

კვანტური კომპიუტერები და მათი გამოყენების პერსპექტივები ავიაციაში

დემურ ვეფხვაძე

საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი
ქეთევან დედოფლის გამზირი 16, 0103, თბილისი, საქართველო

ანოტაცია

დღეს კვანტური კომპიუტერების თემა წარმოადგენს ერთ - ერთ ყველაზე უფრო პერსპექტიულ და აქტუალურ თემას თანამედროვე მეცნიერებასა და ტექნოლოგიებში. კვანტური კომპიუტერები იმედს იძლევიან მოახდინონ გარღვევები მთელ რიგ ისეთ სფეროებში, როგორცაა ხელოვნური ინტელექტი, მართვის სისტემები, კრიპტოგრაფია, ბიოლოგია, მედიცინა, ფინანსები, ქიმია და რა თქმა უნდა ავიაცია. ისინი შეძლებენ გადაწყვიტონ ისეთი რთული ამოცანები (რთული სისტემების ოპტიმიზირება, მოლეკულების და ატომების ქცევის სიმულაცია, ახალი მასალების დამუშავება, დაცული მონაცემების გაშიფვრა, თანამედროვე საფრენი აპარატების მართვა და კონტროლი რთულ გარემოში და ექსტრემალურ სიტუაციებში და ა.შ.), რომელთა გადაწყვეტა შეუძლებელი ან ძნელად გადასაწყვეტია კლასიკურ კომპიუტერებზე. კვანტური კომპიუტერები საჭიროა დიდ მონაცემებთან მუშაობისთვის, რადგან ეს მონაცემები მოითხოვს უამრავი ვარიანტების გადარჩევას, რაც შეუძლია მხოლოდ კვანტურ კომპიუტერებს.

ნაშრომში განხილულია კვანტური კომპიუტერების აგების ძირითადი პრინციპები, მათი საბაზისო ინფორმაციული ერთეულის კუბიტის დანიშნულება, დახასიათება და ძირითადი ტიპები. მოყვანილია კვანტური კომპიუტერის პრინციპული სქემა და მუშაობის პრინციპი. განხილულია კვანტური გამოთვლების ძირითადი ალგორითმები. მოცემულია კვანტური კომპიუტერების კლასიკურ კომპიუტერებთან შედარებითი დახასიათება და ნაჩვენებია კვანტური კომპიუტერების უპირატესობა მათთან შედარებით. შემოთავაზებულია ავიაციაში კვანტური კომპიუტერების გამოყენების შემთხვევაში მთელი რიგი ფართო სპექტრის რთული საავიაციო ამოცანების (ოპტიმიზაციის ამოცანები, რთული სისტემების მოდელირება და ანალიზი, ახალი საავიაციო მასალების დამუშავება, საჰაერო მოძრაობის მართვა და სხვ.) ოპტიმალური გადაწყვეტის შესაძლებლობები, პრინციპები და შესაძლო შედეგები.

საკვანძო სიტყვები: კვანტური კომპიუტერი, კუბიტი, სუპერპოზიცია, კოჰერენტულობა, კვანტური ალგორითმი, საჰაერო მოძრაობის მართვა.

შესავალი

კვანტური კომპიუტერების შექმნის დასაწყისს საფუძველი ჩაუყარა ორმა მნიშვნელოვანმა აღმოჩენამ, რომელთა ავტორები შემდეგ გახდნენ ნობელის პრემიის ლაურეატები. 1918 წელს გერმანელმა ფიზიკოსმა მაქს პლანკმა აღმოაჩინა კვანტი, ხოლო 1921 წელს ალბერტ აინშტაინმა ფოტონი. კვანტური კომპიუტერების შექმნის იდეა ჩაისახა 1980 - იან წლებში, როცა დამტკიცებულ იქნა კვანტური თეორიის ჭეშმარიტება.

1980 წელს ამერიკელი ფიზიკოსის პოლ ბენიოფის მიერ შემოთავაზებულ იქნა ტურინგის მანქანის კვანტური მექანიკური მოდელი და აღწერა ასეთი კომპიუტერის აგების თეორიული საფუძვლები. იმავე წელს კვანტური გამოთვლის იდეა გამოთქვა ასევე რუსმა მათემატიკოსმა იური მანინმა. კვანტური კომპიუტერის ერთ-ერთი პირველი მოდელი შემოთავაზებულ იქნა ამერიკელი ფიზიკოსის რიჩარდ ფეინმანის მიერ 1981 წელს. 1983 წელს კი კვანტური კომპიუტერის აგების კონცეფცია ჩამოაყალიბა სტივენ ვისნერმა. 1998 წლიდან კვანტური კომპიუტერების აგებისათვის გადაიდგა პირველი პრაქტიკული ნაბიჯები.

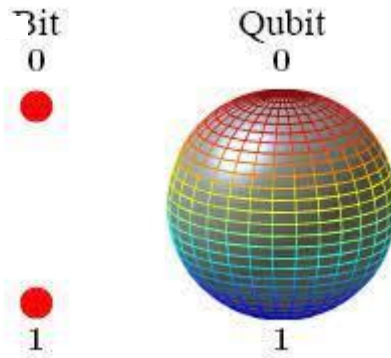
მომავალში კომპიუტერულ სფეროში სილიციუმის მიკროელექტრონიკის ერა დასრულდება და ელექტრონულ კომპიუტერებს ჩაანაცვლებს კვანტური კომპიუტერები, რომლებიც კვანტური ალგორითმების შესრულების გზით მუშაობისას გამოიყენებს კვანტურ-მექანიკურ ეფექტებს. ისინი თანამედროვე კომპიუტერებთან შედარებით გაცილებით სწრაფი, კომპაქტური იქნება და შეეძლება რთული ამოცანების გადაწყვეტა გაცილებით უფრო სწრაფად, ვიდრე ტრადიციულ კლასიკურ კომპიუტერებს. კვანტური გამოთვლები ჯერ კიდევ საწყის სტადიაშია, თუმცა მიმდინარეობს ფართო მასშტაბიანი, მიზანმიმართული, პერმანენტული პრაქტიკული და თეორიული კვლევები კვანტური კომპიუტერების დამუშავებაში მათი გამოყენებისათვის.

ძირითადი ნაწილი

კვანტური კომპიუტერები ტრადიციული კომპიუტერებისგან იმით განსხვავდება, რომ ჩიპების ნაცვლად იყენებენ ელექტრონებსა და ატომებს ინფორმაციის შესანახად კუბიტების საშუალებით (ტერმინი „კუბიტი“ დაამკვიდრა ფიზიკოსმა სტივენ ვისნერმა). მათ შეუძლიათ ერთდროულად მოიხელთონ ინფორმაციის მილიარდობით ნაწილი და ამით გვერდი აუარონ ტრადიციული კომპიუტერების ნაკლს, რაც გამოწვეულია მათ მიერ ინფორმაციის მხოლოდ თითო ნაწილის თანმიმდევრულად დამუშავების შესაძლებლობით [1,6,10].

კვანტური ინფორმაციის თეორიაში კუბიტი წარმოადგენს კვანტური ინფორმაციის ერთეულს, რომელიც გამოიყენება კვანტური გამოთვლებისათვის და კლასიკური ბიტის (ნახ.1 ა) კვანტური ანალოგია [6]. მას ისე როგორც ბიტს გააჩნია ორი მდგომარეობა 0 და 1, მაგრამ ამასთან ერთად შეუძლია იმყოფებოდეს სუპერპოზიციაში, რაც იმას ნიშნავს, რომ შეუძლია მიიღოს ერთდროულად ორივე მნიშვნელობა (კვანტურ მექანიკაში სუპერპოზიცია ეწოდება ეფექტს, როდესაც მატერიალური წერტილი იმყოფება ბევრ სხვადასხვა მდგომარეობაში). სუფთა

მდგომარეობების (კუბიტები ასეთ შემთხვევაში არ არიან სხვა კუბიტებთან გადახლართული) წარმოდგენა შესაძლებელია ბლოხის სფეროზე (სფეროს სახელწოდება ადებულია შვეიცარიელი ფიზიკოსის ფელიქს ბლოხის საპატივსაცემოდ) უსასრულო რაოდენობის წერტილების სახით (ნახ.1 ბ). მისი ჩრდილოეთ და სამხრეთ პოლუსები არის 0 და 1, ხოლო ყველა სხვა წერტილი არის შუალედური მნიშვნელობები. სფეროს ზედაპირზე წერტილები შეესაბამება კვანტური სისტემის სუფთა მდგომარეობებს, სფეროს შიგნითა წერტილები კი შერეულ მდგომარეობებს (ნახ.2).



ა) მნიშვნელობა 1 ან 0 ბ) $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$
ნახ. 1 ბლოხის სფერო



ნახ.2 სუფთა და შერეული მდგომარეობების ამსახველი წერტილები სფეროზე

კვანტური გადახლართულობა, რომელიც კუბიტებს შორის უნიკალურ კორელაციას განაპირობებს, კვანტური გამოთვლების საფუძველია. სუპერპოზიციაში მყოფი კუბიტი, გაზომვისას კოლაფსირებს ორი დეტერმინირებული მდგომარეობიდან (0 ან 1)-დან ერთში. 0 ან 1 მდგომარეობათა ალბათობა განისაზღვრება კუბიტის სუპერპოზიციით. თუ კუბიტი იმყოფება თანაბარ (ტოლ) სუპერპოზიციაში, მაშინ ის იმყოფება ნახევრად 0 მდგომარეობაში და ნახევრად 1 მდგომარეობაში. მთელი სფერო მთლიანობაში იქნება სწორედ კუბიტის სუპერპოზიცია. კუბიტს, პრინციპში, არ შეიძლება ჰქონდეს კონკრეტული მნიშვნელობა - რადგან ის ჩნდება მხოლოდ გაზომვის მომენტში.

ორ მდგომარეობას, რომელთა მიმართაც კუბიტი შეიძლება გაიზომოს, საბაზისო მდგომარეობებს უწოდებენ. ისე როგორც ნებისმიერი სახის კვანტური მდგომარეობის წარმოდგენა, ამ მდგომარეობების წარმოდგენაც ბრიტანელი ფიზიკოს-თეორეტიკოსის პოლ დირაკის მიერ შემოტანილი „ბრა-კეტ“ აღნიშვნით ხდება. შესაბამისად, პირველ მათგანი აღინიშნება როგორც $|0\rangle$ და მეორე როგორც $|1\rangle$.

თითოეული მდგომარეობა დაკვირვებისას რეალიზდება კონკრეტულ ბინარულ მნიშვნელობაში - 0 ან 1. ჩაწერა $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, ნიშნავს, რომ კუბიტის მდგომარეობა შეიძლება ჩაიწეროს როგორც $|0\rangle$ და $|1\rangle$ მდგომარეობების წრფივი კომბინაცია (ნახ.1ბ), სადაც α და β შესაბამის მდგომარეობაში ყოფნის ამპლიტუდებია და ზოგადად შეიძლება კომპლექსური რიცხვები იყოს. კუბიტს მოცემულ მდგომარეობაში შეუძლია მიიღოს მნიშვნელობა 0 ალბათობით α^2 და მნიშვნელობა 1 ალბათობით β^2 . აქედან ბუნებრივია გამოდის შეზღუდვა, რომელიც ედება კუბიტის შესაძლო მნიშვნელობებს, კერძოდ, რადგან ამპლიტუდების კვადრატები ალბათობების ტოლფასია, ამიტომ α და β უნდა აკმაყოფილებდნენ შემდეგ ტოლობას

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$

კუბიტების მკვეთრად გამოხატულ განსხვავებას ბიტებთან მიმართებაში წარმოადგენს სუპერპოზიციური მდგომარეობების არა უწყვეტი ბუნება, არამედ კვანტური ჩახლართულობის მდგომარეობების შესაძლებლობა კუბიტების სისტემაში.

კუბიტების ჯგუფზე ერთი ოპერაცია გამოითვლება მაშინვე ყველა მის შესაძლო მნიშვნელობებზე, რაც უზრუნველყოფს სწორედ გამოთვლების უპრეცედენტო პარალელიზმს. რამდენიმე ათასი კუბიტისგან აგებულ კვანტურ კომპიუტერს შეუძლია გამოთვლების შესრულება თანამედროვე სუპერკომპიუტერებისთვის მიუწვდომელი სიჩქარით.

არსებობს რამდენიმე ძირითადი პარამეტრი, რომლებიც ახასიათებენ კვანტურ კომპიუტერებს:

- კუბიტების რიცხვი - განსაზღვრავს კვანტური მდგომარეობის ზომას და ინფორმაციის რაოდენობას, რომლებიც შეიძლება შენახულ იქნეს და დამუშავდეს კვანტურ კომპიუტერზე. რაც უფრო დიდია კუბიტების რაოდენობა, მით უფრო მეტია რთული ამოცანების გადაწყვეტის შესაძლებლობა;
- კოჰერენტულობის დრო - განსაზღვრავს დროს, რომლის განმავლობაშიც კუბიტი ინარჩუნებს თავის მდგომარეობას ინფორმაციის დაკარგვის გარეშე გარე ფაქტორების ზემოქმედებისას. რაც უფრო ხანგრძლივია კოჰერენტული დრო, მით უფრო საიმედოდ მუშაობს კვანტური კომპიუტერი;

- ოპერაციის სიჩქარე - განსაზღვრავს დროს, რომელიც აუცილებელია ერთი ელემენტარული ოპერაციის შესასრულებლად ერთი ან რამდენიმე კუბიტის მიერ. რაც უფრო მაღალია ოპერაციის სიჩქარე, მით უფრო სწრაფად მუშაობს კვანტური კომპიუტერი;
- ოპერაციის სიზუსტე - განსაზღვრავს შეცდომის ალბათობას ერთი ელემენტარული ოპერაციის შესრულებისას ერთ ან რამდენიმე კუბიტზე. რაც დაბალია ოპერაციის სიზუსტე, მით უფრო მეტია ხმაური და მეტი დამახინჯება შეიტანება გამოთვლებში;
- მასშტაბურობა - განსაზღვრავს კვანტურ კომპიუტერში კუბიტების რიცხვის და მათ შორის კავშირების გაზრდას. რაც უფრო მაღალია მასშტაბურობა, მით უფრო დიდია კვანტური კომპიუტერის განვითარების და შესაძლებლობის პოტენციალი.

ტექნოლოგიის განვითარების თანამედროვე დონე საშუალებას იძლევა შეიქმნას კუბიტების რამდენიმე ძირითადი ტიპი, რომლებიც გამოიყენება კვანტური კომპიუტერების შესაქმნელად: ზეგამტარი კუბიტები, იონური კუბიტები, ფოტონური კუბიტები, სპინური კუბიტები.

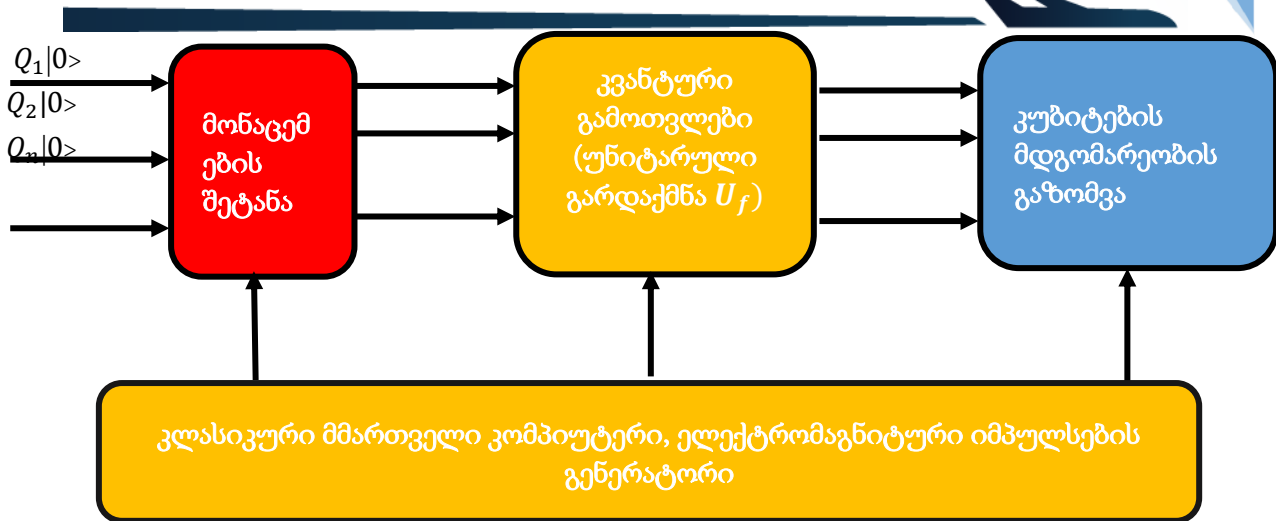
ზეგამტარი კუბიტები დაფუძნებულია ზეგამტარი მასალებისგან დამზადებულ ელექტრულ წრედებზე, რომლებსაც აქვთ ორი დისკრეტული ენერგეტიკული დონე. ზეგამტარ კუბიტებს აქვთ ოპერაციების მაღალი სიჩქარე და მასშტაბურობა, მაგრამ დაბალი კოჰერენტული დრო და ოპერაციების სიზუსტე. სუპერგამტარ კუბიტებს იყენებენ IBM, Google, Intel და Rigetti - ის კომპანიები კვანტურ კომპიუტერებში.

იონური კუბიტები დაფუძნებულია დამუხტულ ატომებზე (იონებზე), რომლებიც ელექტრული ან მაგნიტური ველით დაჭერილი არიან ხაფანგში. იონურ კუბიტებს აქვთ მაღალი კოჰერენტული დრო და ოპერაციის სიზუსტე, მაგრამ ოპერაციის დაბალი სიჩქარე და მასშტაბურობა. იონური კუბიტები გამოიყენება IonQ და Alpine Quantum Technologies კომპანიების კვანტურ კომპიუტერებში.

ფოტონური კუბიტები დაფუძნებულია სინათლის ნაწილაკებზე (ფოტონებზე), რომლებიც შეიძლება კოდირებული იყოს პოლარიზაციით ან სიხშირით. ფოტონურ კუბიტებს აქვთ მაღალი კოჰერენტული დრო და ოპერაციების სიჩქარე, მაგრამ ოპერაციების დაბალი სიზუსტე და მასშტაბურობა. ფოტონური კუბიტები გამოიყენება Xanadu და PsiQuantum კვანტურ კომპიუტერებში.

სპინური კუბიტები ეფუძნება ელექტრონის ან ატომის ბირთვის სპინს, რომელიც შეიძლება იყოს ორიენტირებული ზევით ან ქვევით. სპინურ კუბიტებს აქვთ საშუალო კოჰერენტული დრო და ოპერაციის სიზუსტე, მაგრამ მაღალი მასშტაბურობა. სპინური კუბიტები გამოიყენება Spinl QuTech-ის კვანტურ კომპიუტერებში.

კვანტური კომპიუტერის პრინციპული სქემა მოცემულია ნახ.3 - ზე [2,3,4].

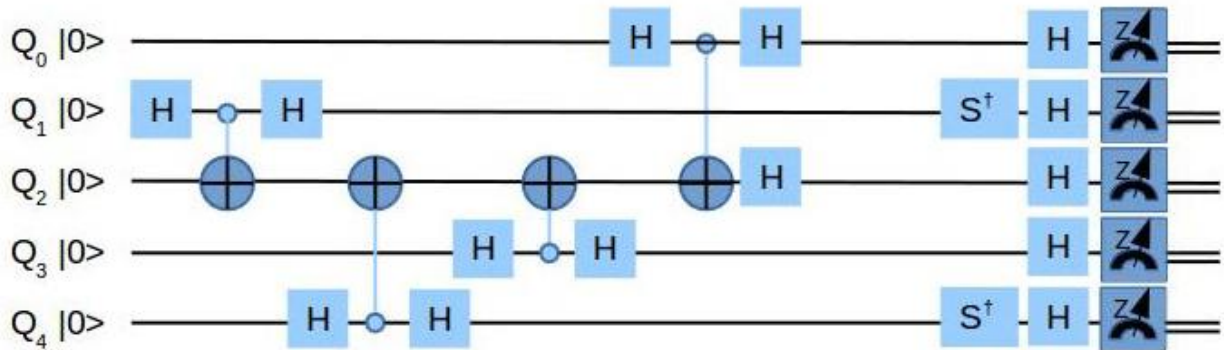


ნახ.3 კვანტური კომპიუტერის პრინციპული სქემა

კომპიუტერის კვანტური ნაწილი შედგება n კუბიტებისგან, რომლებზეც ოპერაციების ჩატარებისთვის უნდა განხორციელდეს სელექციური ზემოქმედება რეზონანსული გარე ცვლადი ველის იმპულსებით. ველების გენერატორების ჩართვა და მოცემულ კუბიტზე მათი გამოსხივების დამისამართება ხორციელდება ჩვეულებრივი (კლასიკური) კომპიუტერის U_f მართვის შედეგად (ნახ.3). კვანტური კომპიუტერი რეალიზებული n კუბიტური რეგისტრებით წარმოადგენს კვანტურ პროცესორს (კლასიკური პროცესორის ანალოგიურს) და იმართება ჩვეულებრივი კომპიუტერის სიგნალებით. n კუბიტიან რეგისტრში ორი კუბიტის დაკავშირება არ არის პრობლემა, ბევრი კუბიტის დაკავშირება კი უკვე პრობლემაა. ამჟამად შესაძლებელია ერთი კუბიტი დაუკავშირდეს მაქსიმუმ ექვს მეზობელს. ამიტომ აუცილებელია კომპლექსური კავშირის სქემების აგება მულტიკუბიტური პროცესორების მისაღებად. გარდა ამისა, იდეალური კვანტური კომპიუტერის სქემაში შედის კუბიტების გაზომვის სისტემა, რომელიც კითხულობს შედეგებს და კრავს კვანტური კომპიუტერით მართვის კონტურს [5].

მისი მუშაობა, ისე როგორც ჩვეულებრივი კლასიკური კომპიუტერისა იწყება ინიციალიზაციის მდგომარეობით, რაც იმას ნიშნავს, რომ მანამ, სანამ დაიწყება გამოთვლითი პროცესი კვანტურ კომპიუტერზე, ყველა n კუბიტი მოყვანილ უნდა იქნეს $|0\rangle$ მდგომარეობაში ($Q_1|0\rangle, Q_2|0\rangle, \dots, Q_n|0\rangle$). ამასთან, მისი კუბიტების მდგომარეობა მიიღწევა ზედაბალ ტემპერატურამდე გაცივებით ან ამ მდგომარეობის მართვის გზით. ინფორმაცია შესასვლელ კვანტურ რეგისტრში იმპულსური ზემოქმედების შედეგად გარდაიქმნება ბაზისური მდგომარეობების კოჰერენტულ სუპერპოზიციაში. ამის შემდეგ ამ ინფორმაციას ამუშავებს კვანტური პროცესორი ამოცანის გადაწყვეტის ალგორითმის შესაბამისად. კვანტური გამოთვლის ალგორითმი რელიზაციის შედეგად იძლევა ინფორმაციას, რომლის მიღება შესაძლებელია კუბიტების მდგომარეობების კვანტური გაზომვის გზით (ნახ.4), რითაც დაფიქსირებული იქნება გამოთვლის შედეგი, რაც იმას ნიშნავს, რომ განისაზღვრება კუბიტების კვანტურ მდგომარეობებში ყოფნის ალბათობა [7].

კვანტურ კომპიუტერზე რეალიზებული კვანტური გამოთვლის მოდელი წარმოადგენს ალბათურ ანალოგურ - ციფრულს. ანალოგური ნაწილი წარმოადგენს კვანტურ გარემოს, რომელშიც კვანტური პროცესორი ასრულებს უნიტარულ გარდაქმნებს და ზომავს კუბიტების მდგომარეობას. ციფრული ნაწილი კი კლასიკური მმართველი კომპიუტერია რომელზეც მომხმარებელი იღებს გამოთვლის შედეგს.



ნახ.4 კუბიტების მდგომარეობების კვანტური გაზომვა

ერთკუბიტური ოპერაციები აღწერს ცალკეული კუბიტის მდგომარეობას, ხოლო ორკუბიტური ოპერაციები კვანტურ ალგორითმში აღწერს ერთი საკონტროლებელი კუბიტის ურთიერთკავშირს მეორე მაკონტროლებელ კუბიტთან. შესაძლებელია მრავალკუბიტური ოპერაციები, რომლებიც შეადგენს კვანტურ რეგისტრს. კუბიტების კავშირი მოითხოვს მათ შორის ფიზიკურ ურთიერთქმედებას. ამ კავშირს ახორციელებს კვანტური გეიტები (ნებისმიერი ლოგიკური ოპერაცია კუბიტებთან იწოდება კვანტურ გეიტად), რომლებსაც კუბიტები გადაჰყავს ერთი მდგომარეობიდან მეორეში, რაც იმას ნიშნავს, რომ მუშაობს სუპერპოზიციით. ისე როგორც კლასიკურ ლოგიკურ ბაზისში, გეიტის მოქმედება კუბიტებზე აღიწერება ჭეშმარიტების ცხრილით, რომელიც ასახავს საბაზისო მდგომარეობების ცვლილებას.

კვანტური რეგისტრის მდგომარეობის ვექტორი $|\Phi\rangle$ შემდგარი n კუბიტებისგან შეიძლება დაიშალოს საბაზისო მდგომარეობებად ($|\phi\rangle$ სუპერპოზიცია შეიცავს 2^n შესაკრებებს), ეს იმას ნიშნავს, რომ შემოსაზღვრული ფიზიკური რესურსი, რომელიც შედგება $n=10^3$ კუბიტისგან, ქმნის უდიდეს $2^{1000} = 10^{300}$ მათემატიკურ ინფორმაციულ რესურსს სუპერპოზიციური მდგომარეობების შესაკრებების ფორმაში და ხდება მიუღწევადი ყველაზე უფრო სწრაფი კლასიკური კომპიუტერებისთვის (თანამედროვე სუპერკომპიუტერი ასრულებს 10^{15} ოპერაციას წამში, ე.ი. 10^{23} ოპერაციას წელიწადში). სახელდობრ ამ გარემოებიდან გამომდინარე იკვეთება კვანტური კომპიუტერების უპირატესობა კლასიკურ კომპიუტერებზე [7].

სუპერპოზიციის პრინციპის შედეგს წარმოადგენს 2^n ჯერადი გამოთვლების პარალელიზმი ე.ი. მხოლოდ ერთი კუბიტის მდგომარეობის ცვლილება გადააწყობს მთელ სუპერპოზიციას (2^n საბაზო მდგომარეობათა ამპლიტუდები). გამოთვლითი პროცესი ატარებს ინტერფერენციულ ხასიათს, იმდენად რამდენადაც საბაზისო მდგომარეობათა ამპლიტუდები წარმოადგენს

კომპლექსურ რიცხვებს. კვანტური კომპიუტერები შეიძლება განხილულ იქნეს როგორც რთული ინტერფერენციული მოწყობილობა, რომელშიც მდგომარეობათა ინტერფერენცია ქმნის კომპიუტერის გამოთვლით სიძლიერეს, სინათლის ინტერფერენციის დროს ამპლიტუდის გაზრდის ანალოგიურად.

კვანტურ კომპიუტერზე გამოთვლის პროცესი აღიწერება როგორც კვანტური რეგისტრის საწყისი მდგომარეობის ვექტორის $|\phi_{in}\rangle$ -ის გარდაქმნა საბოლოო ვექტორში $|\phi_f\rangle$, $|\phi_{in}\rangle$ ვექტორის გამრავლების გზით უნიტარულ მატრიცაზე U ზომით $2^n \times 2^n$ (რომელშიც ჩადებულია ამოცანის ფორმულირება და მისი გადაწყვეტის ალგორითმი):

$$|\phi_f\rangle = U (2^n \times 2^n) |\phi_{in}\rangle$$

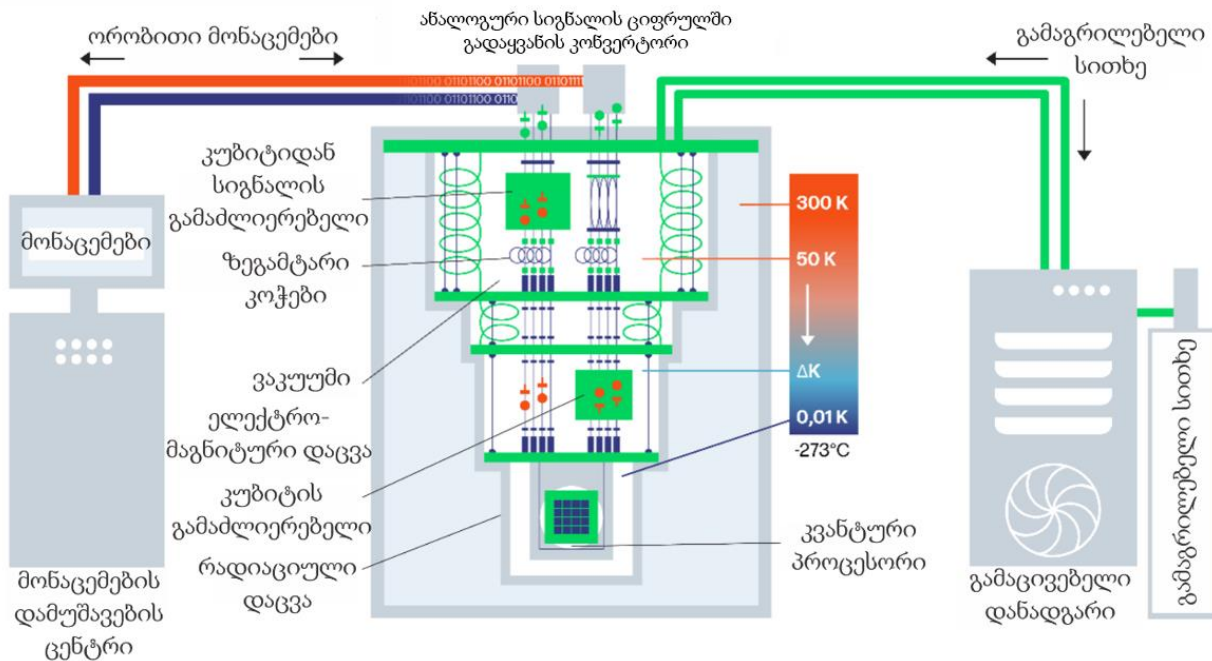
კვანტურ კომპიუტერზე ამოცანის გადაწყვეტისათვის მოითხოვება კუბიტების აუცილებელი რაოდენობა, რომლებიც მოყვანილ უნდა იქნეს საწყის მდგომარეობაში $|0\rangle$, ე.ი. მოხდეს მათი ინიციალიზაცია. მათი კვანტური ევოლუციის მართვა მოითხოვს შესრულდეს გარდაქმნა $|U\phi_{in}\rangle$, ის მიიღება კუბიტების მდგომარეობების გაზომვით ბაზისში $|0\rangle, |1\rangle$.

ცალკეული კუბიტის მდგომარეობის გაზომვის ფიზიკური რეალიზაცია დაკავშირებულია საკმაოდ რთული ტექნოლოგიური პრობლემების გადაწყვეტასთან, იმდენად რამდენადაც, აუცილებელია ჩატარდეს ცალკეული ატომური ნაწილაკის მდგომარეობის გაზომვა: ელექტრონის ან ატომის ბირთვის სპინის, ატომში ან კვანტურ წერტილში ელექტრონის ოპტიმალური მოძრაობის გაზომვა. არსებითად თითოეული კუბიტის რეალიზაციისათვის მოითხოვება მისი მდგომარეობის გაზომვის შესაბამისი ფიზიკური მეთოდის დამუშავება. კვანტური გაზომვის შედეგი წარმოადგენს ალბათურს (რადგან კვანტური კომპიუტერი ციფრული ალბათური კომპიუტერია), ამიტომ უტყუარი შედეგის მისაღებად საჭიროა ალგორითმის მრავალჯერადი გამეორება და მათგან საუკეთესო ვარიანტის არჩევა. ამისათვის არსებობს სპეციალური მათემატიკური ოპერატორები, რომლებიც საშუალებას იძლევა განისაზღვროს გამოთვლის სწორი შედეგი. კვანტური კომპიუტერი მართვის მიხედვით წარმოადგენს ანალოგურ კომპიუტერს. თანამედროვე შეფასებებით კომპიუტერის მმართველი სიგნალების პარამეტრები უნდა კონტროლდებოდეს $10^{-4} - 10^{-5}$ სიზუსტით [8].

დღეს უმეტესად კომერციულ კვანტურ კომპიუტერებში გამოიყენება პროცესორები, რომლებიც დაფუძნებულია ზეგამტარულ კუბიტებზე. ნახ.5 - ზე ნაჩვენებია კვანტური კომპიუტერის სქემა ზეგამტარული კუბიტებით [9].

ზეგამტარული კუბიტების პოპულარობა განპირობებულია ტექნიკურად მათი დამზადების მსგავსებით კლასიკურ ნახევარგამტარულ მიკროსქემებთან.

კვანტური კომპიუტერი



ნახ.5 ზეგამტარულ კუბიტებზე დაფუძნებული პროცესორი

ისტორიულად, ზეგამტარები ითვლება ყველაზე უფრო პერსპექტიულ მიმართულებად მათი კარგი მასშტაბურობის, დროში სტაბილურობის და პარამეტრების კონტროლის მართვის შედარებითი სიადვილით.

კვანტური გამოთვლითი ტექნიკის სისტემების და შიგა მოწყობილობების მაღალი მწარმოებლურობისა და ეფექტური ფუნქციონირებისთვის აუცილებელია დაბალი ტემპერატურა. კვანტური კომპიუტერის მდგრადი მუშაობისთვის ატომები უნდა იმყოფებოდნენ სტაბილურ მდგომარეობაში. ერთადერთი შესაძლო ხერხი, რომელიც ატომების სტაბილურობას უზრუნველყოფს არის ტემპერატურის შემცირება კელვინის ნულამდე. მხოლოდ ასეთი ტემპერატურის დროს რჩებიან ატომები სტაბილური და არ გამოყოფენ სითბურ ენერგიას.

თანამედროვე ზეგამტარული კუბიტების უმრავლესობა აგებულია რხევითი კონტურის პრინციპის მიხედვით: ეს არის ელექტრული წრედი, რომელიც შედგება კონდენსატორისგან, ინდუქციურობის კოჭისგან ნანოზომის წყვეტებით (ჯოზეფსონური გადასასვლელებით). დამუხტვად ზეგამტარულ კუბიტში მდგომარეობებს $|0\rangle$ და $|1\rangle$ შეესაბამება ერთი კუპერული წყვილის (დასახელება ეწოდა ამერიკელი ფიზიკოსის ლეონ კუპერის საპატივსაცემოდ) მუხტის არარსებობა და არსებობა ლითონურ ზეგამტარ კვანტურ წერტილში. $|0\rangle$ და $|1\rangle$ კუბიტის მდგომარეობებს მაგნიტურ ველში ზეგამტარული რგოლით და ჯოზეფსონის გადასასვლელებით შეესაბამება ზეგამტარული დენები ურთიერთსაპირისპირო მიმართულებებით.

კვანტური პროცესორი მოთავსებულია დიდ, ვაკუუმით შევსებულ კორპუსში, რომელიც დაცულია ნებისმიერი რადიოაქტიური და სხვა ელექტრომაგნიტური გამოსხივებისგან. ყველა ეს ზომები აუცილებელია დეკოჰორენციის წინააღმდეგ ბრძოლისათვის - რომლის დროსაც ხდება კუბიტების მიერ გამოთვლების შესრულების შესაძლებლობების დაკარგვა გარე გარემოს

სხვადასხვა ფაქტორებთან ურთიერთქმედების შედეგად. კორპუსი მიერთებულია გამაცივებელ დანადგართან, რომელიც აგრილებს კომპიუტერს სითხით ძალიან დაბალი ტემპერატურის დახმარებით - 273° C –მდე (კელვინის ნულ გრადუსამდე მნიშვნელობის მისაღწევად). ადრე აბსოლუტური ნულის შესანარჩუნებლად კვანტურ კომპიუტერებში გამოიყენებოდა განსაკუთრებულად იშვიათი და ძვირი იზოტოპი ჰელიუმ 3. ამჟამად გამოიყენება გათხევადებული გაზები, რომლებიც შედარებით ნაკლებად ძვირია, თუმცა რთულია ტექნიკური რეალიზაციის თვალსაზრისით. სულ ახლახან მიუნხენის ტექნიკური უნივერსიტეტის ფიზიკის კათედრის მეცნიერებმა განაცხადეს გაგრილების მუდმივი მაგნიტური სისტემის შექმნის შესახებ, რომელსაც გააჩნია უნარი დაადაბლოს ტემპერატურა ექსტრემალურად დაბალ დონეებამდე - თვით აბსოლუტურ ნულამდე.

დღესდღეობით კი გაგრილების სისტემა 2000Q, დამუშავებული D – Wave კანადური კომპანიის მიერ, წარმოადგენს ყველაზე პროგრესულს, იმდენად რამდენადაც საშუალებას იძლევა გააცივონ პროცესორები 0,015 კელვინამდე.

კვანტური კომპიუტერები ახდენს გარკვეული რთული ამოცანების გადაწყვეტას სპეციალური ალგორითმების გამოყენებით.

ცნობილი კვანტური ალგორითმებიდან შესაძლებელია გამოიყოს სამი [10]:

- შორის ალგორითმი;
- გროვერის ალგორითმი;
- დოიჩ - იოჟის ალგორითმი.

შორის ალგორითმი გამოიყენება დიდი შედგენილი რიცხვების მარტივ მამრავლებლად დაშლის (ფაქტორიზაციის) ამოცანის გადაწყვეტისათვის კვანტური კომპიუტერების გამოყენებით და საშუალებას იძლევა მოხდეს ამ ამოცანის გადაწყვეტა კვანტურ დონეზე ბევრად უფრო სწრაფად ვიდრე ამას აკეთებენ ფაქტორიზაციის კლასიკური ალგორითმები.

გროვერის ალგორითმი გამოიყენება დაუხარისხებელ მონაცემთა ბაზებში ძიებისათვის, რომელიც უზრუნველყოფს კვადრატულ აჩქარებას კლასიკურ ალგორითმებთან შედარებით.

დოიჩ - იოჟის ალგორითმი, რომელიც ეფუძნება კვანტური ჩახლართულობის მოვლენასა და სუპერპოზიციის პრინციპს, აჩვენებს კვანტურ უპირატესობას - მნიშვნელოვნად უფრო ეფექტურ მუშაობას კონკრეტული ტიპის ამოცანების გადაწყვეტისას ცნობილ კლასიკურ ალგორითმებთან შედარებით. კერძოდ ის განსაზღვრავს რამდენიმე ცვლადის ორობითი ფუნქცია მუდმივია თუ ბალანსირებული.

კვანტურ და კლასიკურ კომპიუტერებს შორის არსებითი განსხვავება ძირითადი მახასიათებლების მიხედვით შეიძლება წარმოდგინდეს ასეთი სახით [7,12]:

| | კლასიკური კომპიუტერი | კვანტური კომპიუტერი |
|--------|------------------------------|--|
| ლოგიკა | 0/1 | $a 0\rangle + b 1\rangle, a^2 + b^2 = 1$ |
| ფიზიკა | ნახევარგამტარული ტრანზისტორი | კვანტური ობიექტი |

| ინფორმაციის მატარებელი | მაბვის დონეები | პოლარიზაცია, სპინი,... |
|------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| ოპერაციები | NOT, AND, OR, XOR ბიტებზე | ვენტილები: CNOT, ადამარა,.. |
| ურთირთკავშირი | ნახევარგამტარული ჩიპი | გადახლართულობა |
| ალგორითმები | სტანდარტული | სპეციალური (შორის, გროვერის) |
| პრინციპი | ციფრული,დეტერმინებული | ანალოგური, ალბათური |

კვანტურ კომპიუტერებს განსხვავებით კლასიკური კომპიუტერებისგან გააჩნია სპეციალური კვანტური ვენტილები CNOT – ის და ადამარას სახით კუბიტებთან ოპერაციებისთვის. CNOT ვენტილები გამოიყენება კუბიტების ჩასახლართად, ხოლო ადამარას ვენტილები მდგომარეობათა სუპერპოზიციის შესაქმნელად.

სრულფასოვანი უნივერსალური კვანტური კომპიუტერის აგება წარმოადგენს ძალიან რთულ და ძვირადღირებულ ამოცანას, რომელიც მოითხოვს ახალ აღმოჩენებს და მიღწევებს კვანტურ ფიზიკაში. ამიტომ ზოგიერთი კომპანია იძლევა შეთავაზებას მათი კვანტური კომპიუტერები გამოყენებულ იქნეს ღრუბლის საშუალებით. ეს იმას ნიშნავს, რომ მომხმარებლებს, რომლებსაც არ გააჩნიათ საკუთარი კვანტური კომპიუტერი, კვანტურ გამოთვლებთან დაშვება შეეძლება ინტერნეტის საშუალებით.

იმ კომპანიებს შორის, რომლებიც იძლევიან კვანტური გამოთვლების შესაძლებლობას ღრუბლებში შეიძლება დასახელდეს IBM, Google, Microsoft და D – Wave. ისინი სთავაზობენ მომხმარებლებს სხვადასხვა პლატფორმებს და სერვისებს კვანტურ კომპიუტერებთან მუშაობისათვის.

კვანტურ კომპიუტერებს გააჩნია უდიდესი პოტენციალი რთული ამოცანების გადაწყვეტისათვის [11]. ერთ-ერთი იმ სფეროებიდან, რაზეც კვანტურ კომპიუტერებს შეუძლიათ მოახდინონ მნიშვნელოვანი გავლენა წარმოადგენს ავიაცია. ისინი გვთავაზობენ თანამედროვე საავიაციო ინდუსტრიაში დიდ პოტენციალს ისეთი რთული ამოცანების გადაწყვეტისათვის როგორცაა მარშრუტების ოპტიმიზაცია, მოლექულური პროცესების სიმულაცია ახლი მასალების დამუშავებისათვის, კრიპტოგრაფიის გაუმჯობესება და სხვ.

პერსპექტივაში კვანტური კომპიუტერების გამოყენებით ავიაციაში გადასაწყვეტი ამოცანების ნუსხა, შეიძლება ასე წარმოდგინდეს [1]:

- ოპტიმიზაციის ამოცანები. კვანტურ კომპიუტერები შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ისეთი რთული ამოცანების და პროცესების ოპტიმიზაციისათვის, როგორცაა საჰაერო ხომალდების ფრენების მარშრუტების დაგეგმვა, ტრაფიკის მართვა, აეროდინამიკური გამოთვლები, უსაფრთხოების ანალიზი და მრავალი სხვ;
- ახალი საავიაციო მასალების დამუშავება. კვანტურ კომპიუტერები შეიძლება გამოყენებულ იქნეს მასალების მოლექულური სტრუქტურების მოდელირებისათვის, რასაც შეუძლია

გამოიწვიოს ახალი მსუბუქი და მტკიცე მასალების შექმნის პროცესის დაჩქარება საავიაციო მრეწველობისთვის;

- რთული სისტემების მოდელირება და ანალიზი. კვანტური გამოთვლები იძლევა საშუალებას წარმოდგინდეს რთული სისტემების მოდელირებისათვის ახლი შესაძლებლობები, კერძოდ ისეთების, როგორცაა ატმოსფერო, მეტეოროლოგიური მოვლენები, ტურბულენტურობა, სითბური პროცესები და სხვა ფაქტორები, რაც მეტად სასარგებლო იქნება ფრენების უსაფრთხოების გაუმჯობესებისათვის;
- საჰაერო მოძრაობის მართვა. კვანტური გამოთვლები სასარგებლო იქნება ავიაგადასაზღვრებისა და მარშრუტიზაციისათვის ახალი ალგორითმების დამუშავების დროს. ეს შესაძლებელს გახდის გაუმჯობესდეს ფრენების ეფექტურობა, შემცირდეს საწვავის დანახარჯი. კვანტურ კომპიუტერებს რეალურ დროში ინფორმაციის მრავალი წყაროდან მიღებული მონაცემების ანალიზით შეუძლიათ დაეხმარონ საჰაერო მოძრაობის მაკონტროლებელ სამსახურებს და სისტემებს საჰაერო მოძრაობის ნაკადის მართვასა და ოპტიმიზაციაში, მიიღონ ოპტიმალური გადაწყვეტილებები მარშრუტიზაციის, გადატვირთულობის შემცირებისა და უსაფრთხოების გაუმჯობესების კუთხით. კვანტურ ალგორითმებს შეუძლია დიდი როლი ითამაშონ საჰაერო მოძრაობის რეგულირებაში და უსაფრთხოების უზრუნველყოფაში ამაღლებული ტრაფიკის პირობებში, გათვალონ საჰაერო ხომალდების ნაკადები, გამორიცხონ შესაძლო შეჯახებები და დაყოვნებების შემთხვევები. კვანტური გამოთვლები და კვანტური ალგორითმები შესაძლებელს გახდის გადაწყდეს ზოგადად კომივიოიაჟორის ამოცანა, რომელიც მიზნად ისახავს მრავალ ობიექტებს შორის უმოკლესი მარშრუტის დადგენას საწყის ობიექტში დაბრუნებამდე. ამ ამოცანის დასმა და გადაწყვეტა ავიაგადასაზღვრების შესაძლებელს გახდის დაიგეგმოს ნავიგაცია და ფრენის მარშრუტები ოპტიმალურად მთელი მსოფლიოს მასშტაბით, რაც მნიშვნელოვნად გააიაფებს და გაამარტივებს ადამიანების და ტვირთების გადაყვანას და გადაზიდვას;
- საჰაერო ხომალდების ტექნიკური მომსახურება და ოპტიმიზაცია. კვანტურ კომპიუტერებს შეუძლიათ ჩაატარონ საჰაერო ხომალდების სისტემების, ძრავების და სხვა კომპონენტების სენსორული მონაცემების დიდი რაოდენობის ანალიზი ანომალიების გამოვლენით, ოპტიმიზირება გაუკეთონ საავიაციო ტექნიკის მომსახურების განრიგს და მომსახურების პროცესს, რაც გამოიწვევს რესურსების უფრო ეფექტურ გამოყენებას, დაუგეგმავი გაჩერებების შემცირებას და საჰაერო ხომალდების საიმედოობის ამაღლებას;
- სიმულაცია და ვირტუალური ტესტირება. კვანტურ კომპიუტერებს შეუძლია დააჩქარონ ახალი საჰაერო ხომალდების დიზაინის, ძრავის კონფიგურაციისა და ფრენის სისტემების სიმულაცია და ტესტირება. ეს მნიშვნელოვნად შეამცირებს დამუშავების დროს და შესაძლებელს გახდის ინოვაციები სწრაფად დაინერგოს საავიაციო ინდუსტრიაში;
- კვანტური კომუნიკაცია და უსაფრთხო ქსელები. კვანტურ გამოთვლას შეუძლია ხელი შეუწყოს ავიაგადასაზღვრების უსაფრთხო საკომუნიკაციო ქსელების განვითარებას. კვანტური გასადების განაწილების (QKD) პროტოკოლები გვთავაზობენ ურღვევ დაშიფვრას და შეუძლიათ დაიცვან მგრძობიარე ინფორმაცია, რომელიც გადაცემულია საჰაერო

ხომალდებს, სახმელეთო სადგურებსა და საჰაერო მოძრაობის კონტროლის სისტემებს შორის;

- ამინდის პროგნოზირება. კვანტურ კომპიუტერებს შეუძლიათ ამინდის პროგნოზირების მოდელის გასაუმჯობესებლად ამინდის დიდი რაოდენობის დამუშავება და ანალიზი. ამან შეიძლება გამოიწვიოს ამინდის უფრო ზუსტი და დროული პროგნოზი, რაც ავიაკომპანიებს დაეხმარება ფრენების განრიგის ოპტიმიზაციაში, შეფერხებების შემცირებაში და ფრენების უსაფრთხოების გაზრდაში;
- დაშიფვრა და კიბერუსაფრთხოება. კვანტურ კომპიუტერებს აქვთ პოტენციური დაარღვიონ ამჟამად გამოყენებული დაშიფვრის მეთოდები, როგორცაა RSA (Rivest – Shomir – Aldeman) და ელიფსური მრუდის კრიპტოგრაფია. თუმცა, მათ ასევე შეუძლიათ შემოგთავაზონ დაშიფვრის ახალი ტექნიკა, რომელიც დაფუძნებულია კვანტურ პრინციპებზე, რამაც შეიძლება მნიშვნელოვნად გააძლიეროს საავიაციო სისტემებისა და კომუნიკაციების უსაფრთხოება.

მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ კვანტური გამოთვლა ჯერ კიდევ განვითარებადი ტექნოლოგიაა და არსებობს მრავალი ტექნიკური გამოწვევა, რომელიც უნდა დაიძლიოს მისი სრული პოტენციალის რეალიზებამდე. თუმცა, საავიაციო ინდუსტრიის მკვლევარები და კომპანიები აქტიურად იკვლევენ და სწავლობენ კვანტური გამოთვლის პოტენციურ აპლიკაციებს საჰაერო ხომალდების ტექნიკური თუ ტექნოლოგიური შესაძლებლობების ასპექტების გასაუმჯობესებლად.

დასკვნა

ამჟამად მეცნიერებისა და ინჟინრების წინაშე დგას რამდენიმე საკვანძო პრობლემა, რომელთა გადაწყვეტა აუცილებელია სამომავლოდ კვანტური კომპიუტერების შექმნისათვის. ეს პრობლემებია: კვანტური დეკოჰერენცია; ეფექტური კვანტური ლოგიკური ელემენტების შექმნა; კვანტური უწყვეტობა (კვანტური ტალღური უწყვეტი ფუნქციებიდან დისკრეტულზე გადასვლის პრობლემის ეფექტური გადაწყვეტა); კვანტური შეცდომების კორექცია (კვანტური შეცდომების გასწორების საიმედო მეთოდების დამუშავება); სტაბილურობის და გარემომცველ გარემოსთან იზოლირების უზრუნველყოფა; მასშტაბურობა; კლასიკურ კომპიუტერთან ინტეგრაცია.

კვანტური კომპიუტერების შექმნა წარმოადგენს დიდ სამეცნიერო და ტექნიკურ გამოწვევას. ამისათვის საჭიროა დამუშავდეს ახალი ფიზიკური პლატფორმები, ალგორითმები, პროგრამული უზრუნველყოფა და ინტერფეისები. კვანტური კომპიუტერების განვითარება კი მოითხოვს მეცნიერების, ინჟინრების, დამპროგრამებლების და ინვესტორების ერთობლივ ძალისხმევას სხვადასხვა ქვეყნების მასშტაბით. უეჭველია დადგება ის დროც, როცა ეს ერთობლივი ძალისხმევა გამოიღებს შედეგს და მომავალში კვანტური კომპიუტერების დამუშავებისას აუცილებლად გადაწყდება კვანტური კომპიუტერების წინაშე ჯერ კიდევ მდგარი მრავალი ტექნიკური, ინჟინრული და ალგორითმული პრობლემები.

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. დ.ვეფხვაძე. საბორტო კომპიუტერები და ინფორმაციული სისტემები. ლექციების კურსი. საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი, 2023. – 391 გვ.
2. Борзунов С. В., Кургалин С. Д. Квантовые вычисления. БХВ – Петербург, 2022. – 144 с.
3. Джек Д. Хидари. Квантовые вычисления. ДМК – Пресс, 2021. – 370 с.
4. Соловьев В. М. Квантовые компьютеры и квантовые алгоритмы. Ч. 1. Квантовые компьютеры //Иzv. Sarat. un-ta. Nov. ser. Ser. Matematika. Mexanika. - Информатика. 2015. Т. 15, вып. 4. С. 462–477
5. Гуц А.К. Архитектура, процессор и работа квантового компьютера. Математические структуры и моделирование. 2010. Вып. 21. С. 55-64
6. Что такое кубиты в квантовых компьютерах?– URL: <http://www.bolshoyvopros.ru/questions/2887426>
7. Как работают квантовые компьютеры. Собираем пазл / – URL: <https://habr.com/ru/>
8. Валиев К.А., Холево А.С. Квантовый компьютер. Большая российская энциклопедия. 2004 – 2017.
9. Как работает квантовый компьютер? - URL: <https://Postnauka.org>
10. Колесников П.О., Голубничий А.А. К вопросу о квантовых компьютерах их развитии и современном состоянии. Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей “StudNet” №1/ 2022, с. 754 – 762.
11. Julian Eberling. Quantum computers: state of development and areas of application. <https://www.lead-innovation.com/englishblog/quantum-computers-state-of-development/>
12. Quantum computers work in a completely different way from conventional computers. <https://www.volkswagenag.com/en/news/stories/2019/11/where-is-the-electron-and-howmany-of-them.html/>

Quantum computers and their application prospects in aviation

Demur Vepkhvadze

Georgian Aviation University, 16 Ketevan Dedopali Ave. 0103, Tbilisi, Georgia

Abstract

The article discusses the basic principles of building a quantum computer, the purpose, description and main types of their basic information unit qubit. The principle scheme and working principle of a quantum computer are presented. Basic algorithms of quantum computing are discussed. A comparison of quantum computers with classical computers is given and the advantages of classical computers compared to them are shown. The possibilities and principles of optimal solution of a wide range of complex aviation tasks (optimization tasks, modeling and analysis of complex systems, processing of new aviation materials, air traffic management, etc.) are proposed in the case of using quantum computers in aviation.

Keywords: *quantum computer, qubit, superposition, coherence, quantum algorithm, air traffic control.*