

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

გიორგი გელაშვილი

საწარმოს ელექტრომომარაგების ოპტიმიზაცია ქარის
ელექტროსადგურის გამოყენებით

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად
წარდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

სადოქტორო პროგრამა: „ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია“

შიფრი: 0713

თბილისი

2026 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში
ენერგეტიკის ფაკულტეტი
ელექტროტექნიკისა და ელექტრონიკის დეპარტამენტი

ხელმძღვანელები: პროფესორი ს. ნემსაძე, პროფესორი თ. მუსელიანი

რეცენზენტები:

დაცვა შედგება 2026 წლის "-----" "-----" "-----" საათზე
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკის ფაკულტეტის
სადისერტაციო ნაშრომის დაცვის კოლეგიის სხდომაზე, კორპუსი VIII,
სხდომათა დარბაზი.

მისამართი: 0160, თბილისი, კოსტავას 77.

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

ფაკულტეტის სწავლული მდივანი,
პროფესორი

გ. გიგინეიშვილი

ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

სამუშაოს აქტუალობა. ბოლო რამდენიმე ათწლეულის განმავლობაში, ქარის ენერჯია ენერჯეტიკის სექტორის ცალკეულ სექტორად ჩამოყალიბდა რიგ ქვეყნებში, წარმატებით კონკურენციას უწევს ტრადიციულ ენერჯიას.

ქარის ენერჯეტიკა ამჟამად სწრაფად ვითარდება ინდუსტრიული ქვეყნების უმეტესობაში. ეს განახლებადი ენერჯიის ერთ-ერთი ყველაზე პერსპექტიული ფორმაა და ენერჯიის დაზოგვის ტექნოლოგიების განვითარების პერსპექტიული სფეროა, რომელსაც სუფთა ენერჯიის პრაქტიკულად ამოუწურავი პოტენციალი აქვს.

ქარის ტურბინები წამყვან ადგილს იკავებენ არატრადიციული განახლებადი ენერჯიის წყაროების გამოყენებით მომუშავე ელექტროსადგურებს შორის. ეს განპირობებულია ქარის ენერჯიის თითქმის ყველგან ხელმისაწვდომობით, მისი უზარმაზარი პოტენციალით და ბოლო წლებში გლობალური ქარის ენერჯიის ინდუსტრიაში მიღწეული მნიშვნელოვანი პროგრესით.

ქვანახშირის, ბუნებრივი აირის ან ნავთობისგან განსხვავებით, ქარისგან ელექტროენერჯიის გამომუშავება არ იწვევს სათბურის გაზების გამოყოფას. მიუხედავად იმისა, რომ არსებობს გარემოსდაცვითი მოსაზრებები დიდი ქარის სადგურების მშენებლობასთან დაკავშირებით, ექსპლუატაციაში შესვლის შემდეგ, ქარის ტურბინები არ საჭიროებენ წიაღისეული საწვავის გამოყენებას ოპერირებისთვის. გარდა ამისა, ქარის ენერჯია მთლიანად განახლებადია და არასოდეს ამოიწურება. წიაღისეული საწვავის ტრადიციული რესურსებისგან განსხვავებით, რომლების განახლებაც ძალიან ნელა ხდება, ხოლო როგორც მოგეხსენებათ, ჩვენს ატმოსფეროში ქარი ბუნებრივად გვხვდება და სამომავლოდ მომარაგების საკითხებზე და მის მარაგზე ფიქრი არ დაგვჭირდება.

მრავალი ქვეყნის ენერჯეტიკის განვითარების სტრატეგია გულისხმობს ელექტროენერჯიის ტრადიციული გამომუშავებიდან განახლებად და ალტერნატიულ წყაროებზე გადასვლას. განახლებადი ენერჯიის საერთაშორისო სააგენტოს (IRENA) მონაცემებით, 2008 წლიდან 2020 წლამდე ქარის ტურბინების მიერ გამომუშავებული ელექტროენერჯიის წილი 22-ჯერ გაიზარდა, ხოლო მზის

პარკებიდან - 700-ჯერ. განახლებადი ენერჯის სწრაფი განვითარება მოითხოვს თანამედროვე მონიტორინგის, პროგნოზირებისა და პროგნოზირებადი კონტროლის სისტემების შემუშავებასა და დანერგვას.

ელექტროენერჯის განაწილებისა და გადაცემის ქსელების ნაწილად, ძირითადი აქცენტი კეთდება საშუალო და დიდი სიმძლავრის ქარის ტურბინებზე. ამიტომ, ჩვენი სადისერტაციო სამუშაოს აქტუალური სამეცნიერო და ტექნიკური გამოწვევაა ქარის ენერჯის ეფექტური გამოყენება ცემენტის წარმოებაში.

ამ ობიექტის მომავალი მდგომარეობის პროგნოზზე დაფუძნებულ მართვას შეუძლია მნიშვნელოვნად გააუმჯობესოს ობიექტის ენერგოეფექტურობა. ეს მიიღწევა ყოველდღიური დატვირთვის გრაფიკების ოპტიმალური რეგულირებით და საწარმოს ელექტროენერჯის მოხმარების მაღალი ხარისხის საშუალო და მოკლევადიანი პროგნოზებით.

ქარის ტურბინის მუშაობის განმსაზღვრელი ძირითადი მახასიათებელია ქარის ენერჯის გამოყენების კოეფიციენტი - ქარის ტურბინის მექანიკური სიმძლავრის თანაფარდობა ქარის ტურბინის ქარის ტურბინის გატარებულ არეალში გამავალი შემომავალი ქარის ნაკადის მთლიან სიმძლავრესთან. ამიტომ, ქარის ენერჯის გამოყენების კოეფიციენტი გაზრდით ქარის ტურბინის ყველა მუშაობის რეჟიმში სიმძლავრის კონტროლის სხვადასხვა მეთოდის გაუმჯობესებით უმნიშვნელოვანესია და ეს საკითხი განხილულია ამ ნაშრომში.

ამგვარად, ქარის ტურბინის სიმძლავრის მართვის ალგორითმების სინთეზი და შესწავლა წარმოადგენს კვლევის შესაბამის სფეროს პროდუქტიულობის გაზრდისა და ენერჯის გამომუშავების ხარჯების შემცირების სფეროში, რომლის გადაწყვეტასაც აქვს როგორც სამეცნიერო, ასევე პრაქტიკული მნიშვნელობა.

კვლევის ობიექტს წარმოადგენს ქარის ტურბინაზე დაფუძნებული ელექტრო სისტემა, რომელიც შედგება ქარის ძრავისგან, ელექტროგენერატორისგან, ელექტროენერჯის დაგროვების მოწყობილობისგან და ქარის ტურბინის კონტროლერისგან, რომელიც გამოიყენება როგორც იზოლირებული ენერგომომარაგების სისტემა.

კვლევის საგანია მართვის მეთოდებისა და ალგორითმების გავლენა ცვლადი ქარის სიჩქარის პირობებში მომუშავე ქარის ტურბინის მუშაობაზე.

დისერტაციის მიზანია ვერტიკალური ღერძიანი ქარის ტურბინისთვის მართვის ალგორითმისა და კონტროლერის შემუშავება, რაც თეორიული კვლევების შედეგებს სავსე ექსპერიმენტებით დაადასტურებს და რომელიც გამოყენებული იქნება კასპის ცემენტის ქარხნის ელექტრომომარაგებისათვის.

კვლევის მეთოდები. დასმული ამოცანების გადასაჭრელად გამოყენებული იქნა ავტომატური მართვის თეორიის მათემატიკური აპარატი, მათემატიკური მოდელირების მეთოდები და MATLAB/Simulink პროგრამული პაკეტი.

სამეცნიერო სიახლე:

1. შემოთავაზებულია ქარის ტურბინის სიმულაციური კომპიუტერული მოდელი, რომელიც გამოირჩევა ცვლადი კონფიგურაციის მართვის მოდულის არსებობით, რომელიც განსაზღვრულია მაღალი დონის ენაზე და შექმნილია ქარის ტურბინის ალგორითმებისა და მართვის მეთოდების მახასიათებლების შესასწავლად სხვადასხვა გარე გავლენის ქვეშ.

2. შემოთავაზებულია ქარის ტურბინების მუშაობის განსაზღვრის მეთოდი, რომელიც ხასიათდება შემცირებული დამკვირვებლის გამოყენებით და უზრუნველყოფს KIEV-ის განსაზღვრას მუდმივად ცვალებადი ქარის სიჩქარის დროს.

3. შემოთავაზებულია ქარის ტურბინის მართვის ალგორითმი, რომელიც ხასიათდება შემცირებული დამკვირვებლის გამოყენებით ქარის ტურბინის აეროდინამიკური ბრუნვის მომენტის დასადგენად და შექმნილია ქარის ტურბინის მიერ გენერირებული სიმძლავრის მაქსიმუმიზაციისთვის ქარის სიჩქარის ფართო დიაპაზონი.

დისერტაციის პრაქტიკული მნიშვნელობა:

– წარმოადგენს კვლევის შედეგებს ქარის ტურბინის სიმძლავრის მართვის მეთოდების გავლენაზე მუშაობაზე, მიღებული მოდელის ექსპერიმენტებით და თითოეული მეთოდის ოპერატიული მახასიათებლების დემონსტრირებით;

– ქმნის პროგრამულ უზრუნველყოფას ქარის ტურბინის მუშაობის ინფორმაციის დისტანციური მონიტორინგისა და ჩაწერისთვის, რაც საშუალებას იძლევა მონაცემების გადაცემის დისტანციურ სერვერზე შემდგომი დამუშავებისთვის;

- ქმნის ქარის ტურბინის კონტროლერს, რომელიც უზრუნველყოფს ქარის პოტენციალის ეფექტურ გამოყენებას ქარის სიჩქარის ფართო დიაპაზონში მუშაობისას.

სამუშაოს აპრობაცია: სადისერტაციო სამუშაოს ძირითადი დებულებები გამოქვეყნებულია 4 სამეცნიერო სტატიაში. ასევე 2021 წელს მოხსენებული იქნა: ქ. თბილისის საერთაშორისო სამეცნიერო – ტექნიკურ კონფერენციაზე - „ენერჯეტიკის თანამედროვე პრობლემები და მათი გადაწყვეტის გზები“; 2025 წელს ქ. ქუთაისის მრავალდისციპლინურ საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე - „მდგრადი განვითარება, ინსტიტუტები და გლობალური გამოწვევები - SDIGC-25“ და საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტში, ელექტროტექნიკისა და ელექტრონიკის დეპარტამენტში პირველ, მეორე და მესამე კოლოქვიუმებზე და წინასწარ დაცვაზე.

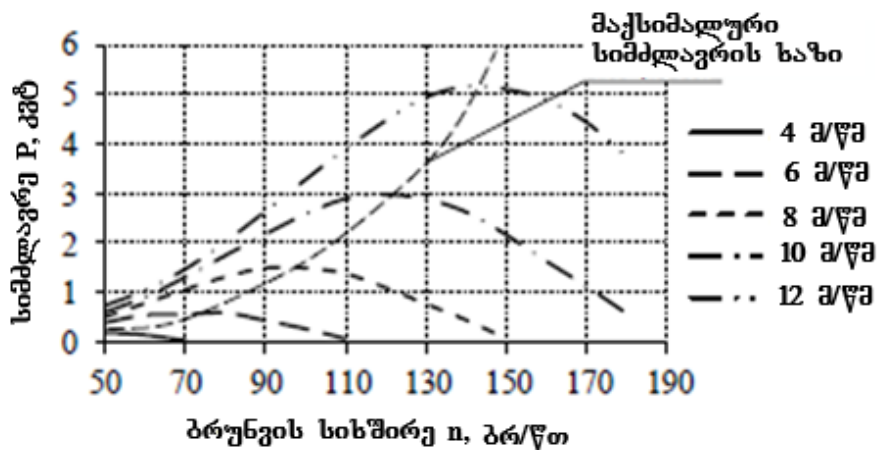
სამუშაოს სტრუქტურა: დისერტაცია შედგება შესავალისაგან, 5 თავისაგან, დასკვნისაგან, გამოყენებული ლიტერატურის ნუსხისგან. დისერტაციის საერთო მოცულობა წარმოდგენილია 134 გვერდზე, შეიცავს 36 ნახაზსა და 4 ცხრილს.

ნაშრომის ძირითადი შინაარსი

შესავალში დასაბუთებულია თემის აქტუალურობა და მისი მეცნიერული სიახლე. ჩამოყალიბებულია სამუშაოს მიზანი, განსაზღვრულია კვლევის ობიექტი და კვლევისათვის გამოყენებული მეთოდები. განსაზღვრულია სამუშაოს პრაქტიკული ღირებულება.

ნაშრომის პირველ თავში მოცემულია ქარის ენერჯის განვითარების ისტორიული მიმოხილვა, გამოკვეთილია განვითარების ძირითადი ტენდენციები და გამოვლენილია ქარის ტურბინების კონსტრუქციასა და ექსპლუატაციაში წარმოშობილი ძირითადი საკითხები და გამოწვევები.

ქარის ტურბინაში სიმძლავრის კონტროლის აუცილებლობა აიხსნება ქარის ტურბინის მუშაობის მახასიათებლებით, რომლებიც წარმოადგენს ტურბინის გამომავალი სიმძლავრის დამოკიდებულებას ბრუნვის სიჩქარეზე მუდმივი ბრუნვის სიჩქარის დიაპაზონში. ნახ.1. გვიჩვენებს ქარის ტურბინის მექანიკური სიმძლავრის ტიპურ დამოკიდებულებას, რომელიც აჩვენებს, რომ თითოეული ქარის სიჩქარისთვის არსებობს კონკრეტული ბრუნვის სიჩქარე, რომლის დროსაც ქარის ტურბინის სიმძლავრე მაქსიმალურია.



ნახ.1. გენერირებული სიმძლავრის დამოკიდებულება ქარის ტურბინის ბრუნვის სიხშირეზე ქარის სხვადასხვა სიჩქარის დროს

დაბალი სიმძლავრის ქარის ტურბინებს შორის ქარის ტურბინის სიმძლავრის კონტროლის ყველაზე გავრცელებული მეთოდებია:

1. ქარის ტურბინის მუდმივი სიჩქარით მუშაობა.

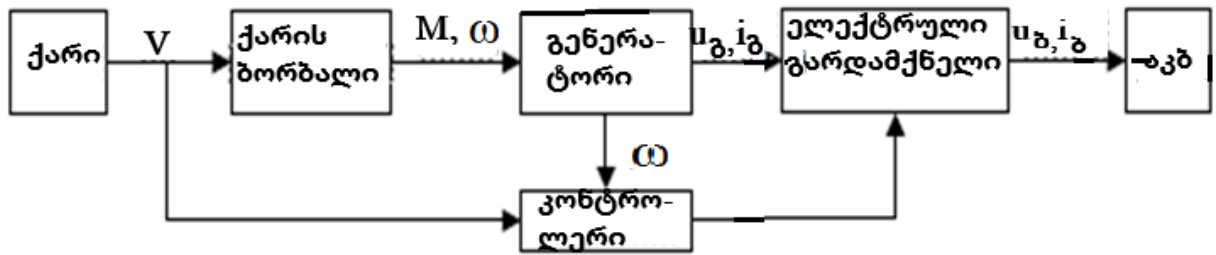
2. ქარის ტურბინის რამდენიმე ფიქსირებული სიჩქარით მუშაობა გენერატორის გრაგნილების გადართვით ან მექანიკური ტრანსმისიის გადაცემათა კოეფიციენტის შეცვლით.

3. ქარის ტურბინის ცვლადი სიჩქარით მუშაობა ქარის ტურბინის პირების კუთხის ან გეომეტრიული ზომების შეცვლით.

4. ქარის ტურბინის ცვლადი სიჩქარით მუშაობა სიმძლავრის კონტროლერით აღჭურვილი ელექტრო გადამყვანის გამოყენებით.

ქარის ტურბინის სიმძლავრის მართვის ამ მეთოდების ანალიზის შედეგად დადგინდა, რომ მართვის უმარტივესი და ყველაზე გავრცელებული მეთოდია ქარის ტურბინის მუდმივი სიჩქარით მუშაობა. თუმცა, ამ კონტროლით მომუშავე ქარის ტურბინები ვერ უზრუნველყოფენ ეფექტურ მუშაობას ქარის სიჩქარის ფართო დიაპაზონში. ასეთ პირობებში ყველაზე ეფექტური მეთოდია ცვლადი ქარის ტურბინის სიჩქარით მუშაობა წინასწარ განსაზღვრული ალგორითმის მიხედვით. ამ ალგორითმში ქარის ტურბინის სიჩქარე იცვლება ქარის სიჩქარის ცვლილებებთან ერთად, რაც უზრუნველყოფს მაქსიმალურ ეფექტურობას. ქარის ტურბინის სიმძლავრის ეფექტური მართვის ასეთი ალგორითმის სინთეზირებისთვის, გადაწყდა ქარის ტურბინის კომპიუტერული მოდელის შემუშავება, რომელიც ახორციელებდა მართვის სხვადასხვა მეთოდს.

მეორე თავი აღწერს ქარის ტურბინის შემუშავებულ მათემატიკურ მოდელს, რომელიც შექმნილია ქარის ტურბინის მუშაობის შესასწავლად სხვადასხვა სიმძლავრის მართვის მეთოდებისა და ალგორითმების გამოყენებით. ქარის ტურბინის მოდელი შემუშავებულია წინასწარ განსაზღვრული ქარის ტურბინის კონტროლერისა და ქარის ტურბინის კონტროლერის გამოყენებით, რომელსაც აქვს მართვის ალგორითმის პროგრამულად განსაზღვრის შესაძლებლობა. მოდელის ფუნქციური დიაგრამა ნაჩვენებია ნახ.2-ში, სადაც V- არის ქარის სიჩქარე; M- არის ქარის ტურბინის ბრუნვის მომენტი; ω - არის ქარის ტურბინის კუთხური სიჩქარე; u_g არის გენერატორის გამომავალი ძაბვა; i_g არის გენერატორის გამომავალი დენი; u_a არის აკუმულატორის ძაბვა; i_a არის აკუმულატორის დენი



ნახ.2. ქარის ტურბინის სიმულაციური მოდელის ფუნქციონალური სქემა

ქარის ბორბლის მოდელი წარმოდგენილია შემდეგი განტოლებებით. ბრუნვითი მოძრაობის დინამიკის აღმწერ ფუნდამენტურ დიფერენციალურ განტოლებას აქვს სახე:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_s - M_{გგ} - M_{წ} \quad (1)$$

სადაც, J - არის სისტემის ინერციის მომენტი; ω - არის კუთხური სიჩქარე; M_s - არის ქარის ბორბლის აეროდინამიკური მომენტი; $M_{გგ}$ - არის გენერატორის ელექტრომაგნიტური მომენტი; $M_{წ}$ - არის დანაკარგების წინააღმდეგობის მომენტი, ხახუნის და სხვა დანაკარგების გათვალისწინებით.

$$M_s = C_p(Z) \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2 \cdot \omega} \quad (2)$$

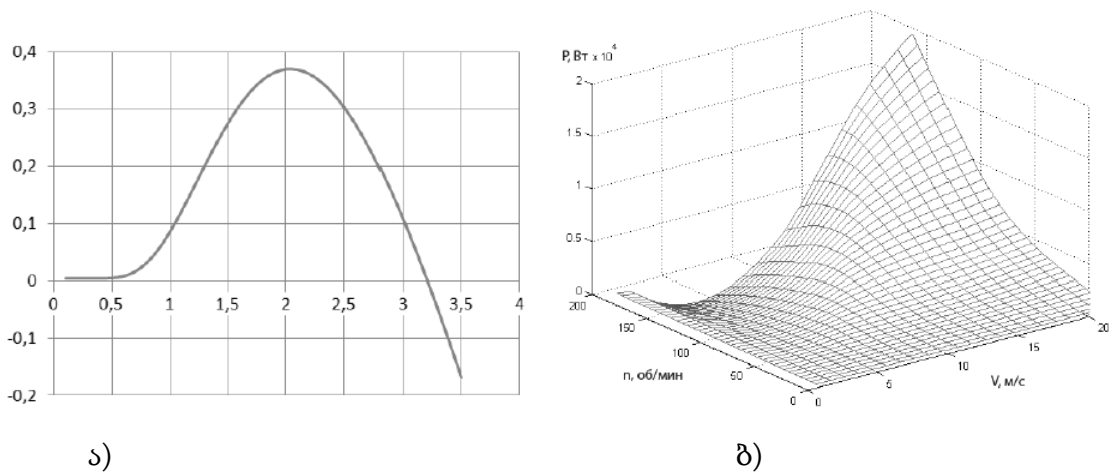
სადაც, $C_p(Z)$ = ქარის ენერჯის გამოყენების კოეფიციენტი (დამოკიდებულია სწრაფსვლაზე Z); ρ - ჰაერის სიმკვრივე; V - ქარის სიჩქარე; S - გაწმენდილი ფართობია; ω - ქარის ბორბლის კუთხური სიჩქარე. C_p -ის დამოკიდებულება სიჩქარეზე Z მოცემულია ფუნქციით:

$$C_p(Z) = \left(\frac{C_1}{Z} - C_2\right) \cdot e^{-\frac{C_3}{Z}} + C_4 \quad (3)$$

სადაც, $c_1 \dots c_4$ არის კოეფიციენტები, რომლებიც შერჩეულია ქარის ბორბლის მოცემული კონსტრუქციისათვის ცნობილი აეროდინამიკური მახასიათებლების საფუძველზე; სიჩქარე Z განისაზღვრება როგორც $Z = \frac{\omega \cdot r}{V}$, სადაც r არის ქარის ბორბლის რადიუსი. $C_p(Z)$ -ის ტიპური დამოკიდებულება ნაჩვენებია ნახ. 3.ა-ზე ხოლო ქარის ბორბლის სიმძლავრის Pa დამოკიდებულება ბრუნვის სიჩქარეზე n სხვადასხვა ქარის სიჩქარისთვის ნაჩვენებია ნახაზ 3.ბ-ზე.

გენერატორის ელექტრომაგნიტური მომენტი $M_{გლ}$ განისაზღვრება ელექტრომანქანის მუშაობის აღმწერი განტოლებებით. ქარის ტურბინის

სიმძლავრის მართვის ალგორითმების სიმულირებისთვის გამოყენებული იქნა მუდმივი მაგნიტის მქონე სინქრონული გენერატორის მოდელი.



ნახ. 3. დამოკიდებულებები $C_p(Z)$ (ა) და $Pa(n, V)$ (ბ)

ეკვივალენტური სქემის მიხედვით, გენერატორის ფაზური გრაგნილის ძაბვაა:

$$u = e - r \cdot i - L \frac{di}{dt} \quad (4)$$

სადაც, e არის ელექტრომამომრავებელი ძალა (ემმ), r არის ფაზის გრაგნილის აქტიური წინააღმდეგობა, i არის დენი ფაზის გრაგნილში და L არის ფაზის გრაგნილის ინდუქციურობა.

ქარის ტურბინის მართვის ალგორითმის შესწავლის შედეგებზე ელექტრომაქანის პარამეტრების გავლენის შესამცირებლად, ვივარაუდეთ, რომ r და L ნულის ტოლია, ხოლო გენერატორის გრაგნილებში ემმ მოცემულია შემდეგი განტოლებებით:

$$\begin{cases} e_A = k \cdot \omega \cdot \sin(2p \cdot \omega \cdot t) \\ e_B = k \cdot \omega \cdot \sin(2p \cdot \omega \cdot t + 120^\circ) \\ e_C = k \cdot \omega \cdot \sin(2p \cdot \omega \cdot t - 120^\circ) \end{cases}$$

განტოლებათა სისტემაში გამოიყენება შემდეგი აღნიშვნები:

e_A, e_B, e_C - გენერატორის გრაგნილების ელექტრომამომრავებელი ძალებია; k - გენერატორის კონსტრუქციის კოეფიციენტი; $2p$ - წყვილპოლუსთა რიცხვია; ω - გენერატორის როტორის კუთხური სიჩქარეა; t - დროა.

ქარის ტურბინის გენერატორის დატვირთვად გამოყენებულია აქტიური ძაბვის გასწორებელი, რაც საშუალებას იძლევა, გენერატორის ფაზის გრაგნილებზე ჩაითვალოს აქტიური წინაღობებით დატვირთულად. გენერატორის გრაგნილში დენი შემდეგ სინუსოიდურია და ფაზაშია შესაბამის გრაგნილში ძაბვასთან, ხოლო გენერატორის ელექტრომაგნიტური ბრუნვის მომენტი $M_{გა} = 3 \cdot k \cdot I_{გ}$, სადაც $I_{გ}$ არის გენერატორის ფაზის დენის ამპლიტუდა.

ქარის ტურბინის კონტროლერი შექმნილია შემდეგი ფუნქციების შესასრულებლად:

- გენერატორის დენის რეგულირება მუდმივად ცვალებადი ქარის სიჩქარის პირობებში, ქარის ტურბინის მაქსიმალური სიმძლავრის უზრუნველსაყოფად;
- აკუმულატორის დატენვის დენის შეზღუდვა;
- ქარის ტურბინის აღჭურვილობის უსაფრთხო მუშაობის უზრუნველყოფა ნორმალურ და საგანგებო რეჟიმებში.

ქარის ტურბინის კონტროლერის კომპიუტერული მოდელი რეალიზებულია MATLAB/Simulink-ის „S-Function“ ბლოკის გამოყენებით, რაც საშუალებას იძლევა ბლოკის მუშაობის ალგორითმი განისაზღვროს მაღალი დონის ენაზე. ამ მიდგომამ შესაძლებელი გახადა უნივერსალური, ცვალებადი კონფიგურაციის მოდელის შექმნა, რომელსაც ჰქონდა პროგრამული კოდის პროტოტიპის მიკროპროცესორულ მართვის სისტემაში გადატანის შესაძლებლობა, რაც მნიშვნელოვნად ამცირებდა პროტოტიპის პროგრამული უზრუნველყოფის შემუშავებისა და გამართვის დროს.

მესამე თავი ეძღვნება ქარის ენერჯის გენერაციის შესაძლებლობებს ცემენტის ინდუსტრიაში. ცემენტის წარმოება ერთ-ერთი ყველაზე ენერგოინტენსიური ინდუსტრიული პროცესია მსოფლიოში. ცემენტის წარმოების პროცესის ცენტრალურ ნაწილს წარმოადგენს მაღალი ტემპერატურის შექმნა და შენარჩუნება ლუმელი, სადაც ხდება კალცინაცია და კლინკერის ფორმირება, ფუნქციონირებს 1400°C-ზე მაღალ ტემპერატურაზე. ინდუსტრიული ანალიზების მიხედვით, ცემენტის წარმოებაში ელექტროენერგია ზოგადად შეადგენს მთლიანი ენერჯის დაახლოებით 25%-ს. ეს მაჩვენებელი მცირედად იცვლება საწარმოს დიზაინისა და ოპერაციული მახასიათებლების მიხედვით, თუმცა მოთხოვნის

მაღალი დონე უცვლელი რჩება. მსხვილ საწარმოებში ელექტროენერჯის დამონტაჟებული სიმძლავრე ხშირად ათეულობით მეგავატს აღწევს, რაც მნიშვნელოვნად ტვირთავს როგორც ეროვნულ ქსელს, ისე ადგილობრივ ენერგომმართველ სისტემებს.

განვითარებად ქვეყნებში ან რეგიონებში, სადაც ელექტროსისტემა სუსტია ან ხშირია გათიშვები, პრობლემები უფრო მწვავედება. საწარმოებს უწევთ დიზელის გენერატორებზე გადასვლა ან სხვა ავტონომიურ გადაწყვეტილებებზე დაფუძნება, რაც ძვირადღირებული და დამატებითი გამონაბოლქვის წყაროა. ეს კი ამცირებს როგორც ეკონომიკურ ეფექტურობას, ისე გარემოსდაცვით მდგრადობას.

ცემენტის წარმოების ელექტროენერჯის მოთხოვნა წარმოადგენს არა მხოლოდ ტექნიკურ, არამედ ეკონომიკურ და ეკოლოგიურ გამოწვევას. ეს გავლენას ახდენს ხარჯებზე, პროდუქტიულობაზე, მდგრადობაზე და კონკურენტუნარიანობაზე. გამოწვევის დასაძლევად საჭიროა ინოვაციური მიდგომები, რაც იქნება მორგებული კონკრეტულ ადგილობრივ რეალობაზე.

ერთ-ერთი შესაძლო გამოსავალი არის განახლებადი ენერჯის წყაროების ინტეგრაცია, როგორცაა ქარის, მზის ან ჰიდროელექტროსისტემები. განსაკუთრებით საინტერესოა მცირე ზომის ვერტიკალური ღერძის ქარის ტურბინები (VAWT), რომლებიც ეფექტურად იყენებენ ხელმისაწვდომ სივრცეს და ბუნებრივ ქარიანობას. გარდა ეკონომიკური ფაქტორებისა, ენერგოუსაფრთხოებაც მნიშვნელოვანი მოტივატორია დამატებითი, განახლებადი ენერჯის წყაროების გამოყენებისა და ინტეგრაციისთვის, რაც საწარმოს ელექტრომომარაგებას უფრო მდგრადსა და გამძლეს ხდის. ცემენტის ქარხნები უწყვეტ რეჟიმში მუშაობენ და საჭიროებენ სტაბილურ ელექტრომომარაგებას. ელექტროენერჯის გათიშვა, ძაბვის ვარდნა ან სიხშირის ცვლილება იწვევს ტექნიკურ დაზიანებებს, წარმოების შეფერხებებს და განუსაზღვრელ დანაკარგებს. გენერატორები, როგორც დროებითი გამოსავალი, დიდ ხარჯებთან და საწვავზე დამოკიდებულებასთან არის დაკავშირებული. ამ მხრივ, ქარხნის ტერიტორიაზე განახლებადი ენერჯის გამომუშავება ამცირებს სისტემურ რისკებს და ზრდის პროცესების მდგრადობას.

გამოკვლეული ქარხნის შემთხვევაში, გამონაბოლქვის მილი წარმოდგენილია როგორც ოპტიმალური ადგილი განახლებადი ენერჯის ინტეგრაციისთვის.

ემისიის კომპურიდან ამოტყორცნილი ქარის ნაკადი ხასიათდება დაახლოებით 18.0 მ/წმ საშუალო ქარის სიჩქარით, რაც უზრუნველყოფს საიმედო პირობებს ენერჯის დასაგენერირებლად.

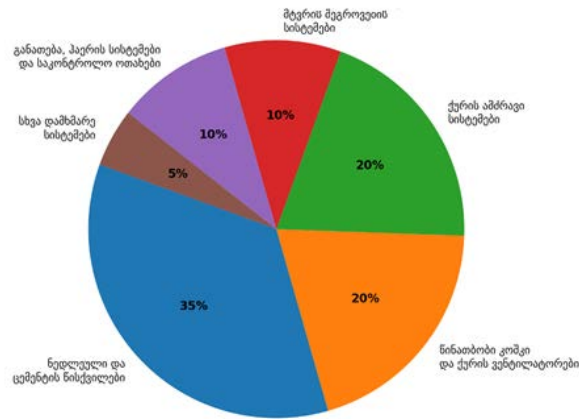
ცემენტის წარმოებაში არსებულ ენერგეტიკულ და ეკოლოგიურ გამოწვევებზე რეაგირების ფარგლებში, შემუშავებულია ინოვაციური ინიციატივა, ვერტიკალური ღერძის ქარის ტურბინის ინტეგრაცია ქარხნის გამონაბოლქვის მილის გამომავალ წერტილზე. იდეა ეფუძნება არსებული შიდა ჰაერის დინების გამოყენებას, რომელიც გამონაბოლქვის მილის შიგნიდან ზემოთ მიემართება. ეს მიდგომა შესაძლებელს ხდის განახლებადი ენერჯის მოპოვებას უშუალოდ საწარმოო პროცესების შეცვლის ან დამატებითი სივრცის ათვისების გარეშე. ძირითადი კონცეფცია მდგომარეობს იმაში, რომ გამოყენებულ იქნას გამონაბოლქვის მილში წარმოქმნილი ზემოთ მიმართული ჰაერის ნაკადი.

ვერტიკალური ღერძის ქარის ტურბინები განსაკუთრებით ეფექტურია ამ ტიპის გამოყენებისთვის, რადგან მათ შეუძლიათ მუშაობა არამარტო ჰორიზონტალურ, არამედ ვერტიკალურ ან არასტაბილურ ქარებში, განსხვავებით ჰორიზონტალური ღერძის ტურბინებისგან, რომლებიც მოითხოვენ მუდმივ და ერთმიმართულ ქარს.

კასპში მდებარე ცემენტის ქარხნის მაგალითზე, შიდა მონაცემთა ბაზაში ასახული დამონტაჟებული სიმძლავრისა და წარმოების მახასიათებლების გათვალისწინებით, ქარხნის ენერგომოხმარების შეფასება შეიძლება დაკონკრეტდეს მშრალი მეთოდით მომუშავე საწარმოებისთვის აღწერილ გლობალურ მაჩვენებლებთან შედარებით და მათზე დაყრდნობით. ინდუსტრიული გამონაბოლქვის ჰაერი, რომელიც მდგრადად გადაადგილდება მაღალი სიჩქარით, შეიცავს მნიშვნელოვან ენერგეტიკულ რესურსს — როგორცაა როგორც თერმული, ისე კინეტიკური ენერჯია. ამ ენერჯის სრულფასოვანი გამოყენება პირდაპირ უწყობს ხელს ქარხნის ენერგოეფექტიანობის გაუმჯობესებას და ეკოლოგიური ჰაერის ნაკადზე, რაც უზრუნველყოფს მუდმივ, პროგნოზირებად და სანდო ენერგეტიკულ წყაროს.

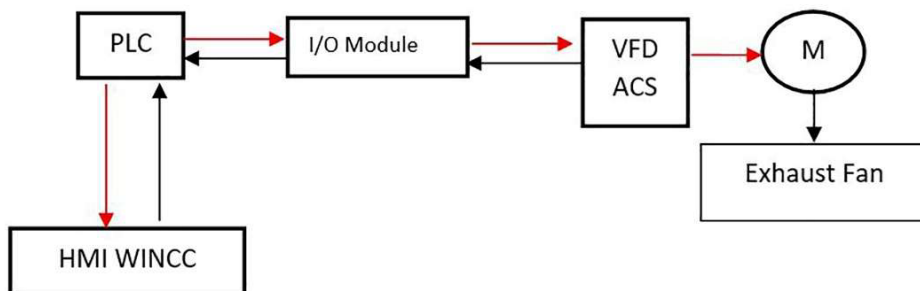
ნახ.4.-ზე წარმოდგენილია ცემენტის ქარხნის ელექტროენერჯის მოხმარების განაწილება ძირითადი ტექნოლოგიური სისტემების მიხედვით. ყველაზე მაღალი

წილი მოდის ნედლეულის და ცემენტის საფქვავ დანადგარებზე, რასაც მოსდევს პრეპიტერის კომპისა და ღუმლის ვენტილატორების სისტემა. აღნიშნული განაწილება ნათლად ასახავს წარმოების პროცესის ენერგოინტენსიურ უბნებს და მათი ოპტიმიზაციის პოტენციალს.



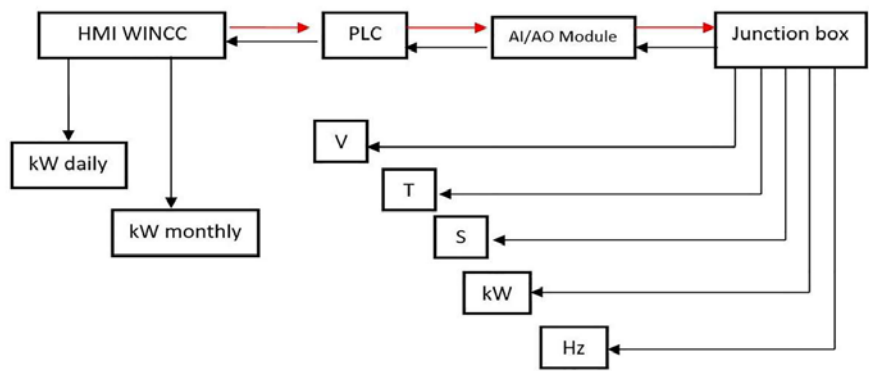
ნახ.4. ცემენტის ქარხნის ენერგიის მოხმარება სისტემების მიხედვით

იმისთვის, რომ ვერტიკალური ღერძის მქონე ქარის ტურბინამ შეძლოს სტაბილურად და დიდხანს ოპერირება, აუცილებელია ყურადღება მიექცეს მის ზოგად ტექნიკურ მდგომარეობას, განსაკუთრებით კი ტემპერატურების ზღვრებსა და ვიბრაციებს. ამ პარამეტრების რეგულარული კონტროლი უმნიშვნელოვანესია, რადგან მათმა უგულვებელყოფამ შეიძლება ისეთი პრობლემები გამოიწვიოს, რაც მიგვიყვანს დიდ ფინანსურ ზარალამდე. ძალზედ მნიშვნელოვანია იმ კომპიუტრის მუშა პროცესი, რომელიც უწყვეტი ნაკადით მოამარაგებს ტურბინას, ასევე მნიშვნელოვანია მისი მონიტორინგი და მონაცემების შეგროვების მეთოდოლოგია რაც შეგვიძლია ვიხილოთ წარმოდგენილ ნახ.5-ზე.



ნახ.5. ემისიის კომპის ფუნქციონირების სტრუქტურული სქემა (PLC/HMI)

აღნიშნულ ნახ.5-ზე ნაჩვენებია უშუალოდ იმ ემისიის კომპის მუშა პროცესის ავტომატიზაციის ციკლი, რაზეც იგეგმება ტურბინის მონიტორინგის და ნაჩვენებია თუ როგორ ხდება ინფორმაციის შეგროვება, რაც გამოიყურება შემდეგნაირად: არსებობს მოწყობილობა, ამ შემთხვევაში ელ.ძრავი, რაც ემსახურება გამონაბოლქვის კომპს რამაც ტურბინა უნდა მოამარაგოს ჰაერის უწყვეტი ნაკადით, სიხშირული გარდამქმნელი (ACS), ციფრული შესასვლელი და გამოსასვლელი მოდულები, პროგრამულ-ლოგიკური კონტროლერი იგივე PLC სადაც წერია ამ ბრძანებების სოფტი და მუშაობის ლოგიკა, შემდგომ ამ ყველაფრის ვიზუალიზაცია HMI.



ნახ.6. ქარის ტურბინის მონიტორინგის პარამეტრების შეგროვებისა და ვიზუალიზაციის სტრუქტურული სქემა

შემდგომ, ვაწყდებით მთავარ გამოწვევას, სადაც აუცილებელია შეგროვებული იქნას უწყვეტი მონიტორინგისთვის საჭირო მონაცემები უშუალოდ იმ ქარის ტურბინიდან, რომლის დამონტაჟებაც იგეგმება, აღნიშნული ინფორმაცია შეგვიძლია ვიხილოთ ნახ.6-ზე.

ქარის ტურბინიდან მიღებული მონაცემების შეგროვებისა და მონიტორინგის სისტემა მუშაობს შემდეგი სტრუქტურით: ტურბინიდან წამოსული სიგნალები ჯერ შედის Junction Box-ში, საიდანაც ისინი გადადის AI/AO მოდულზე. აღნიშნული მოდული პასუხისმგებელია მონაცემების შესაბამისი არხებით დამუშავებაზე და შემდგომ გადაცემაზე PLC-ში (Programmable Logic Controller). PLC უზრუნველყოფს მონაცემების მართვასა და დამუშავებას, ხოლო HMI WINCC ინტერფეისის მეშვეობით შესაძლებელია მონაცემების ვიზუალიზაცია და ოპერატორისთვის ხელმისაწვდომი ფორმით გამოჩენა. მონიტორინგის პროცესში

კონტროლდება შემდეგი ძირითადი პარამეტრები: V (ვოლტი) – ძაბვის მაჩვენებელი, რომელიც ტურბინის გენერატორის მუშაობის ელექტრული პარამეტრების შეფასებას ემსახურება; T (ტემპერატურა) – ტემპერატურული რეჟიმი, რომელიც მექანიკური ნაწილების გადახურების თავიდან აცილებისათვის არის მნიშვნელოვანი; S (სიჩქარე) – ტურბინის ბრუნვის სიჩქარე, რომელიც პირდაპირ კავშირშია წარმოებული ენერჯის რაოდენობასთან; კვტ (კილოვატი) – გამომუშავებული სიმძლავრის მაჩვენებელი, რომელიც ტურბინის რეალური ენერგოეფექტიანობისა და გამომუშავებული ელექტროენერჯის შეფასებისთვის გამოიყენება. Hz (ჰერცი) – სიხშირე, რომელიც განსაზღვრავს გამომავალი დენის სტაბილურობას და სისტემის ენერგოეფექტიან მუშაობას. კვტ დღე-დღიურად გამომუშავებული ელექტროენერჯის მაჩვენებელი, რომელიც საშუალებას იძლევა შეფასდეს ქარის ტურბინის ოპერირების ეფექტიანობა მოკლე დროის შუალედში. კვტ თვე – თვიურად გამომუშავებული ელექტროენერჯის მაჩვენებელი, რომელიც ასახავს ტურბინის საერთო პროდუქტიულობას გრძელვადიან პერსპექტივაში და იძლევა შესაძლებლობას მოხდეს ენერჯის გამომუშავების ტენდენციების ანალიზი.

აღნიშნული მონაცემები რეალურ დროში ინახება და მუშავდება ქარხანაში უკვე არსებულ სისტემებში, რაც იძლევა საშუალებას არა მხოლოდ მიმდინარე პროცესის მონიტორინგისთვის, არამედ ისტორიული მონაცემების ანალიზისა და ანგარიშებისთვის.

ამ პირობებში, რაღა თქმა უნდა, პრიორიტეტი ხდება მისი ტექნიკური მომსახურების გამართულობა, რაც მნიშვნელოვნად ხაზს უსვამს პრევენციული სერვისის სისტემის შექმნის აუცილებლობას ასევე გასათვალისწინებელია ის ფაქტორიც, რომ მხოლოდ მოწყობილობის დაყენება საკმარისი არ არის იმისთვის, რომ სისტემა სრულფასოვნად და გამართულად იმუშაოს. ტურბინის ოპერირებისას სისტემაზე მუდმივად ახდენენ ზემოქმედებას სხვადასხვა ტიპის ფიზიკური ფაქტორები, მათ შორის მექანიკური დატვირთვები, ვიბრაციული რხევები და ტემპერატურის ცვალებადობა.

ენერჯის პირდაპირი მიწოდების გარდა, ვერტიკალური ღერძის ქარის ტურბინას გააჩნია სიმბოლური და სტრატეგიული მნიშვნელობაც. სისტემა

აჩვენებს, რომ ინდუსტრიული სტრუქტურები, როგორცაა გამონაბოლქვის მიწები, შეიძლება გამოყენებულ იქნას ორმაგი დანიშნულებით, როგორც ტექნოლოგიური ელემენტები და როგორც სუფთა ენერჯის პლატფორმები. ეს ინიციატივა სრულ თანხვედრაშია გლობალურ დეკარბონიზაციის ტენდენციებთან და უზრუნველყოფს რეალურ მონაცემებს მომავალი პროექტების დასაგეგმად.

რომ შევაჯამოთ, კასპის ქარხანაში დაგეგმილი ვერტიკალური ღერძის ქარის ტურბინის სისტემა წარმოადგენს პრაქტიკულ და რეალისტურ გადაწყვეტილებას განახლებადი ენერჯის ეტაპობრივი ინტეგრაციისთვის. მიუხედავად იმისა, რომ მისი როლი ქარხნის საერთო ენერგომომხმარების სრულ ჩანაცვლებას არ გულისხმობს, სისტემა უზრუნველყოფს მნიშვნელოვნად გამოსადეგ ნაწილობრივ მიწოდებას და შეუძლია კონკრეტული დაბალვოლტაჟიანი სერვისებისა და დამხმარე დატვირთვების მხარდაჭერა. აღნიშნული პროექტი ქმნის მყარ საფუძველს მომავალში მასშტაბირებადი სუფთა ენერჯის დანერგვისთვის, ზრდის ენერგეტიკული დივერსიფიკაციის შესაძლებლობას და ამცირებს საწარმოს გარემოზე ზემოქმედებას, მათ შორის ნახშირბადულ ნაკვალევს.

მეოთხე თავში მოყვანილია ვერტიკალური ღერძის ქარის ტურბინის შერჩევის დასაბუთება ჰორიზონტალური ღერძის ქარის ტურბინასთან შედარებით. ტურბინის სწორი არქიტექტურის შერჩევა განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია მაშინ, როდესაც ქარის რესურსი არ არის ჩვეულებრივი ატმოსფერული ქარი, არამედ ინდუსტრიული პროცესით წარმოქმნილი მიმართული ჰაერის დინებაა. მოცემულ პროექტში მამოძრავებელი „ქარი“ წარმოადგენს გამონაბოლქვის მილთან დაკავშირებულ გამოსასვლელ ნაკადს, სადაც ჰაერი ძირითადად სისტემის ქვედა ნაწილიდან ზემოთ გადაადგილდება და ქმნის აღმავალ დინებას, რომელიც ქარხნის მუშაობის პერიოდში მუდმივად არსებობს. თუმცა, პრაქტიკული ელექტროგენერაციისთვის მნიშვნელოვანია, რომ ტურბინამ მიიღოს ეფექტური ენერჯია არა მხოლოდ ამ დინებიდან, არამედ ემისიის კოშკურის სიმაღლეზე არსებული გარემო ჰორიზონტალური ქარის ველიდანაც, რომელიც ინდუსტრიულ ობიექტებთან ახლოს ხშირად ხასიათდება ტურბულენტობითა და მიმართულების ცვალებადობით. სწორედ ამიტომ, ამ

შემთხვევაში ვერტიკალური ღერძის ქარის ტურბინა (VAWT) უფრო მიზანშეწონილია, ვიდრე ჰორიზონტალური ღერძის ქარის ტურბინა (HAWT).

შედეგად, წარმოიქმნება პრინციპული შეუსაბამობა ჰორიზონტალური ღერძის ქარის ტურბინის ოპტიმალურ აეროდინამიკურ მოთხოვნებსა და რეალურ შემომავალ პირობებს შორის, რადგან ჰორიზონტალური ღერძის ქარის ტურბინა განსაკუთრებით მგრძობიარეა „დაშლილ“ და ტურბულენტურ დინებაზე, ასევე მუდმივი ორიენტაციის სისტემის მუდმივ კორექციებზე. ამის საპირისპიროდ, ვერტიკალური ღერძის ქარის ტურბინა კონსტრუქციულად და აეროდინამიკურად უკეთ ერგება ისეთ ობიექტს, სადაც შესაძლებელია პროცესით წარმოქმნილი მიმართული დინების ენერჯის აღება ვერტიკალური სტრუქტურის უშუალო სიახლოვეს. ვერტიკალური ღერძის ქარის ტურბინის როტორი ბრუნავს ვერტიკალური ღერძის გარშემო და, როგორც წესი, არ საჭიროებს მუდმივი ორიენტაციის მექანიზმს ქარის მიმართულების „დაჭერისთვის“.

კიდევ უფრო მნიშვნელოვანი ის არის, რომ ვერტიკალური ღერძის ქარის ტურბინა განთავსდება ემისიის კოშკურის გამომავალი ნაკადის ზონაში და მისი მუშაობა დაფუძნებულია სწორედ იმ აღმავალ დინებაზე, რომელიც მილიდან ქარხნის მუშაობისას უწყვეტად გამოიტყორცნება. შესაბამისად, ვერტიკალური ღერძის ქარის ტურბინის არჩევა ჰორიზონტალური ღერძის ქარის ტურბინის ნაცვლად პირველ რიგში განპირობებულია გამონაბოლქვის კოშკურის გარშემო ხელმისაწვდომი ქარის რესურსის ხასიათით და ქარხნის მონტაჟის/ექსპლუატაციის პრაქტიკული შეზღუდვებით.

ცემენტის ქარხანაში მუშაობისას პრიორიტეტულია უსაფრთხოება, სერვისის ხელმისაწვდომობა და მინიმალური ჩარევა არსებულ ინფრასტრუქტურაში. ამ მხრივ ვერტიკალური ღერძის ქარის ტურბინას ჰორიზონტალური ღერძის ქარის ტურბინასთან შედარებით აქვს აშკარა პრაქტიკული უპირატესობები:

- კომპაქტური გეომეტრია და შედარებით მარტივი მონტაჟი გარე კონსტრუქციაზე;
- ნაკლები საჭიროება ფართო „კლირენსებზე“ (ბრუნვადი გრძელი ფრთების უსაფრთხო ზონა) შედარებით ჰორიზონტალური ღერძის ქარის ტურბინასთან;

- უფრო მარტივად რეალიზებადი ვიზრაციის იზოლაცია და სტრუქტურულ დატვირთვებთან მართვა ემისიის კოშკზე.

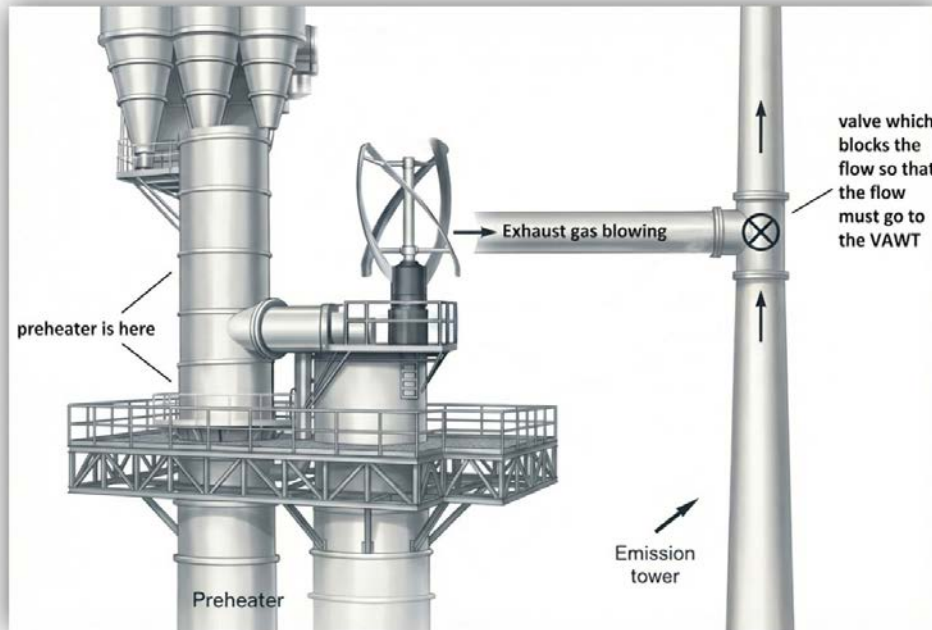
ქარის ტურბინები ქარის სიჩქარესთან ერთად უსასრულოდ არ ზრდიან გამომუშავებას. ისინი აღწევენ ნომინალურ ზონას, სადაც სისტემა გათვლილია დაახლოებით ნომინალური სიმძლავრის გამომუშავებაზე (ამ შემთხვევაში 20 კვტ) და შემდეგ გამომუშავებას ზღუდავს, რათა დაიცვას მექანიკური და ელექტრული კომპონენტები.

შემოთავაზებული ვერტიკალური ღერძის ქარის ტურბინის მიერ წლის განმავლობაში გამომუშავებული ელექტროენერჯის შესაფასებლად გამოიყენება ნომინალურ სიმძლავრეზე დაფუძნებული ენერგომოდელი. ვინაიდან ტურბინა გათვლილია უწყვეტ მუშაობაზე და მისი ფუნქციონირება მხარდაჭერილია გამონაბოლქვის გამოსასვლელი ნაკადით, წლიური ენერგოგენერაციის შეფასება შესაძლებელია ტევადობის ფაქტორის სტანდარტული მიდგომით:

$$E_{წლ.} = P_{ტურბ.} \times 8760 \times CF$$

სადაც: $E_{წლ.}$ - არის წლიური ენერგოგენერაცია (კვტსთ/წელი); $P_{ტურბ.}$ - ტურბინის ნომინალური ელექტრული სიმძლავრე (კვტ); 8760 — ერთ წელიწადში საათების რაოდენობა (24×365); CF — ეფექტური სიმძლავრის კოეფიციენტის ფაქტორი. რეალურ ექსპლუატაციაში წლიური გამომუშავება გარკვეულწილად მცირდება ტექნიკური მომსახურების გამო გაჩერებების, ინვერტორის/გარდაქმნის დანაკარგებისა და მაღალი დინების სიჩქარეებზე მოქმედი კონტროლის ალგორითმების შედეგად.

შემოთავაზებული ვერტიკალური ღერძის ქარის ტურბინა დამონტაჟდება გამონაბოლქვის მილის გამომავალ წერტილთან (ნახ.7. ეს მდებარეობა არ არის არჩეული მხოლოდ მოხერხებულობის გამო; იგი განსაზღვრულია იმიტომ, რომ მილის გამომავალი წერტილის არსებული ზონა უზრუნველყოფს ჰაერის ნაკადის ხელმისაწვდომობის, ინტეგრაციის პრაქტიკულობის და ქარხნის პირობებში რეალიზებადობის საუკეთესო კომბინაციას. რადგან ტურბინა განკუთვნილია ინდუსტრიულ გარემოში მუშაობისთვის სადაც უსაფრთხოება, საიმედოობა და მოვლა-შენარჩუნება კრიტიკულია, მონტაჟის ადგილი უნდა იყოს დასაბუთებული როგორც ენერგეტიკული, ისე საინჟინრო არგუმენტებით.



ნახ.7. ვერტიკალური ღერძის ქარის ტურბინის მონტაჟის ადგილი

გამონაბოლქვის მილი წარმოადგენს ობიექტზე ერთ-ერთ ყველაზე მაღალ და ყველაზე „ღია“ (ექსპოზირებულ) კონსტრუქციას, რომელიც ქარხნის მუშაობის პერიოდში დაკავშირებულია აღმავალ გამოსასვლელ დინებასთან. სწორედ ამ მიზეზით, პროექტში ენერჯის აღების ზონად არჩეულია ემისიის მილის გამომავალი წერტილი, თუმცა არა ისე, რომ ტურბინა გახდეს გამონაბოლქვის ერთადერთი გასავლელი არხი. უსაფრთხოებისა და უწყვეტი ექსპლუატაციის უზრუნველსაყოფად, იგეგმება დამატებითი (მეორადი) გამონაბოლქვის მილის მოწყობა, რომელიც იქნება დაკავშირებული მთავარ სტეკთან და აღჭურვილი იქნება გადამრთველი სარქველებით/დამპერებით.

ამ გადაწყვეტის არსი მდგომარეობს იმაში, რომ სტეკიდან გამომავალი ნაკადი საჭიროების მიხედვით გადაირთვება ორ ალტერნატიულ მიმართულებაზე:

1. ძირითადი გამომავალი არხი — სტეკის სტანდარტული გამონაბოლქვის გზა ატმოსფეროში;
2. მეორადი გვერდის ავლითი არხი — დამატებითი მილი, რომელიც ნაკადს მიიყვანს იმ მიმართულებით/კონფიგურაციით, რომ იგი ეფექტურად მოხვდეს ძლიერ კონსტრუქციაზე განთავსებულ ვერტიკალური ღერძის ქარის ტურბინაში,

სადაც მოხდება ჰაერის ნაკადის კინეტიკური ენერჯის გარდაქმნა ელექტროენერჯიად.

რეალიზების კუთხით, არსებული სტრუქტურების გამოყენება ამცირებს ახალი ქარის ანძისა და სამირკვლის მოწყობის საჭიროებას, შესაბამისად მცირდება სამოქალაქო სამუშაოების მოცულობა, მიწის გამოყენება და მონტაჟის სირთულე. ამასთან, გვერდითი ავლის კონცეფცია კრიტიკულად მნიშვნელოვანია საიმედოობისა და წარმოების უწყვეტობისთვის: ქარის ტურბინის დაზიანების ან გეგმიური ტექნიკური მომსახურების შემთხვევაში, ოპერატორს ექნება შესაძლებლობა სარქველებით სრულად გახსნას ძირითადი სტეკის გამონაბოლქვის გზა, ხოლო მეორად გვერდითი ავლის არხზე დინება შეზღუდოს/ჩაკეტოს, რის შედეგადაც ტურბინის სარემონტო სამუშაოები შესრულდება ქარხნის გაჩერების გარეშე და მინიმალური ტექნოლოგიური რისკით.

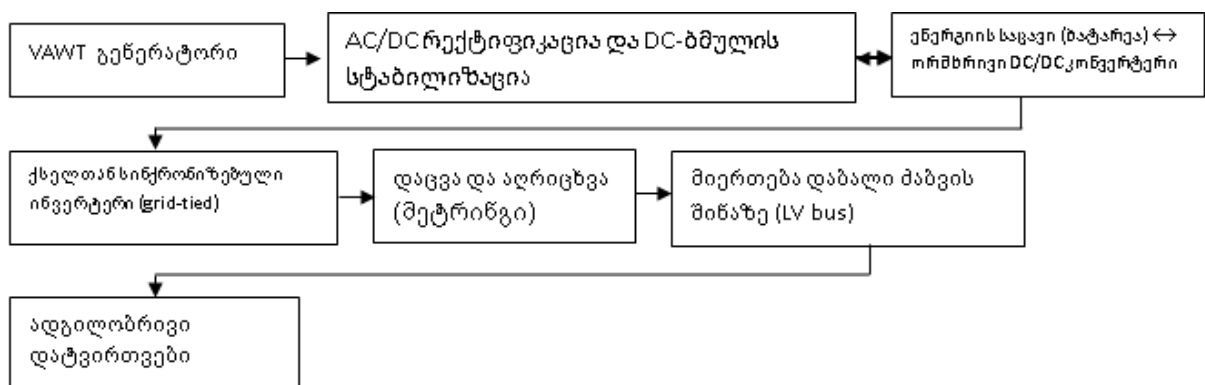
შედეგად, არჩეული ლოკაცია და ორ-არხიანი გადაწყვეტა ერთდროულად უზრუნველყოფს: (ა) გამონაბოლქვის დინებასთან მაქსიმალურად ახლო ურთიერთქმედებას ენერჯის გენერაციისთვის; (ბ) ქარხნის ტექნოლოგიური პროცესების შეუფერხებელ მუშაობას ავარიულ/სერვის სიტუაციებში; და (გ) ინდუსტრიული ინფრასტრუქტურის მრავალფუნქციურ აქტივად გარდაქმნის იდეის პრაქტიკულ განხორციელებას.

მეხუთე თავში წარმოდგენილია ცემენტის ქარხანაში ვერტიკალური ღერძის ქარის ტურბინის DC-დაკავშირებული ინტეგრაციისთვის ბატარეის ენერჯის დაგროვების სისტემა. ბატარეის ენერჯის დაგროვება წარმოადგენს ერთ-ერთ ყველაზე მნიშვნელოვან „გამამარტივებელ“ ელემენტს შემოთავაზებულ ვერტიკალური ღერძის ქარის ტურბინის ენერჯოარქიტექტურაში, განსაკუთრებით მაშინ, როდესაც პროექტის მიზანია ქარხნის კონკრეტული სექციის საიმედო, ყოველდღიური მხარდაჭერა ცემენტის ქარხნის პირობებში ელექტრული დატვირთვა უწყვეტია და ოპერაციების უწყვეტობა კრიტიკულია, მაშინ როცა განახლებადი გენერაცია თუნდაც გამონაბოლქვის ნაკადით მხარდაჭერილი მაინც შეიძლება იცვლებოდეს პროცესული პირობების, კონტროლის მოქმედებების ან ტექნიკური მომსახურების გამო. სწორად შერჩეული ბატარეის სისტემა ზრდის ქარის ენერჯის ინტეგრაციის პრაქტიკულობას, რადგან უზრუნველყოფს

მოკლევადიან ბუფერირებას, კონტროლირებად ენერგომიწოდებას და ოპერაციულ მოქნილობას დაბალძაბვიან დონეზე.

შემოთავაზებული ვერტიკალური ღერძის ქარის ტურბინის ელექტრული ინტეგრაცია ეფუძნება დეცენტრალიზებული გენერაციის არქიტექტურას, რომლის მიხედვითაც ტურბინის გამომავალი ენერგია პირველ რიგში გადაიყვანება კონტროლირებად DC ფორმატში, საჭიროების შემთხვევაში ხდება მისი გაცვლა/ინტერაქცია ბატარეის ენერჯის დაგროვების სისტემასთან, ხოლო შემდეგ ქსელთან სინქრონიზებული ინვერტორის მეშვეობით მიეწოდება ქარხნის დაბალძაბვიან განაწილების ქსელს. პრაქტიკული თვალსაზრისით, ენერჯის სრული ნაკადი, როგორც ეს ასახულია სისტემის ბლოკ-სქემაში (ნახ.8) შეიძლება შეჯამდეს შემდეგნაირად:

რადგან ტურბინა ცვლადი ბრუნვის სიჩქარით მუშაობს, გენერატორის ტერმინალებზე მიღებული ელექტრული სიმძლავრე პირდაპირ არ არის შესაფერისი ქარხნის განაწილების სისტემასთან დასაერთებლად. მცირე და საშუალო სიმძლავრის ვერტიკალური ღერძის ქარის ტურბინაში გენერატორის გამომავალი, როგორც წესი, არის ცვლადი სიხშირის AC. შესაბამისად, საჭიროა AC/DC გარდაქმნის ეტაპი, რათა მივიღოთ DC გამომავალი, რომლის რეგულირებაც შესაძლებელია და რომელსაც შემდეგი ძალოვანი ელექტრონიკა საიმედოდ გამოიყენებს.შემოთავაზებულ სისტემაში ეს მიიღწევა რექტიფიკატორის და შემდგომ DC-ლინკის მეშვეობით, რაც ქმნის სტაბილიზებულ DC „ბასს“ ენერჯის გადაცემისა და ინვერტორის მუშაობისთვის.



ნახ.8. ვერტიკალური ღერძის ქარის ტურბინის გამომუშავების ინტეგრაციის ბლოკ-სქემა ქარხნის დაბალძაბვიან განაწილების სისტემაში

შემოთავაზებული ინტეგრაციის სქემის ერთ-ერთი მთავარი მახასიათებელია ბატარეის ენერჯის დაგროვების სისტემის ჩართვა სისტემის DC მხარეს. ბატარეა DC-ლინკს უკავშირდება ორმხრივი DC/DC გარდამქმნელის მეშვეობით. აღნიშნული კომპონენტი აუცილებელია, რადგან ბატარეის ძაბვა იცვლება დამუხტვის დონესა და სამუშაო პირობებზე დამოკიდებულებით, მაშინ როცა DC-ლინკი უნდა შენარჩუნდეს იმ კონტროლირებად დონეზე, რომელიც საჭიროა ინვერტორის სტაბილური მუშაობისთვის. ორმხრივი DC/DC გარდამქმნელი უზრუნველყოფს მართვად დამუხტვასა და განმუხტვას და ენერჯის ორმხრივ ნაკადს:

- **დამუხტვის რეჟიმი:** ტურბინის ზედმეტი სიმძლავრე DC-ლინკი DC/DC ბატარეა;
- **განმუხტვის რეჟიმი:** ბატარეა DC/DC DC-ლინკი ინვერტორი დაბალი ძაბვის დატვირთვები

ეს DC-ზე „დაკავშირებული“ დაგროვების არქიტექტურა კარგად შეესაბამება ინდუსტრიულ გარემოს, რადგან ტურბინის გამომუშავებაში არსებული მოკლევადიანი რყევები შესაძლებელია DC მხარეს „დაბუფერდეს“, რაც ზრდის დაბალი ძაბვის დატვირთვაზე მიწოდებული ენერჯის სტაბილურობას.

DC-ის კონდიციონირების (და ბატარეასთან შესაძლო ენერგო-გაცვლის) შემდეგ, ქსელზე მიერთებული ინვერტორი გარდაქმნის რეგულირებულ DC სიმძლავრეს AC ენერჯიად, რომელიც სინქრონიზებულია ქარხნის დაბალი ძაბვის დატვირთვასთან (მაგ., 400 V, სამფაზიანი ქარხნის სტანდარტიდან გამომდინარე). ამგვარად, ინვერტორი წარმოადგენს ქარხნის ქსელთან მთავარ ინტერფეისს და ასრულებს სამ ძირითად ფუნქციას. პირველ რიგში, ქმნის კონტროლირებად AC გამომავალს, რომელიც თავსებადია დაბალ ძაბვასა და სიხშირესთან. მეორეც, მართავს ენერჯის ხარისხს, ზღუდავს ჰარმონიკებს და უზრუნველყოფს სტაბილურ მუშაობას ინდუსტრიული დატვირთვების პირობებში. მესამეც, ახორციელებს ოპერაციულ მართვას, როგორცაა კონტროლირებადი „გადატვირთვა/შემცირება“ და ავარიულ შემთხვევებში უსაფრთხო გამორთვა.

ოპერაციული თვალსაზრისით, ინვერტორის გამომავალის დაბალი ძაბვის დატვირთვისას დაკავშირება საშუალებას იძლევა განახლებადი ენერგია ადგილობრივად იქნას გამოყენებული ქარხნის შიგნით.

სტაციონარული ინდუსტრიული დაგროვებისთვის ყველაზე გავრცელებული ორი ტექნოლოგიაა ტყვია-მჟავა და ლითიუმ-იონი. ტყვია-მჟავა ბატარეები ფართოდ არის ცნობილი და ისტორიულად ხშირად გამოიყენებოდა ინდუსტრიულ სარეზერვო სისტემებში, თუმცა ისინი, როგორც წესი, ნაკლებად შესაფერისია ხშირი ციკლირებისთვის. რეგულარული და ღრმა განმუხტვის პირობებში ტყვია-მჟავა ბატარეებს უფრო სწრაფად ეცემა ტევადობა და უმცირდებათ სიცოცხლის ხანგრძლივობა. გარდა ამისა, ერთსა და იმავე გამოსადეგ ენერგიაზე ისინი უფრო დიდი და მძიმეა, რაც სივრცის შეზღუდვისას მონტაჟს ართულებს.

ლითიუმ-იონური ბატარეები, პირიქით, კარგად ერგება ხშირ ციკლირებას და დღეს ფართოდ გამოიყენება სტაციონარულ ენერჯის დაგროვებაში. ინდუსტრიული გამოყენებისთვის. ლითიუმ-იონურ სისტემებს, როგორც წესი, აქვთ უფრო მაღალი „წრიული ეფექტიანობა“, რაც ნიშნავს, რომ დამუხტვა-განმუხტვის შემდეგ გენერირებული ენერჯის უფრო დიდი წილი რეალურად მიეწოდება დატვირთვებს.

შეჯამების სახით, ბატარეის ენერჯის დაგროვება წარმოადგენს იმ საკვანძო კომპონენტს, რომელიც ვერტიკალური ღერძის ქარის ტურბინა მხოლოდ „მომენტური“ გენერატორიდან გარდაქმნის კონტროლირებად და საიმედო მხარდასაჭერ სისტემად შერჩეული დაბალი ძაბვის დატვირთვების ჯგუფისთვის.

შემოთავაზებული ვერტიკალურ ღერძიანი ქარის ტურბინის სისტემისთვის ინვერტორი წარმოადგენს მთავარ ინტერფეისს DC-დაკავშირებულ ქარის-ბატარეის ქვესისტემასა და ქარხნის დაბალი ძაბვის დატვირთვისა და ქსელს შორის. არჩეულ არქიტექტურაში გენერატორის გამომავალი რექტიფიკაციით გადაიყვანება და სტაბილიზდება DC-ლინკზე; ბატარეა DC-ლინკთან ენერჯის ცვლის ორმხრივი DC/DC გარდამქმნელის საშუალებით; ხოლო ინვერტორი რეგულირებულ DC სიმძლავრეს გარდაქმნის სინქრონიზებულ AC ენერჯად დაბალი ძაბვის დატვირთვაზე დასაერთებლად. შესაბამისად, ინვერტორმა უნდა

უზრუნველყოს როგორც მაღალი ხარისხის ენერგოგარდაქმნა, ასევე ქსელის მოთხოვნებთან შესაბამისი მუშაობა საერთო მიერთების წერტილში.

ამ პროექტში შერჩეულია 25 კვტ სიმძლავრის სამფაზა, ქსელზე მიერთებადი ინვერტორი. 25 კვტ ნომინალი შეგნებულად არის არჩეული, რათა არსებობდეს ოპერაციული მარაგი ტურბინის ნომინალურ სიმძლავრეზე (20 კვტ) ზემოთ. აღნიშნული მარაგი ხელს უწყობს სტაბილურ მუშაობას გარდამავალ რეჟიმებში, ითვალისწინებს ტემპერატურული დერეიტინგის შესაძლო გავლენას და ამცირებს ინვერტორის გადატვირთვის ალბათობას.

იმისთვის, რომ შემოთავაზებული ვერტიკალური ღერძის ქარის ტურბინა-ბატარეის სისტემა რეალისტურ ქარხნულ მოთხოვნას მაქსიმალურად დაემთხვეს, ჩატარებული იქნა მიზნობრივი დატვირთვის კვლევა ცემენტის საფქვავეების საპოხი სისტემების ტუმბოების ძრავებზე. იმის ნაცვლად, რომ შერჩეულიყო შემთხვევითი „სანიმუშო დატვირთვა“, კვლევა დაეყრდნო ერთთვიან ოპერაციულ ისტორიას, რომელიც ამოღებულია ქარხნის **PxTrend** მონიტორინგის სისტემიდან. PxTrend უზრუნველყოფს ძრავების მუშაობის სტატუსსა და მუშაობის საათების ისტორიაზე წვდომას, რაც შესაძლებელს ხდის თითოეული ძრავის დღიური და თვიური გამოყენებადობის რაოდენობრივ შეფასებას და ენერგომოთხოვნის მტკიცებულებაზე დაფუძნებულ შეფასებას. მუშაობის ისტორიის გასაგებ თვიურ ენერგო-მაჩვენებლად გადასაყვანად შეიძლება გამოყენებულ იქნეს სტანდარტული 30-დღიანი თვის რეფერენსი. თუ ცემენტის წისქვილი მუშაობს უწყვეტად 30 დღის განმავლობაში, მაშინ შესაბამისი მუშა ლუბრიკაციის ტუმბო იმუშავებს:

$$t = 30 \times 24 = 720 \text{ საათი/თვე}$$

ვინაიდან მუშა ლუბრიკაციის ტუმბოს ძრავის სიმძლავრე არის 1.5 კვტ, ერთი წისქვილისთვის უწყვეტი მუშაობის პირობებში თვიური ენერგომოხმარება იქნება:

$$E_{\text{ტუმბ.}} = \text{PXT} = 1,5 \times 720 = 1080 \text{ კვტ.სთ/თვეში}$$

მაგალითად, თუ ერთნაირი რეჟიმით მუშაობს $n = 4$ ანალოგიური ლუბრიკაციის ტუმბოს ძრავა (მაგალითად, 4 ცეხი/4 წისქვილი), მაშინ მთლიან თვიურ მოხმარებას ვიღებთ ჯამურად:

$$E_{\text{ჯამური}} = n \times E_{\text{ტუმბ.}} = 4 \times 1080 = 4320 \text{ კვტ.სთ/თვეში}$$

ეს გამოთვლები უზრუნველყოფს მკაფიო საბაზისო შეფასებას „ტიპური“ თვისთვის, როდესაც ოთხივე საფეხავი უწყვეტ რეჟიმში მუშაობს. პრაქტიკაში, Pxtrend-ის მიერ დაფიქსირებული მუშაობის საათების ჩანაწერები შეიძლება აჩვენებდეს ოდნავ უფრო დაბალ მნიშვნელობებს დაგეგმილი ტექნიკური გაჩერებების ან ოპერაციული შეფერხებების გამო, ხოლო იგივე განტოლებები პირდაპირ გამოიყენება თითოეული საფეხავისთვის Pxtrend-ში დაფიქსირებული თვიური საათების ჩასმით.

Pxtrend-ის გამოყენებით თითოეული საფეხავისთვის გამოითხოვება მუშა ტუმბოს თვიური მუშაობის საათები, ხოლო თითო საფეხავზე ლუბრიკაციის ენერგომომხმარება გამოითვლება შემდეგნაირად:

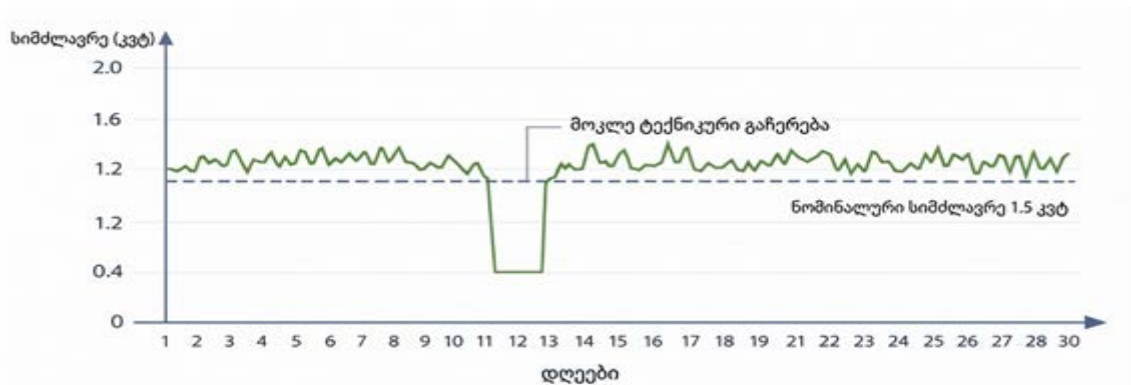
$$E_{\text{ლუბრ.ე.მ}} = 1,5X t_{\text{მუშა}}$$

სადაც, $t_{\text{მუშა}}$ არის მუშა ტუმბოს სამუშაო დრო (საათი/თვე), რომელიც მიიღება Pxtrend-იდან. შესაბამისად, ქარხნის მასშტაბით ლუბრიკაციის სისტემების მთლიანი ენერგომომხმარება გამოითვლება ასე:

$$E_{\text{ლუბრ.ე.მ.ჯამ}} = \sum_j^4 (1,5 X t_j)$$

სადაც, t_j - წარმოადგენს j -ე საფეხავისთვის მუშა ლუბრიკაციის ტუმბოს თვიურ სამუშაო საათებს (საათი/თვე), რომლებიც მიღებულია Pxtrend-ის მონაცემებიდან.

ასევე მაგალითის სახით ნახ. 9-ზე წარმოდგენილია CM01-001 ცემენტის წისქვილების ლუბრიკაციისთვის განკუთვნილი მთავარი ელექტროძრავების მუშაობის თვიური დაკვირვებების ვიზუალური მასალა, რომელიც მიღებულია ქარხნის შიდა მონიტორინგის Pxtrend სისტემიდან.



ნახ.5.2. CM01 -001 ცემენტის წისქვილზე დაკვირვების გრაფიკი

ეს მიდგომა იძლევა რეალისტურ და ქარხნისთვის სპეციფიკურ დატვირთვის შეფასებას, რომელიც ეფუძნება რეალურად დაფიქსირებულ ექსპლუატაციურ მონაცემებს.

თანხობრივი სარგებელი „სუფთა“ ელექტროენერჯის გამომუშავებიდან.

პროექტის ფარგლებში მიღებული მაქსიმალური სცენარით, ვერტიკალური ღერძის ქარის ტურბინის სისტემის წლიური გამომუშავება შეადგენს დაახლოებით 175,200 კვტ.სთ/წელიწადში. თუ ეს ენერჯია სრულად გამოიყენება ქარხნის შიდა მოხმარებისთვის და ჩანაცვლებს ქსელიდან შექმნილ ელექტროენერჯიას, მაშინ თითოეული გამომუშავებული 1 კვტ.სთ ნიშნავს 0.273 ლარის პირდაპირ დაზოგვას. ამ დაშვებით, „სუფთა“ ენერჯის მიერ შექმნილი ფინანსური ეფექტი შეადგენს:

- წლიურად: დაახლოებით 47,830 ლარი /წელს
- თვეში (საშუალოდ): დაახლოებით 3,986 ლარი/თვეში

შესაბამისად, განახლებადი წყაროდან მიღებული ელექტროენერჯია არა მხოლოდ ამცირებს ქსელზე დამოკიდებულებას, არამედ დამატებით ქმნის პირდაპირ ეკონომიურ სარგებელს ყოველთვიურად რამდენიმე ათასი ლარის, ხოლო წლიურად რამდენიმე ათეული ათასი ლარის მასშტაბით, მხოლოდ ელექტროენერჯის ტარიფის ჩანაცვლებით.

დასკვნა

სადისერტაციო სამუშაოში დადგენილია რომ:

- რომ მართვის უმარტივესი და ყველაზე გავრცელებული მეთოდია ქარის ტურბინის მუდმივი სიჩქარით მუშაობა. თუმცა, ამ კონტროლით მომუშავე ქარის ტურბინებს არ შეუძლიათ ქარის სიჩქარის ფართო დიაპაზონში ეფექტური მუშაობის უზრუნველყოფა და საჭიროებენ დამატებით მექანიზმებს.
- ქარის ტურბინის სტრუქტურის დასაცავად ჭარბი ქარის სიმძლავრის შემთხვევაში. ქარის ტურბინის ფართო სიჩქარეზე მუშაობის უზრუნველყოფის

ყველაზე ეფექტური მეთოდია ცვლადი ქარის ტურბინის სიჩქარით მუშაობა წინასწარ განსაზღვრული ალგორითმის მიხედვით.

- შემუშავებულია ქარის ტურბინის უნივერსალური კომპიუტერული მოდელი, რომელიც ახდენს ქარის ტურბინის მუშაობის სიმულირებას მაღალი დონის ენაზე განსაზღვრული ალგორითმის კონტროლის ქვეშ.

- MATLAB/Simulink გარემოში სიმულაციის კომპიუტერული მოდელების შემუშავების შედეგად შეიქმნა უნივერსალური ქარის ტურბინის მოდელი, რომელიც შედგება ქარის ენერჯის გენერაციის, ქარის ტურბინის, ელექტროგენერატორის, უნივერსალური ქარის ტურბინის კონტროლერის მოდულებისაგან, რომლებიც უზრუნველყოფენ ქარის ტურბინის მუშაობას მითითებული ალგორითმის მიხედვით და შექმნილია ქარის ტურბინის სიმულაციის კონტროლის სხვადასხვა ალგორითმებისა და მეთოდების შესასწავლად;

- განხილულ იქნა ცემენტის ქარხნის ენერგოსისტემის მდგრადობის გაუმჯობესების პრაქტიკული გზა, რომლის საფუძველიცაა მწვანე ენერჯის ინტეგრაცია რეალისტური და დაბალი რისკის მქონე მიდგომით. ვინაიდან ცემენტის წარმოება უწყვეტ რეჟიმში მუშაობს და სტაბილურ ელექტრომომარაგებაზეა დამოკიდებული, განახლებადი ენერჯის თუნდაც ნაწილობრივი წვლილი შეიძლება იყოს მნიშვნელოვნად სასარგებლო, როდესაც იგი მიზანმიმართულად მიეწოდება მაღალი ხელმისაწვდომობის მქონე დაბალი ძაბვის დატვირთვებს და ხორციელდება ისე, რომ არ დაირღვეს ძირითადი წარმოების სტაბილურობა.

- კვლევის მთავარი ინოვაცია მდგომარეობს იმაში, რომ ქარის რესურსი არ განიხილება მხოლოდ როგორც ატმოსფერული ქარი. ამის ნაცვლად, შემოთავაზებული ვერტიკალური ღერძის ქარის ტურბინა გათვლილია ემისიის მილში არსებული ზემოთ მიმართული ჰაერის/გაზის ნაკადის გამოყენებაზე, რომელიც ქარხნის ნორმალური მუშაობის თანმდევი პროდუქტია. ჩარევის გარეშე ეს გამონაბოლქვით განპირობებული ნაკადი უბრალოდ ტოვებს მილს და პრაქტიკულად იკარგება, როგორც გამოუყენებელი კინეტიკური ენერჯია.

- ვერტიკალური ღერძის ქარის ტურბინის დაყენებით გამოსასვლელის ზონაში, პროექტი გარდაქმნის წარმოების პროცესის „ჩვეულებრივად დაკარგულ“ თანმდევ ნაკადს სასარგებლო ელექტროენერგიად, რაც ამყარებს იდეას, რომ ინდუსტრიული ინფრასტრუქტურა შეიძლება გახდეს მრავალფუნქციური და უფრო მდგრადი ქარხნის ძირეული გადაკეთების გარეშე.
- კონცეფციის ტექნიკური სანდოობის უზრუნველსაყოფად, კვლევა დაეყრდნო დაკვირვებით მონაცემებსა და კონკრეტული ქარხნის პირობების შესწავლას და არა ზოგად ვარაუდებს. ქარის/ნაკადის ქცევა შეფასდა რამდენიმე თვეზე, ხოლო დატვირთვების შერჩევა გამყარებულ იქნა მონიტორინგითა და საოპერაციო ჩანაწერებით (მათ შორის Pxtrend-ის საფუძველზე ჩატარებული მუშაობის საათების ანალიზით ლუბრიკაციის duty ტუმბოებისთვის).
- ელექტრული ნაწილის მხრივ შემუშავებულ იქნა პრაქტიკული ინტეგრაციის არქიტექტურა (რექტიფიკატორი/DC-ბმული, სურვილისამებრ DC-დაკავშირებული აკუმულატორული სისტემა და ქსელთან სინქრონიზებული ინვერტორი), სადაც ყურადღება გამახვილდა დაცვაზე, აღრიცხვაზე და დაბალი ძაბვის ქსელზე უსაფრთხო მიერთების პრინციპებზე, რაც მოქმედ ცემენტის ქარხანაში დანერგვისთვის შესაბამისია.
- განახლებადი ენერჯის ინტეგრაცია თანამედროვე ცემენტის ქარხნებისთვის აუცილებელია არა მხოლოდ ხარჯების სტაბილურობისა და ენერგოუსაფრთხოების თვალსაზრისით, არამედ არაპირდაპირი ემისიების შემცირების მიზნითაც. შემოთავაზებული
- ვერტიკალური ღერძის ქარის ტურბინის კონცეფცია წარმოადგენს ნათელ მაგალითს იმისა, თუ როგორ შეიძლება სუფთა ელექტროენერჯის გენერაცია ინდუსტრიული პროცესის თანმდევი ნაკადიდან, გარდაქმნას გარდაუვალი გამონაბოლქვის პირობები გაზომვად მდგრადობის სარგებლად და შექმნას მასშტაბირებადი საფუძველი მომავალი გაფართოებისთვის.

დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებული სამეცნიერო ნაშრომების სია:

1. მუსელიანი თ., გელაშვილი გ. განახლებადი ენერჯის მიღება გამონახობლქვი ნაკადებისგან ცემენტის ინდუსტრიაში. სტუ-ს შრომები, 2026, N1, გვ. 104–110.
2. გელაშვილი გ. ინდუსტრიული გამონახობლქვის ენერგეტიკული ათვისება: ქარის ტურბინების ეკოლოგიური პოტენციალი ცემენტის წარმოებაში. „ენერჯია“, 2026, N1(114), გვ. 25–29.
3. გელაშვილი გ. ქარის ტურბინის მდგომარეობის მონიტორინგის სისტემის დანერგვა საწარმოში. მულტიდისციპლინური საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციის - მდგრადი განვითარება, ინსტიტუტები და გლობალური გამოწვევები (SDIGC-25) - შრომები, ქუთაისი, 2025, doi:10.52244/c2025.26;
4. ნემსაძე ს., გელაშვილი გ. ქარის ტურბინები და ფრინველების ულტრაბგერითი მოსაგერიებელი მოწყობილობის მონტაჟის ეფექტურობა. „ენერჯია“, სერია - „ენერგეტიკის თანამედროვე პრობლემები და მათი გადაწყვეტის გზები“, 2021, N2(98), გვ. 176–178.

Abstract

Wind energy is advancing in industrialized countries and is considered one of the most promising renewable energy sources because of its nearly inexhaustible clean energy potential. Wind turbines hold an important place among renewable-based power plants due to the broad availability of wind resources, their substantial potential, and progress in the global wind energy sector.

Many countries are shifting from traditional electricity generation to renewable and alternative sources. In this context, the efficient use of wind energy in industrial processes has become an important scientific and technological challenge.

Therefore, the main objective of this dissertation is the efficient use of wind energy in cement production. Forecast-based control can improve efficiency through load optimization and electricity demand forecasting. Such approaches help industrial enterprises reduce energy losses, optimize operating parameters, and improve overall efficiency.

A key wind turbine performance parameter is the wind energy utilization coefficient, defined as the ratio of mechanical power to the total power of the airflow through the swept area. Improving power control to increase this coefficient under different operating conditions is therefore an important engineering task.

The first chapter presents the literature review. It covers the development of wind energy, trends in small-scale generation, and the main wind turbine power control methods, including constant- and variable-speed operation, rotor speed variation, gearbox ratio adjustment, and changes in blade pitch or rotor geometry. These methods are important for efficient wind energy conversion systems.

The second chapter discusses the development of a wind turbine computer model for simulation analysis. It also highlights the growing use of digital control systems in engineering and the continued advancement of analysis tools, including modeling software, numerical methods, programming languages, software design tools, and computational hardware.

Simulation modeling at the design stage of complex control systems reduces research, development, and testing costs while shortening development time. MATLAB/Simulink was selected as the main research environment due to its widespread use in scientific and engineering practice. The chapter presents mathematical models of wind turbine components for analyzing various power control methods through simulation.

The third chapter examines the potential for wind energy generation in the cement industry. Industrial analyses show that electricity use in cement production accounts for about 25% of total energy consumption. Although this share varies with plant design and operating conditions, demand remains high. In large plants, installed capacity often reaches several tens of megawatts, placing a substantial load on national and local energy systems.

Observations at the Kaspi cement plant reflect the same global trends. Daily operations require substantial electrical energy. At present, the national grid is the main source, while a diesel generator provides emergency backup. Although functional, this arrangement is neither economically nor environmentally sustainable in the long term.

The electrical demand of cement production is a technical, economic, and environmental challenge affecting costs, efficiency, sustainability, and competitiveness. Addressing it requires innovative solutions adapted to local conditions. Even partial implementation can reduce grid dependence, operating costs, and emissions while supporting sustainability goals.

The fourth chapter justifies the selection of a vertical-axis wind turbine. This is particularly important when the wind resource is not natural atmospheric wind, but a directed airflow generated by an industrial process. In the proposed project, the driving airflow originates from the exhaust outlet of the emission stack, where air rises continuously from the lower part of the system during plant operation.

For practical electricity generation, the turbine must also utilize the horizontal wind field at emission tower height, where airflow near industrial facilities is often turbulent and directionally unstable. For this reason, a vertical-axis wind turbine is more suitable than a horizontal-axis design, as it performs better under such conditions, requires no wind-direction alignment, reduces mechanical complexity, improves reliability, and better satisfies the safety requirements of the cement plant environment.

The fifth chapter discusses the selection of a battery energy storage system for the DC-coupled integration of a vertical-axis wind turbine in the cement plant. Battery storage is a key component of the proposed energy architecture, especially when the objective is to provide reliable daily support for a specific plant section.

Electrical loads in cement production are continuous, and uninterrupted operation is essential. At the same time, renewable generation supported by industrial exhaust airflow may vary due to process conditions, control actions, or maintenance. A properly selected battery system improves wind energy integration by providing short-term buffering, controlled power delivery, and low-voltage flexibility.

Since the project is intended to provide daily energy support to a selected plant section, the storage system is expected to operate under charge-discharge cycles. Under these conditions, lithium-ion batteries are the most suitable option because of their longer service life, higher usable capacity, and greater efficiency. Although their initial cost is higher than that of lead-acid batteries, their lifecycle cost is generally lower due to less frequent replacement and higher energy throughput.