სპეციალურად ინდუქციური დატვირთვის მართვისათვის, როგორებიცაა რელე, სოლენოიდი, მუდმივი დენის ძრავები, ბიჯური ძრავები და სხვ. ის საშუალებას იძლევა ერთდროულად იმართოს ორი მუდმივი დენის ძრავის ბრუნვის სიჩქარე და მიმართულება დამოუკიდებლად, განახორციელოს მათი ექსტერნული დამუხრუჭება, აწარმოოს ყოველი ძრავის მიერ მოხმარებული დენის და სხვა პარამეტრების გაზომვა.

დიდი რაოდენობით სენსორების არსებობა, რომლებიც შეიძლება გამოყენებული იქნას მანქანათმშენებლობაში საშუალებას იძლევა რეკომენდაცია გაეწიოს ამა თუ იმ გადამწოდს (სენსორი), რომელიც უფრო მეტად შეეფერება დასმული ამოცანის გადაწყვეტას. ე.ი. არსებობს სენსორების დიდი არჩევანი გამოყენებისათვის. არსებობს Arduino-ს თავსებადი ოჯახი Grove, რომელიც სპეციალურად შემუშავებულია Arduino სქემებთან მუშაობისათვის. მაგ. სენსორი CDOF (MPU650) წარმოადგენს გამზომ მოწყობილობას, რომელიც ზომავს სიჩქარეს, ორიენტაციას და სიმძიმის ძალას აქსელერომეტრით, გიროსკოპით და მაგნიტომეტრით. მრავალრიცხოვანი უკონტაქტო სენსორები, განსხვავდებიან მოქმედების პრინციპით (ულტრაბგერითი, ტევადური, ჰერკონული, მაგნიტორეზისტორული, ჰოლის ეფექტით, ინდუქციური), კარგად მიესადაგებიან ზომის, პოზიციის, მანძილის და სხვ. გაზომვის პროცესს. სისტემებში Arduino-ს გამოყენებით განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა ნაკეთობის ღირებულებას, ე.ი. Arduino ნაკეთობა გათვლილია უპირველეს ყოვლისა მასიურ მომხმარებლებზე. ამიტომ საბოლოო მოწყობილობა (სისტემა, დანადგარი, ხაზი) უნდა იყოს იაფი (დაბალბიუჯეტური), ძვირადღირებულ სისტემა CNC-სთან (Computer-Numerical-Control) შედარებით.

#### ***დ.4. ექსპერიმენტული 3D კონსტრუქცია ლითონისა და ხის დამუშავებისათვის***

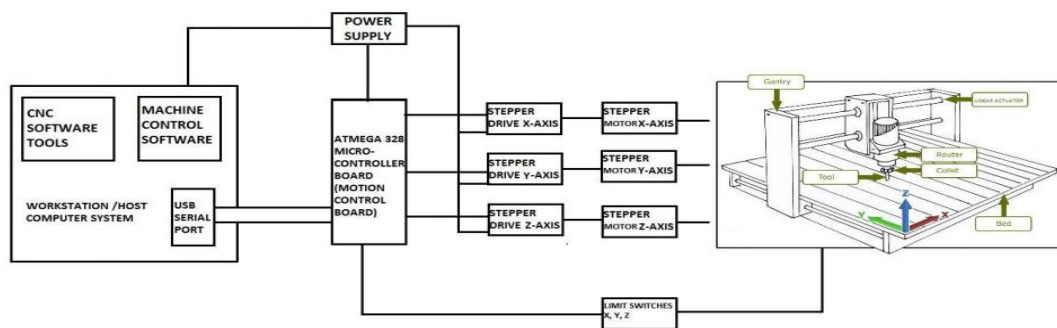
##### ***დ.4.1. ნაკეთობის აღწერა***

ქვემოთ შემოთავაზებულია დაბალბიუჯეტური კომპიუტერულ - ციფრული მმართველი CNC 3D კონსტრუქცია, რომელიც შეიძლება წარმატებით გამოყენებული იქნას ლითონის დამუშავების სისტემებში (ცივი და ლაზერული ჭრა), საფრეზი-გრავირების მანქანების მართვისათვის, 3D პრინტერებში და სხვა.

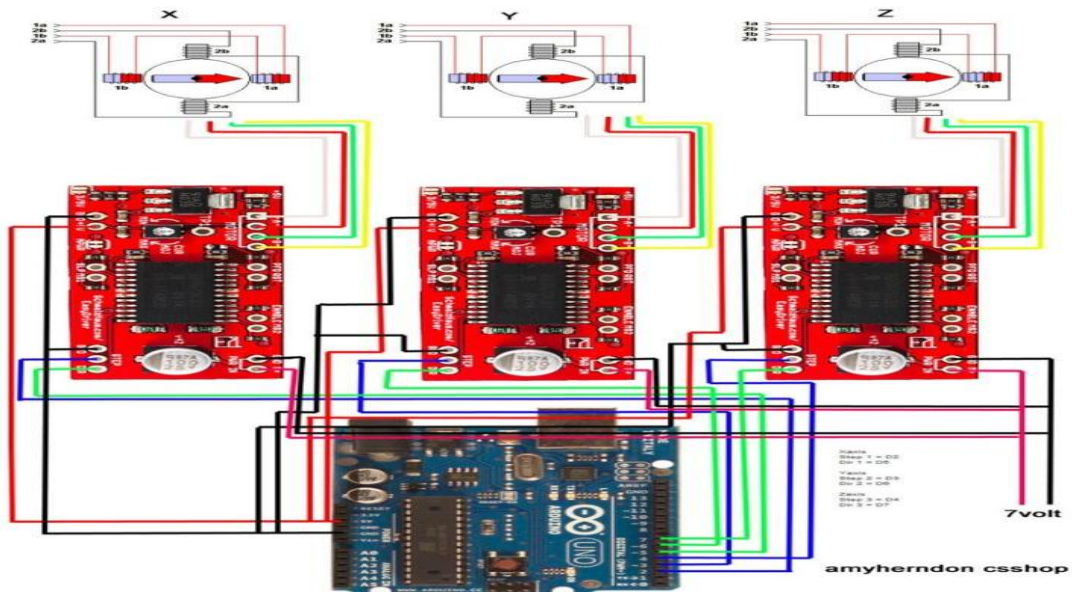
შემუშავებული კონსტრუქცია შედგება 4 ძირითადი კვანძისაგან – შასისაგან, მექანიკური გადაადგილებადი მჭრელი ინსტრუმენტისაგან (შემსრულებელი მექანიზმი), Arduino კონტროლერისაგან, კომპიუტერიდან პროგრამული უზრუნველყოფისაგან და მიკროკონტროლერის შემსრულებელ მექანიზმთან შეთანხმების ბლოკისაგან (შილდ ბლოკი) (ნახ.დ.1). შემსრულებელი ორგანო იყენებს სამ

მართულ ბიჯურ ძრავს მჭრელი ინსტრუმენტის გადასადგილებლად სამ სიბრტყეში (X,Y,Z). მმართველი Arduino-ს სახით გამოიყენება Arduino Uno სქემები (ATmega328 კონტროლერი). Arduino Uno სქემა X,Y,Z ბიჯურ ძრავებს უერთდება სქემით (ნახ.დ.2.), მართვის შილდების 4PCSA4988 საშუალებით.

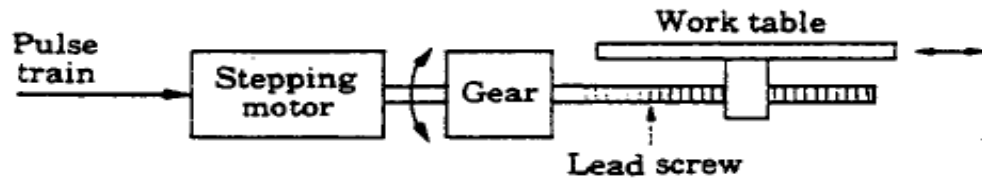
ბიჯური ძრავი ყოველი მმართველი იმპულსით აბრუნებს როტორს (1÷5) გრადუსით და ასევე შესაბამისად გადაადგილებს მჭრელი ინსტრუმენტის მდგომარეობას. გადაადგილების მართვა კონტროლირდება როგორც ღია მარყუქით (ნახ.დ.3), ასევე უკუკავშირის მარყუქით (ნახ.დ.4).



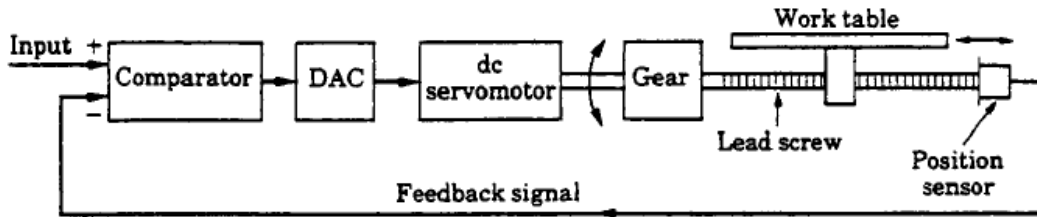
ნახ.დ.1. 3D ინსტრუმენტის მართვის სქემა



ნახ.დ.2. ბიჯური ძრავების ჩართვის სქემა მიკროკონტროლერთან X,Y,Z



ნახ.დ.3. მმართველი სისტემა ღია მარყუჭით



ნახ.დ.4. მმართველი სისტემა უკუკავშირის მარყუჭით

#### დ.4.2. შემუშავებული კონსტრუქციის სიზუსტის მახასიათებლები

მართველი იმპულსების  $N$  რიცხვისას ბიჯური ძრავის ღერძის ერთი შემობრუნებისათვის, შემობრუნების კუთხე ერთი მმართველი იმპულსით  $\alpha=360/N$ , ხოლო  $n$  ასეთი იმპულსების აბრუნებს ღერძს,  $A=n \cdot 360/N$  გრადუსით. თუ გადაცემის რიცხვი ბიჯური ძრავის ღერძიდან გადაადგილების ხრახნისკენ 1:1-ზეა, მაშინ ინსტრუმენტის გადაადგილება მაგ.  $X$  ღერძის გასწვრივ  $n$  მმართველი იმპულსით ტოლი იქნება  $X=p(n/N)$ . ( $p$ -გადაადგილების ხრახნის გადაადგილებაა ბიჯური ძრავის ღერძის ერთი შემობრუნებით).

შემსრულებელი მექანიზმის მახასიათებლების გაერთიანება და მართვა განსაზღვრავს ინსტრუმენტის პოზიციონირების სიზუსტეს. ასეთს წარმოადგენს – გარჩევისუნარიანობა, სიზუსტე და განმეორებადობა. გადაადგილების მანძილის ერთეულის საფუძველს წარმოადგენს BLU (Basic Length Unit), რომელიც რიცხობრივად ტოლია გადაადგილების სიდიდისა ერთი მმართველი იმპულსით. ის წარმოადგენს გარჩევისუნარიანობას.

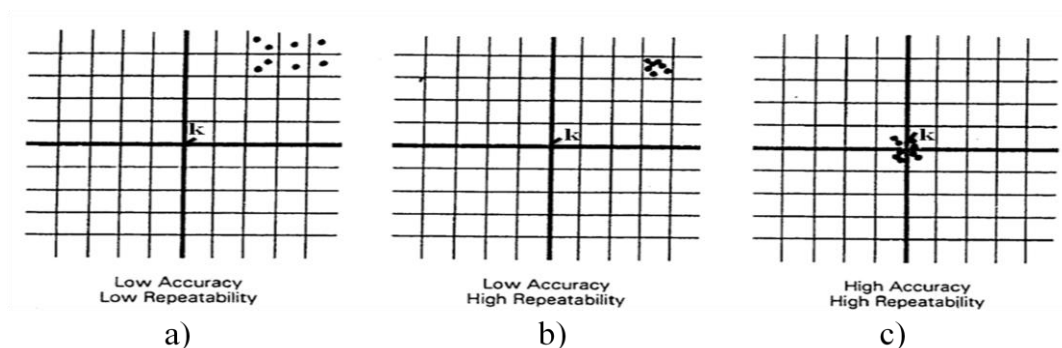
პოზიციონირების სიზუსტე დამოკიდებულია როგორც BLU-ზე, ასევე შემსრულებელი მექანიზმის ცდომილებაზე.

$$\text{სიზუსტე} = 1/2 \text{ გარჩევისუნარიანობა} + \text{მექანიზმის ცდომილება} = \text{BLU}$$

განმეორებადობა – ეს სტატისტიკური ტერმინია, რომელიც ასოცირდება სიზუსტესთან. თუ ჩავთვლით, რომ ინსტრუმენტი უნდა მდებარეობდეს საკონტროლო წერტილში  $k$ , ხოლო ის რამდენიმე მცდელობის შემდეგ იკავებს სხვა პოზიციას (ნახ.დ.5a), ეს შეესაბამება დაბალ სიზუსტეს და დაბალ განმეორებადობას. შესაბამისად ნახ.დ.5b და 5c ნაჩვენებია დაბალი სიზუსტის და მაღალი განმეორებადობის და მაღალი სიზუსტის და მაღალი განმეორებადობის შემთხვევები.

სასურველია მექანიზმის მდგომარეობა შეესაბამებოდეს ნახ.დ.5c-ზე ნაჩვენებ პოზიციებს.

Arduino სქემების, შილდ-სქემების და სხვა დამხმარე ელექტრონული კომპონენტების ღირებულება ერთეულიდან ათეულ \$ USD-მდეა. ამიტომ, 3D მოწყობილობების მმართველი ნაწილის ღირებულება ნაკლებია ტრადიციულ ანალოგურ მმართველ CNC მოწყობილობებთან შედარებით. რაც შეეხება პროგრამულ უზრუნველყოფას იგი სპეციალური პროგრამატორის გამოყენებას არ საჭიროებს (როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული), გამოიყენება პროგრამირების C++ ენა, რაც პროცესს ხდის მარტივს და აშკარაა, რომ ეს ყველაფერი ადასტურებს Arduino გადაწყვეტის გამოყენების ეკონომიურ ეფექტურობას 3D სისტემებში [33].



ნახ.დ.5. განსხვავება სიზუსტესა და განმეორებადობას შორის

### დასკვნა

Arduino-ს ფართო გავრცელება, Arduino კონტროლერის პროგრამირების სიმარტივე, როგორც Arduino სქემის, ასევე თანმხლები ელექტრონული კომპონენტების განსაკუთრებით დაბალი ღირებულება, შესაძლებლობას იძლევა თანამედროვე



მანქანათმშენებლობაში ძვირადღირებული კონტროლერების (CNC) ნაცვლად გამოყენებული იქნას Arduino დაბალბიუჯეტური მოწყობილობები.

ასეთი ჩანაცვლების მაგალითად შეიძლება გამოყენებული იქნას მოცემულ ნაშრომში შემუშავებული და აღწერილი 3D კონსტრუქცია, რომელიც შეიძლება წარმატებით იქნას გამოყენებული ლითონის და ხის 3D დამუშავების ინდუსტრიაში, 3D პრინტერებში და მექანიზმებში სადაც მოითხოვება მდორე გადაადგილებები X-Y-Z მიმართულებებით.

## გამოყენებული ლიტერატურის ნუსხა

1. Кучерявый А.Е. Интернет Вещей. Электросвязь.№1. 2012.
2. Кучерявый А.Е Самоорганизующиеся сети. Электросвязь.№1. 2009.
3. ს.მახარაძე, ჯ.ბერიძე, „პერსპექტიული და თანამედროვე სენსორული ქსელები“ („მდგრადი ენერჯეტიკა: გამოწვევები და განვითარების პერსპექტივები“ (ენერგოეფექტურობის ცენტრი საქართველო, ვინროკ ინტერნეიშენალ ჯორჯია, აშშ-ის საერთაშორისო განვითარების სააგენტო (USAID), აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, 18.06.2015, ქუთაისი),167-172გვ.
4. Кучерявый А.Е. Интернет Вещей. Электросвязь.№1. 2013.
5. Тихвинский В.О. Партнерский проект M2M. Электросвязь.№11. 2012.
6. Гольдштейн Б.С., Кучерявый А.Е. Сети связи пост-NGN.СПб.ВХВ-Петербург. 2013.
7. ს. მახარაძე, ჯ.ბერიძე, „უსადენო ნანოქსელების განვითარების პერსპექტივები“ („ენერჯეტიკა: რეგიონალური პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები“ (ენერჯეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის დეპარტამენტი, საინჟინრო ფაკულტეტი, აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, 23-25 ოქტომბერი 2015, ქუთაისი), 142-147გვ.
8. Кучерявый А.Е.,Цуприков А.Л. Сети связи следующего поколения. ФГУП ЦНИИС.2006.
9. Кучерявый А.Е., Парамонов А.И. Сети связи общего пользования. Тенденции развития и методы расчета. ФГУП ЦНИИС. 2008.
10. Кучерявый А.Е., Прокопьев А.В., Кучерявый Е.А., Самоорганизующиеся сети. СПб..Изд-во «Любавич», 2011.
11. Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Юрчук А.Б., Сети мобильной связи :технологии и архитектура. М.: Эко-Трендз. 2010.
12. Кучерявый А.Е., Аль-Кадами Н.А., .Покрытие, связность и плотность в двумерных и трехмерных беспроводных сенсорных сетях, Электросвязь. №9, 2015.
13. Noymann C., Chen W., Montojo H. et al. Relaying Operation in 3GPP LTE: /Challenges and Solutions. IEEE Communucations Magazine. Vol.50, №2, 2012 February.
14. Kafle V.P., Fukushima Y., Harai H. Dynamic Mobile Sensor Network Platform fom ID-based Communication/Proceedings. ITU-T Kaleidoscope-2014. 3-5 June.
15. Разумов А.А., Киричек Р.В., Исследование устойчивости фрагмента летающей сенсорной сети к воздействию сверхкоротких электромагнитных импульсов, Электросвязь. №9, 2015.

16. Данилин С.В., Метод повышения помехоустойчивости в сети ZigBee в условиях преднамеренных электромагнитных воздействий, Дис.канд.тех.наук-СПб., 2013.
17. Кучерявый А.Е., Владыко А.Г., Киричек Р.В., Теоретические и практические направления исследований в области летающих сенсорных сетей, Электросвязь. №7, 2015.
18. ს.მახარაძე, ჯ.ბერიძე, „იმპულსური ხელშეშლების გავლენის ანალიზი მფრინავ სენსორულ ქსელებში“, <<საქართველოს საინჟინრო სიახლენი>> №1/2016, 46-50 გვ.
19. Яновский Г.Г. IP Multitmdia subsystem: принципы, стандарты и архитектура. Вестник связи, №3, 2006.
20. ჯ.ბერიძე, ს.მახარაძე, „სენსორული ქსელის და სენსორების არქიტექტურა“, (საერთაშორისო კონფერენციის კრებული, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ფიზიკის დეპარტამენტი, NATO-ს სამეცნიერო კომიტეტის მხარდაჭერით 6-9 მარტი, 2014, თბილისი,136-138გვ.
21. Молчанов Д.А., Самоорганизующиеся сети и проблемы их построения. Электросвязь. №6, 2006.
22. Akkaya K., Younis M., A survey on routing protocol for wireless sensor networks. Ad Hoc Networks, vol.3, no.3, 2005.
23. Al-Karaki J.N., Kamal A.E. Routing techniques in wireless sensor networks: A survey. IEEE Wireless Communications Magazine, Vol. 11, no.6, 2004.
24. Arboleda L.M., Nasser N. Comparison of Clustering Algorithms and Protocol for Wireless Sensor Networks, IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), Ottawa, May 2006.
25. Chen., Wu C.S., Y.S., Cheng C.C., Tsai L.K., Energy residue aware (ERA) clustering algorithm for leach-based wireless sensor networks, 2<sup>nd</sup> Int. Conf. Systems and Networks Communications (ICSNC), Proceedings, Cap Esterel, French Riviera, France, Aug. 2007.
26. Chatterjee M. et al. WCA.:A Weighted Clustering Algorithm for Mobile Ad Hoc Networks. Journal of Cluster Computing, V.5/2, April, 2002.
27. Абакумов П.А., Кучерявый А.Е., Алгоритм кластеризации для мобильных Беспроводных сенсорных сетей в трехмерном пространстве, Электросвязь. №9, 2015.
28. Huang C., Tseng Y., The Coverage Problem in a Wireless Sensor Network. Mobile Networks and Applications, vol.10, no.4, aug.2005.
29. Ефремов В., Маркман Г.З., Энергосбережение и энергоэффективность: уточнение понятий, система сбалансированных показателей энергоэффективности. Известия Томского политехнического университета. Т.311, №4. 2007.

30. ს. მახარაძე, ჯ.ბერიძე, „უსადენო სენსორული ქსელის სიცოცხლის დროის მაქსიმიზაცია“, <<ინტელექტუალი>>, №31/2016, 183-188გვ.
31. Chen Y., Zhao Q. On the lifetime of wireless sensor networks // Communications Letters, IEEE. Nov. Vol. 9, no.11.2007.
32. <https://www.arduino.cc/> გადამოწმებული 25.03.2016.
33. 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), 23-26გვ.