KICHIK SHAMOL TURBINALARINI MASOFADAN REAL VAQTLI MONITORING VA BOSHQARISH TIZIMINI ISHLAB CHIQISH

Porofessor Mamaxonov A'zam Abdumajitovich
Namangan davlat texnika universiteti Mexanika kafedrasi professori t.f.d.
Oripov Shoxruxmirzo Muzaffarbek o'g'li
Andijon davlat texnika institute "MICHA" kafedrasi doktoranti
E-mail: shoxruhaa1763750@gmail.com
Tel: +998 94 725 10 18
Orifjonov Serobiddin Ulug'bek o'g'li
Andijon davlat texnika institute "MICHA" kafedrasi assistenti
E-mail: serobiddinorifjonov@gmail.com

Annotatsiya: Ushbu maqolada avtomobil harakati natijasida yuzaga keladigan aerodinamik shamol oqimini qayta tiklanuvchi energiya manbai sifatida foydalanishga asoslangan kichik quvvatli vertikal o'qli shamol turbina tizimi taqdim etilgan. Tizim aqlli monitoring, avtomatik boshqaruv va simsiz aloqa funksiyalarini o'z ichiga olgan kiber-fizik platforma asosida ishlab chiqilgan. Eksperimental prototipda Arduino mikrokontrolleri markaziy boshqaruv bloki sifatida ishlatilgan bo'lib, sensorlardan olingan ma'lumotlar real vaqt rejimida qayta ishlanadi. Tizim ishlashi natijalari raqamli formatda ma'lumotlar bazasiga yozilib, foydalanuvchiga vizual interfeys orqali taqdim etiladi. Ushbu yondashuv energiya samaradorligi, monitoring aniqligi va ekspluatatsiya xavfsizligini ta'minlashga xizmat qiladi.

Kalit so'zlar: Masofaviy nazorat, arduino mikrokontrolleri, raspberry Pi, real vaqtli boshqaruv, ma'lumotlar bazasi, mexatronika, SCADA, IoT tizimlari, markaziy boshqaruv moduli, sensorlar tizimi , akkumulyator batareyasi, tok kuchi, kuchlanish, quvvat, reduktor, tok o'zgartirgich (invertor) ,optik enkoderlar, generator, istemolchi, to'g'rilagich va zaryadlash qurilmasi, shamol trubinasi.

Аннотация: В данной статье представлена система, разработанная на базе аппаратной и программной платформы с открытым исходным кодом, обеспечивающая дистанционный мониторинг и автоматическое управление малыми ветротурбинами в режиме реального времени. Предлагаемое решение позволяет с использованием Arduino и вспомогательных мехатронных платформ осуществлять измерение, анализ и сохранение физических параметров (ток, напряжение, вибрация) в базе данных. В ходе исследования описан метод контроля состояния турбины, выдачи предупреждений и оптимизации режима работы с помощью мехатронных алгоритмов управления, основанных на имеющихся данных. Программные продукты имеют юридическое свидетельство и являются важным решением

ISSN 3030-3907

для интеллектуального управления малыми возобновляемыми энергетическими системами и их интеграции в сеть.

Ключевые слова: Дистанционное управление, Arduino, Raspberry Pi, управление в реальном времени, база данных, мехатроника, SCADA-система, IoT-системы (интернет вещей), центральный управляющий модуль, система датчиков, аккумуляторная батарея, сила тока, напряжение, мощность, редуктор, инвертор (преобразователь тока), оптические энкодеры, генератор, потребитель, выпрямитель и зарядное устройство, ветряная турбина

Abstract: This article presents a system developed on the basis of an open-source hardware and software platform that enables remote real-time monitoring and automatic control of small wind turbines. The proposed solution allows for the detection, analysis, and storage of physical parameters (current, voltage, vibration) in a database using Arduino and supporting mechatronic platforms. The study outlines a method for turbine status monitoring, warning issuance, and operating mode optimization through mechatronic control algorithms based on existing data. The software products are legally certified and represent a significant solution for intelligent management and integration of small-scale renewable energy systems into the grid.

Keywords: Remote control, Arduino, Raspberry Pi, real-time control, database, mechatronics, SCADA system, IoT systems, central control module, sensor system, battery accumulator, electric current, voltage, power, gearbox, inverter (power converter), optical encoders, generator, consumer, rectifier and charging device, wind turbine.

Kirish

Bugungi kunda barqaror energetika tizimiga o‘tish orqali iqlim o‘zgarishiga qarshi kurashish mamlakatimiz energetika tizimida olib borilayotgan islohotlarning asosiy tayanchidir. Masofadan boshqariluvchi energiya ishlab chiqarish tizimlari, ya’ni iste’mol nuqtalariga yaqin joylashtirilgan kichik hajmli energiya tizimlarini yaratish energetik barqarorlikni muhim omillaridan biri hisoblanadi. Mamlakatimizda qayta tiklanuvchi energiya tizimlarini barpo etish hamda yashil iqtisodiyotni rivojlantirishga qaratilgan tadqiqotlar va ularni ishlab chiqarishga joriy etilishi keng miqyosda rag‘batlantirilmoqda. Bugungi kunda elektr energiyasi bilan ta’minlash tizimi tarkibida qayta tiklanuvchi manbalar ulushini sezilarli darajada oshib bormoqda. Bu islohotlar fotoelektrik quyosh panellari va kichik shamol turbinalari kabi qayta tiklanuvchi tizimlarning rolini energiya tizimida yuksaltirish va tabiatga karbonat angidrid chiqarilishini kamaytirish shuningdek, energiya barqarorligini oshirishga xizmat qiladi.

ISSN 3030-3907

Zamonaviy elektr energetikasi tizimlarining o‘zgaruvchan talablari shuni ko‘rsatmoqdaki, ishlab chiqarish obyektlari endilikda faqatgina toza energiya manbai sifatida emas, balki tarmoq barqarorligini ta’minlovchi yordamchi xizmatlar yetkazib beruvchi faol elementlar sifatida qaralishi zarur. Donadel, Fardin va Encarnacao tomonidan olib borilgan tadqiqotda tarqatilgan ishlab chiqarish bloklarining yordamchi xizmatlar ko‘rsatishdagi roli, xususan, aqlli tarmoqqa o‘tishning o‘ziga xos ahamiyati yoritilgan [1]. Bunday xizmatlar tarkibiga kuchlanish darajasini barqarorlashtirish (Madureira va Peças Lopes) [2], chastotani tartibga solish (Rezaei va Kalantar) [3] hamda quvvat zaxirasini saqlash (Faria, Soares, Vale va Morais) [4] kabi tadqiqotlar kiradi. Ushbu xizmatlar ilgari asosan yirik markazlashtirilgan elektr stansiyalari tomonidan ko‘rsatilgan bo‘lsa-da, bugungi kunda ularni kichik o‘lchamdagi, qayta tiklanuvchi manbalar asosidagi ishlab chiqarish bloklari ham bajarishi mumkin.

Aourir va Locment kichik o‘lchamdagi shamol turbinalarining mikrotarmoqqa integratsiyasi va kuchlanishni cheklangan darajada kuzatish orqali tarmoq bilan uyg‘un ishlash qobiliyatini o‘rganganlar [5]. Lyu, Subotić va Groß esa doimiy magnitli sinxron generator asosida ishlovchi shamol turbinalarida yagona boshqaruv yondashuvi yordamida tezkor chastota javobini ta’minlash imkoniyatini tahlil qilganlar [6]. Bundan tashqari, Chalise, Atia, Poudel va Tonkoski tomonidan olib borilgan tadqiqotda shamol turbinalarining faol quvvatni cheklash orqali rezidensial tarmoqlarda ortiqcha kuchlanishni oldini olishdagi samaradorligi ko‘rsatib berilgan [7]. Shu tarzda, ilg‘or boshqaruv tizimlari bilan jihozlangan kichik shamol turbinalari maksimal quvvat nuqtasini kuzatish yoki quvvat zaxirasini ushlab turish rejimida ishlashi orqali elektr tarmog‘ining real vaqtli ehtiyojlariga moslasha oladi. Bu esa ularning tarmoq barqarorligi va ishonchliligini oshirishdagi salohiyatini tasdiqlaydi.

Shu bilan birga, kichik shamol turbinalarini yordamchi xizmatlar tizimlariga integratsiyalash jarayoni bir qator muhim muammolarni yuzaga keltiradi. Ayniqsa, real vaqtli monitoring, masofaviy boshqaruv va ishlash moslashuvchanligi nuqtayi nazaridan jiddiy qiyinchiliklar mavjud. Ushbu tizimlarning kichik hajmda va tarqoq holda joylashganligi ko‘pincha arzon, oson kengaytiriladigan, aloqa uzluksizligini va boshqaruv aniqligini ta’minlay oladigan yechimlarni talab etadi. Arduino mikrocontrollerlari hamda Raspberry Pi kabi ochiq manbali apparat-dasturiy platformalar, past narxi va funksional moslashuvchanligi sababli, energiya tizimlaridagi murakkab boshqaruv muammolarini hal etishda istiqbolli yechimlar sifatida e’tirof etilmoqda. Shu ilmiy kontekstda, ushbu tadqiqot kichik quvvatli shamol turbinalarini masofadan monitoring qilish va boshqarish imkonini beruvchi yangi platformani taklif etadi. Mazkur tizim tarmoqning real vaqtli ishchi

ISSN 3030-3907

parametrlariga hamda atrof-muhit sharoitlariga mos ravishda ishlash rejimlarini dinamik tarzda optimallashtirish imkonini beradi.

So‘nggi yillarda real vaqtli Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) tizimlari bo‘yicha olib borilayotgan ilmiy izlanishlar sezilarli darajada rivojlanib, ularning asosiy yo‘nalishi tajriba maydonlari uchun integratsiyalashgan, moslashuvchan yechimlar ishlab chiqishga qaratilmoqda. Bu borada Sánchez-Herrera, Mejías, Márquez va Andújar tomonidan olib borilgan tadqiqotlar ahamiyatli hisoblanadi [8]. Ayniqsa, bu yondashuvlar 100 kVtgacha bo‘lgan kichik shamol turbinalari va ularning gibrid mikro tarmoqlarga integratsiyasi holatida chuqur o‘rganilmoqda. Ko‘plab tadqiqot guruhlari kichik shamol turbinalarini masofadan boshqarish va kuzatish uchun ochiq manbali, arzon va modullikka ega apparat platformalarini ishlab chiqmoqda. Masalan, Bradney boshchiligida Arduino mikrokontrollerlari asosida ko‘p kanalli, yuqori tezlikda ishlovchi ma’lumot yig‘ish tizimini ishlab chiqib, turbina parametrlarini real vaqt rejimida aniqlik bilan qayd etishni ta’minlaganlar [9]. Ochiq manbali qurilmalar, jumladan:

- Arduino;
- Raspberry Pi;
- ESP8266 mikrokontrollerlari kichik shamol turbinalari arxitekturasida keng qo‘llanilmoqda. Ular shamol tezligi, kuchlanish, tok, tebranish kabi sensorlar bilan hamda pichoqlar burchagini boshqarish, tormoz tizimlarini faollashtirish kabi ijro mexanizmlari bilan interfeys hosil qilish uchun xizmat qiladi. [10].

Chaudhari o‘z tadqiqotida shamol–quyosh–dizel–batareya manbalaridan iborat gibrid mikro tarmoqqa moslashtirilgan Raspberry Pi asosidagi IoT gateway ni ishlab chiqdi. Bu qurilma kichik shamol turbinalari ma’lumotlarini yig‘ib, bulutli platformaga uzatadi [11]. Xuddi shunday, Ermeey boshchiligidagi tadqiqotchilar Arduino va veb-interfeysli raqamli panel asosida vertikal o‘qli shamol turbinasini kuzatish tizimini ishlab chiqqan bo‘lib, u internet orqali real vaqtli energiya chiqishi va holat ma’lumotlarini kuzatishga imkon beradi [12].

Pereira, R.I.S., Dupont, I.M., Carvalho, P.C.M. lar tomonidan olib borilgan tadqiqotlarda ochiq manbali apparat yechimlarining amaliyotga joriy etish xarajatlarini keskin kamaytirishi bilan birga, ularning boshqaruv algoritmlari va aloqa protokollarini moslashtirish imkonini berishini ta’kidlaydi [13]. Masofaviy boshqaruvni ta’minlash maqsadida esa, yengil IoT protokollari, ayniqsa MQTT protokoli keng qo‘llanmoqda. Sánchez-Herrera, Márquez va de la Torre IoT qurilmalarida xavfsiz va xususiy aloqa infratuzilmasi zarurligini ta’kidlagan [14], Sasikala va hammualliflar esa Arduino Uno platformasida MQTT asosida nosozliklarni aniqlovchi tizimni ishlab chiqqanlar [15]. Zhao va hammualliflar tomonidan taklif etilgan vaqt–chastota o‘z-o‘ziga o‘xshashlikni kuchaytiruvchi

ISSN 3030-3907

neyron tarmoq [16] va o‘zgaruvchan tezliklarda ishlovchi shamol turbinalarining nosozliklarini aniqlash uchun vaqt–chastota sohasidagi ma’lumotga asoslangan neyron tarmoq (CTNet) [17] kabi vaqt-chastota asosidagi yondashuvlar esa kichik shamol trubinalardagi nosozliklarni aniqlashda sun’iy intellektga asoslangan yangi istiqbollarni ochib bermoqda. Wiens boshchiligidagi tadqiqotchilar tomonidan ishlab chiqilgan “DigiWind” raqamli egizak platformasi esa WebSocket texnologiyasi orqali interaktiv boshqaruv va ikki tomonlama real vaqtli ma’lumot almashinuvini ta’minlash imkonini beradi [18]. Li va boshqalar IoT asosidagi tizim orqali ikki rotorli asinxron generator bilan ishlovchi turbina parametrlarini masofaviy nazorat qilish va kuchlanish pasayishlariga avtomatik moslashish mexanizmini ishlab chiqqanlar [19]. Ushbu yondashuvlar shuni ko‘rsatadiki, IoT asosidagi masofaviy monitoring tizimlari endilikda faqat holatni kuzatish bilan cheklanmay, balki kichik shamol trubinalarini faol boshqarish orqali ularning samaradorligi va barqarorligini oshirishga xizmat qilmoqda.

Bundan tashqari, ilmiy izlanishlar kichik shamol trubinalarini quyosh fotoelektr tizimlari (PV), akkumulyatorlar va vodorod saqlash tizimlari bilan birlashtirilgan gibrid mikro tarmoqlarga integratsiyalash muammosiga ham qaratilgan. Alam boshchiligidagi tadqiqotchilar [20] hamda Gómez-Ruiz [21] bunday tizimlarda manbalarni muvofiqlashtirish uchun aniq boshqaruv strategiyalarini taklif etgan. Deowan va hammualliflar esa IoT bilan integratsiyalashgan taqsimlangan boshqaruv modullarining samaradorligini ko‘rsatganlar [22]. Ochiq manbali apparat vositalarining qo‘llanilishi laboratoriya va eksperimental mikro tarmoqlarda ham o‘z samarasini ko‘rsatmoqda. Cabrera va boshqalar sanoat quvvat analizatorini Arduino asosidagi sensor tugunlar bilan birlashtirib, real vaqtli monitoring uchun mikro tarmoq platformasini ishlab chiqishgan [23]. Truong esa shamol va quyosh manbalaridan energiya ishlab chiqaruvchi, akkumulyator va vodorod elektrolizer bilan muvozanatlangan IoT platformasini ishlab chiqqanlar [24].

Wang va hammualliflar tomonidan ishlab chiqilgan Model Predictive Control (MPC) algoritmiga asoslangan boshqaruv tizimi esa energiyani prognoz asosida taqsimlash va masofaviy telemetriya ma’lumotlariga asoslangan boshqaruvga imkon yaratadi [25].

1-jadvalda tijorat SCADA tizimlari, simsiz protokollar (ZigBee, Wi-Fi) va o‘rnatilgan (embedded) tizimlar o‘rtasida taqqoslovchi tahlil keltirilgan. Taklif etilgan platforma modullik, tezkor javob berish qobiliyati va foydalanuvchi darajasida kengaytirilgan boshqaruv imkoniyatlari bilan ajralib turadi. Real vaqtda mavjud yechimlarda uchraydigan asosiy cheklovlar quyidagilardir:

ISSN 3030-3907

1. Tijorat SCADA va PLC tizimlari yopiq arxitekturaga ega bo‘lib, foydalanuvchi uchun algoritmlar yoki protokollarni moslashtirish imkoniyatini bermaydi. Bu esa ularni eksperimental yoki o‘zgaruvchan loyihalar uchun imkoniyatini cheklaydi.
2. ZigBee va Wi-Fi kabi simsiz protokollar elektromagnit shovqinli muhitida signalning buzilishi yoki uzilishi xavfini oshiradi.

Taklif etilgan arxitektura esa kabelli lokal tarmoq (LAN) orqali quyidagi ustunliklarni taqdim etadi:

- aloqa barqarorligini oshiradi;
- tizim javob vaqtini (kamaytiradi;
- deterministik ya’ni aniq ishlashni ta’minlaydi – bu esa distribyutsiyalashgan qayta tiklanuvchi energiya tizimlari uchun hal qiluvchi ahamiyatga ega hisoblanadi.

Taklif etilayotgan energiya hosil qilish tizimi aerodinamik oqimdan samarali foydalanish tamoyiliga asoslanadi. Harakatlanayotgan avtomobil atrofida hosil bo‘ladigan turbulent havo oqimini laminar oqimga aylantirish orqali energiya olish tizimi ishlab chiqilgan (1-rasm). Ushbu tizimda vertikal o‘q atrofida aylanadigan turbinalar o‘rnatilgan bo‘lib, ular bir-biridan mustaqil ishlaydigan modullar asosida harakatlanadi.

Har bir turbina bloki quyidagi asosiy elementlardan tashkil topgan:

Optik enkoderlar – turbina aylanishlarining sonini aniqlash uchun xizmat qiladi;

Reduktor – aylanish momentini moslashtiradi va energiyani generatorga uzatadi;

Generator – mexanik energiyani elektr energiyaga aylantiradi;

To‘g‘rilagich va zaryadlash qurilmasi – hosil bo‘lgan tokni to‘g‘rilab, akkumulyator batareyasiga uzatadi;

Sensorlar tizimi – quvvat, tok kuchi, kuchlanish kabi parametrlarni doimiy nazorat qiladi;

Markaziy boshqaruv moduli – barcha sensorlardan kelayotgan ma'lumotlarni protokollar asosida qayta ishlaydi va tizimni masofadan boshqarishni ta'minlaydi;

Tok o‘zgartirgich (invertor) – batareyadagi doimiy tokni foydalanuvchi ehtiyojiga mos ravishda o‘zgaruvchan tokka aylantiradi;

Akkumulyator batareyasi – hosil bo‘lgan elektr energiyasini saqlab turadi;

Istemolchi – yakuniy foydalanuvchi qurilmalari yoki avtomobilning ichki tizimlari.

Mazkur tizim modullik tamoyiliga asoslangan bo‘lib, har bir turbina mustaqil boshqaruvga ega. Shu orqali tizimning moslashuvchanligi va

ISSN 3030-3907

samaradorligi oshiriladi. Markaziy boshqaruv moduli yordamida butun tizim masofadan monitoring va boshqaruv imkoniyatiga ega bo‘ladi.

1-jadval.

Kichik shamol trubinalari uchun vakil boshqaruv va aloqa tizimlari taqqoslamasi

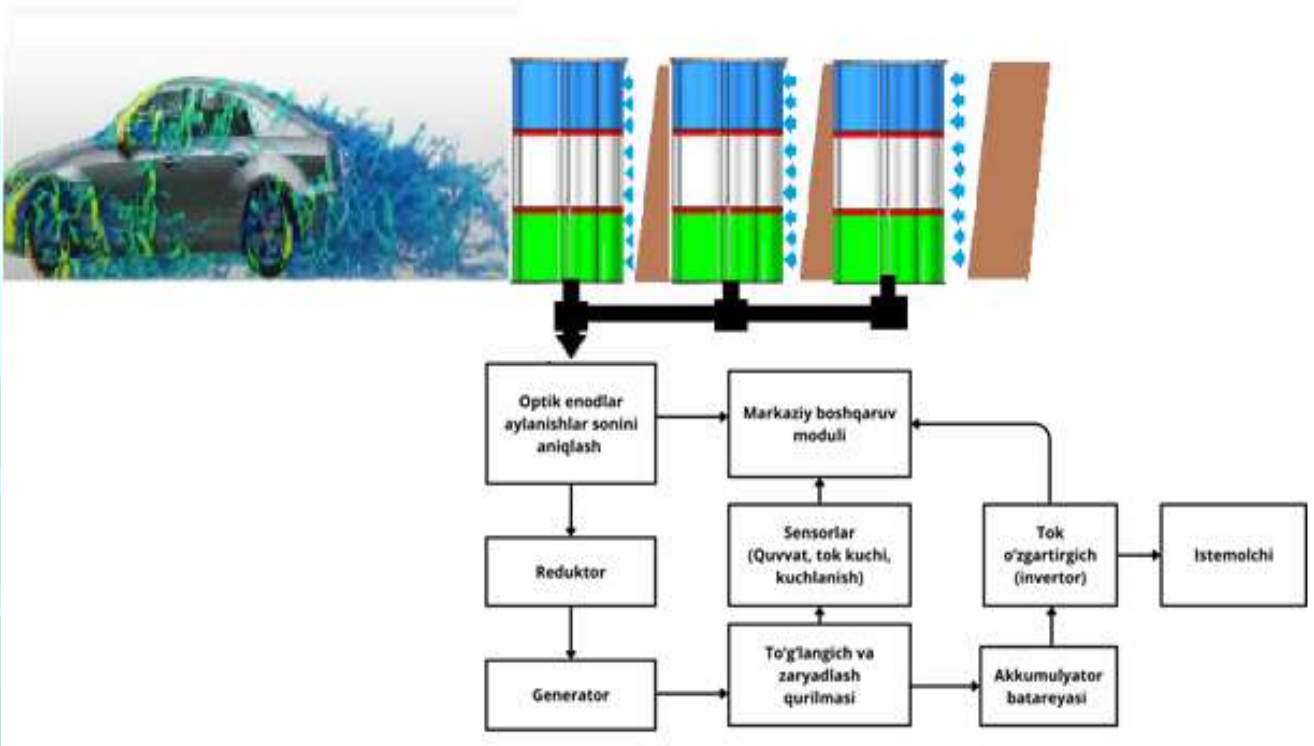
Kiriteriyalari	**Arduino + Raspberry Pi (WebSocket) + PC (MATLAB App)**	**Tijorat SCADA tizimlari (WinCC, EcoStruxure, ABB/ Emerson)**	**ZigBee asosidagi simsiz boshqaruv**	**IoT yechimlari (ESP32 + MQTT, Node-RED, ThingsBoard, Blynk)**	**PLC asosidagi an’anaviy tizimlar**
Ikki tomonlama aloqa qilish	Arduino + Raspberry Pi + MATLAB App orqali to‘liq qo‘llab-quvvatlanadi	SCADA standart funksiyasi sifatida	Qo‘llab-quvvatlanadi, lekin asosan past tezlikdagi harakatlar	MQTT va bulutli panellarda inherent	PLClar deterministik ikki tomonlama aloqa ta’minlaydi
Real vaqtli javob qaytarish	Taqribiy soniya (no-deterministik); nazorat vazifalari uchun mos	O‘rtacha (soniyalar); PLClar real vaqtli, SCADA	O‘rtacha (100–500 ms); tez boshqaruv halqalari uchun mos emas	Yaxshi (<1 s); tarmoq/yuklama kechikishiga bog‘liq	Yuqori (ms); real vaqtli skanlash sikllari
Protokol moslashuvchanligi	Yuqori — ochiq manba (RS232 va	Yuqori — sanoat protokollarini qo‘llab-	O‘rtacha — faqat ZigBee; boshqa protokollar	Juda yuqori — MQTT, HTTP, REST, WebSocket	O‘rtacha — sanoat fieldbus/protokollar bilan cheklangan

ISSN 3030-3907

	WebSocket	quvvatlaydi (Modbus, OPC UA)	uchun gateway kerak	qo‘llab-quvvatlanadi	
Moslashtirilgn mantiqni integratsiya	Yuqori — MATLAB orqali Arduino dasturlanishi mumkin	O‘rtacha — tashqi tarzda amalga oshiriladi (PLC), SCADA ichida cheklangan	O‘rtacha — MCU tugunlarida mumkin, ammo cheklangan	Yuqori — qurilma va bulut moslashuvchanligi	Yuqori — IEC tillari asosida to‘liq dasturlanishi mumkin
Sensor integratsiyasi osonligi	Yuqori — Arduino analog pinlari orqali osongina qo‘shiladi	O‘rtacha — PLC IO konfiguratsiyasi va texnik tayyorgarlik talab qiladi	Yuqori — tugunlar ‘plug-and-play’ ko‘rinishda	Yuqori — juda moslashuvchan; dinamik MQTT topologiyasi, modulli	Yuqori — IO modullarini qo‘shish mumkin, lekin konfiguratsiya va dasturlash talab qilinadi
Ochiq kirish va qayta dasturlash (foydalanuvchi uchun)	Ochiq kodli; ochiq/proprietar foydalanuvchi interfeyslari bilan mos	Cheklangan — vendor bloklangan, litsenziyaga asoslangan moslashtirish	Yaxshi — ochiq protokollar, MCU moslashuvchanligi	A’lo — ochiq SDKlar, to‘liq stack nazorati	O‘rtacha — logika o‘zgartiriladi, lekin yopiq interfeysga ega

ISSN 3030-3907

Maqsadli qo'llash masshtabi	Kichik — 1–5 ta turbina, mikrogridlar, tadqiqotlar uchun mos	O‘rta–katta — markazlashgan tarmoqlar va kommunal xizmatlar	Kichik — sensorli tarmoqlar yoki kampuslar uchun mos	O‘rta–kichik — virtual shamol fermalari va tarqoq tizimlar uchun	O‘rta–kichik — turbina darajasida avtomatlashtirish uchun ideal
Xarajat va murakkablik	Juda arzon, o‘rta darajada DIY murakkabligi	Juda qimmat, yuqori muhandislik murakkabligi	Past narx, o‘rta darajada sozlash murakkabligi	O‘rta–past narx, qulay interfeyslar	O‘rta narx, o‘rtacha dasturlash murakkabligi

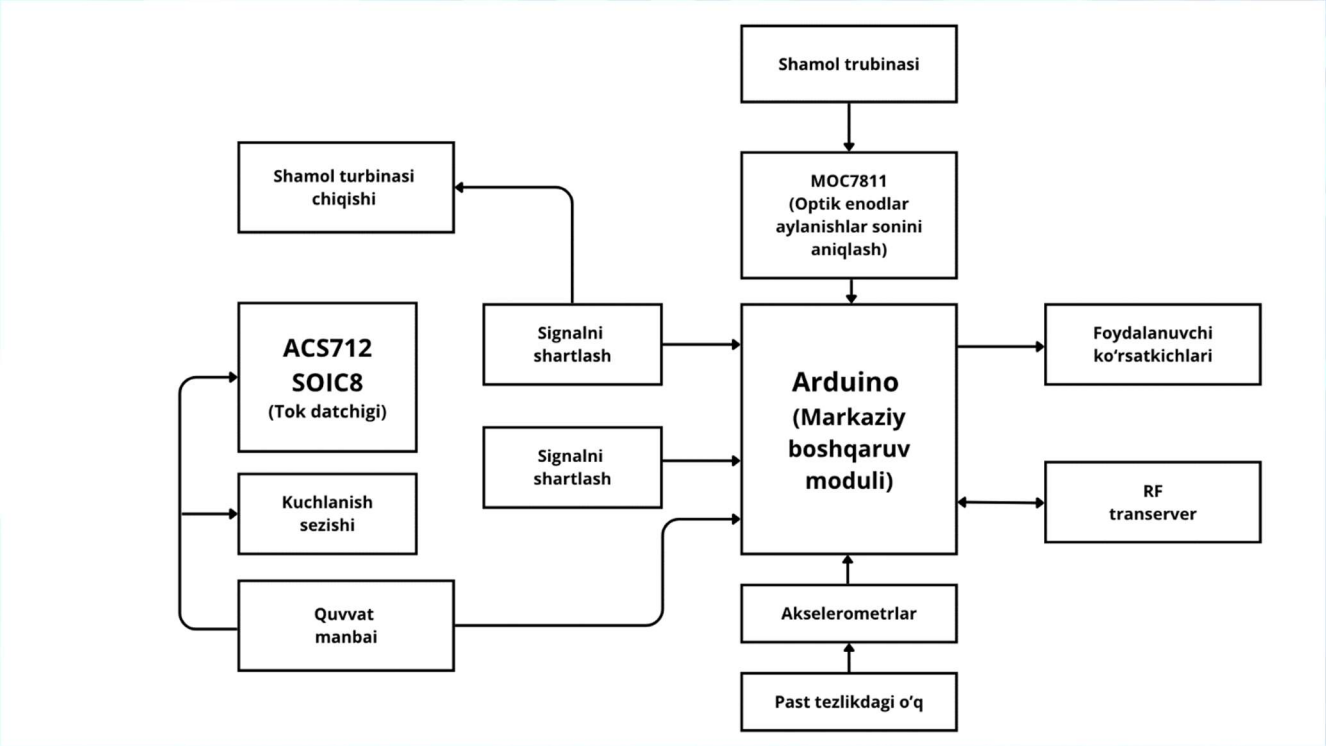


1-rasm. Vertical o‘qli shamol trubinasini masofadan nazorat qilish va boshqarish tizimi

Jadval tahlili asosida avtomobil yo‘llarida mashinalar harakati natijasida yuzaga keluvchi shamol trubinasining energetik parametrlarini masofadan nazorat qiluvchi va boshqaruvchi samaradorligi yuqori bo‘lgan tizim taklif etildi (2-rasm).

ISSN 3030-3907

Taklif etilgan tizim quyida berilgan blok-sxema orqali transport vositalari harakati natijasida yuzaga keladigan aerodinamik shamol oqimidan samarali foydalanish imkonini beruvchi kichik quvvatli vertikal o‘qli shamol turbinasining energetik parametrlarini aqlli monitoring va boshqaruv tizimini aks ettiradi. Shamol turbinasining fizikaviy elementi diagrammaning yuqori qismida joylashgan. Shamol turbinasining pichoqlari (parraklari) yo‘ldagi avtomobillar harakati natijasida yuzaga keladigan sun’iy shamol oqimini qabul qilib, aylanish harakatini hosil qiladi. Ushbu aylanma harakat parametrlari keyinchalik sensorlar orqali raqamli axborotga aylantiriladi.



2-Rasm. Vertikal o‘qli kichik shamol turbinasining aqlli monitoringi va real vaqtli boshqaruvi tizimi strukturasi

Mazkur tizim kichik quvvatli vertikal o‘qli shamol turbinasidan tashkil topgan bo‘lib, u sun’iy hosil bo‘lgan havo oqimidan elektr energiyasi hosil qiladi va uni real vaqtli monitoring, avtomatik boshqaruv hamda simsiz aloqa orqali nazorat qilish imkonini beradi. Tizimning umumiy tuzilishi quyidagicha:

Tizimning asosiy fizik elementi – vertikal o‘qli shamol turbinasidir, uning pichoqlari (parraklari) avtomobil harakati natijasida hosil bo‘ladigan havo oqimini qabul qiladi va aylanish energiyasini hosil qiladi. Bu mexanik energiya raqamli axborotga aylantirilib, keyinchalik monitoring, tahlil va boshqaruv imkonini yaratadi.

Asosiy komponentlar va ularning funksional tavsifi:

MOC7811 – Optik encoder. Shamol turbinasining pichoqlari bilan bog‘langan bo‘lib, aylanish chastotasini aniqlaydi. Har bir aylanish impuls

ISSN 3030-3907

ko‘rinishida Arduino markaziy boshqaruv moduliga uzatiladi. Bu orqali aylanishlar real vaqtli raqamlashtiriladi.

Arduino (Markaziy boshqaruv moduli). Tizimning “yuragi” hisoblanadi. Arduino mikrokontrolleri barcha sensorlardan (tok, kuchlanish, tezlanish va aylanishlar) ma’lumotlarni qabul qilib, ularni qayta ishlaydi, saqlaydi va kerakli chiqish qurilmalariga uzatadi. Shuningdek, avtomatik boshqaruv algoritmlarini bajaradi.

ACS712 SOIC8 – Tok datchigi. Shamol turbinasining chiqishidagi elektr tokini real vaqt rejimida o‘lchaydi. Chiqish signalini Arduino o‘qiy oladigan raqamli formatga o‘zgartirish uchun signalni shartlash bloki bilan jihozlangan.

Kuchlanish sezgichi va signalni shartlash bloki. Elektr tizimining kuchlanish darajasi aniqlanib, signalni filtrlash va kuchaytirish orqali Arduino’ga uzatiladi.

Quvvat manbai. Arduino, sensorlar va RF modullarining ishonchli ishlashini ta’minlovchi mustaqil quvvat manbai sifatida xizmat qiladi.

Akselerometr moduli. Shamol turbinasining markaziy o‘qidagi tebranish, g‘alati harakatlar yoki nosozliklarni aniqlash uchun foydalaniladi. Ushbu parametrlar tizim xavfsizligini baholash va texnik xizmat muddatlarini aniqlashda muhim rol o‘ynaydi.

RF transceiver. Barcha o‘lchov natijalari va monitoring axboroti simsiz aloqa orqali tashqi qurilmalarga (displey, mobil qurilma va boshqalar) uzatiladi. Bu foydalanuvchining masofadan real vaqt monitoring imkonini yaratadi.

Foydalanuvchi interfeysi. Ma’lumotlar vizual tarzda foydalanuvchiga taqdim etiladi. Bu interfeys texnik xizmat ko‘rsatish, tahlil va prognozlash uchun zarur axborotlarni ko‘rsatadi.

Dasturiy ta’minot yechimlari. Tizim uchun ikkita maxsus sertifikatlangan dasturiy modul ishlab chiqilgan:

I. Raqamli monitoring dasturi: Aylanish chastotasi, kuchlanish, tok, quvvat, vibratsiya kabi parametrlar real vaqt rejimida aniqlanadi. O‘lchov ma’lumotlari JSON/CSV formatlarida eksport qilinadi. Arduino orqali raqamli ma’lumotlar ma’lumotlar bazasida sanaviy vaqt bilan birga saqlanadi.

II. Aqlli boshqaruv algoritmlari: Arduino markaziy boshqaruv bloki nosozlik, tebranish yoki ortiqcha tok holatlarini avtomatik aniqlaydi. Tizimni to‘xtatish, ish rejimini o‘zgartirish yoki ogohlantirish yuborish funksiyalari mavjud. RF aloqa orqali real vaqtli qarorlar va boshqaruv algoritmlari tashqi qurilmalarga uzatiladi.

Tadqiqotning ilmiy taxnik ahamiyati quyidagi quyidagi afzalliklarni taqdim etadi:

ISSN 3030-3907

energiya tejamkorligi: mavjud aerodinamik oqimdan foydalanish orqali energiya ishlab chiqariladi;

raqamli monitoring: tizim holati doimiy kuzatuvda bo‘ladi;

avtomatik boshqaruv: xavfsizlik va samaradorlik oshadi;

Simsiz aloqa: real vaqtli vizualizatsiya va masofaviy nazorat imkoniyati yaratiladi;

Kiber-fizik tizim yondashuvi: mexatronika, elektronika va dasturiy ta’minotning integratsiyasi.

Xulosa. Tadqiqot natijalari quyidagicha xulosa chiqarishga asos beradi:

Avtomobil harakatidan hosil bo‘ladigan aerodinamik oqim real energiya manbai sifatida ishlatilishi mumkin. Taklif etilgan tizim orqali elektr energiyasi ishlab chiqarish, monitoring va boshqaruv avtomatlashtirilgan shaklda amalga oshiriladi. Ilmiy va texnik yondashuvlar asosida ishlab chiqilgan dasturiy platforma tizimning ishlashini raqamlashtirish, xavfsizligini ta’minlash va tahlil qilish imkonini beradi. Loyihaga oid dasturiy ta'minot huquqiy guvohnoma bilan rasmiylashtirilgan va tijoratlashtirish imkoniyatiga ega.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Donadel, C.B.; Fardin, J.F.; Encarnacao, L.F. Distributed Generation Units as Ancillary Services Providers in a Pre Smart Grid Environment. Int. J. Emerg. Electr. Power Syst. 2017, 18, 20170021. [CrossRef].

2. Madureira, A.G.; Pecas Lopes, J.A. Ancillary Services Market Framework for Voltage Control in Distribution Networks with Microgrids. Electr. Power Syst. Res. 2012, 86, 17. [CrossRef].

3. Rezaei, N.; Kalantar, M. Smart Microgrid Hierarchical Frequency Control Ancillary Service Provision Based on Virtual InertiaConcept: An Integrated Demand Response and Droop Controlled Distributed Generation Framework. Energy Conv. Manag. 2015,92, 287–301. [CrossRef].

4. Faria, P.; Soares, T.; Vale, Z.; Morais, H. Distributed Generation and Demand Response Dispatch for a Virtual Power Player Energy and Reserve Provision. Renew. Energy 2014, 66, 686–695. [CrossRef]

5. Aourir, J.; Locment, F. Limited Power Point Tracking for a Small-Scale Wind Turbine Intended to Be Integrated in a DC Microgrid.Appl. Sci. 2020, 10, 8030. [CrossRef].

6. Lyu, X.; Suboti´c, I.; Groß, D. Unified Grid-Forming Control of PMSG Wind Turbines for Fast Frequency Response and MPPT.arXiv 2022, arXiv:2207.09536.

7. Chalise, S.; Atia, H.; Poudel, B.; Tonkoski, R. Impact of Active Power Curtailment of Wind Turbines Connected to ResidentialFeeders for Overvoltage

ISSN 3030-3907

Prevention. In Proceedings of the 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM),Boston, MA, USA, 17–21 July 2016; pp. 471–479.
8. Sánchez-Herrera, R.; Mejías, A.; Márquez, M.A.; Andújar, J.M. A Fully Integrated Open Solution for the Remote Operation ofPilot Plants. IEEE Trans. Ind. Inform. 2019, 15, 3943–3951. [CrossRef].
9. Bradney, D.; Evans, S.; Chu, M.; Clausen, P. A Low-Cost, High-Speed, Multi-Channel Arduino-Based Data Acquisition System forWind Turbine Systems. Wind. Eng. 2020, 44, 509–518. [CrossRef].
10. Clavijo-Camacho, J., Gomez-Ruiz, G., Sanchez-Herrera, R., & Magro, N. (2025). Remote real-time monitoring and control of small wind turbines using open-source hardware and software. *Applied Sciences, 15*(12), 6887. https://doi.org/10.3390/app15126887
11. Chaudhari, K.G. Windmill Monitoring System Using Internet of Things with Raspberry Pi. Int. J. Adv. Res. Electr. Electron. Instrum. Eng. 2019, 8, 482–485. [CrossRef].
12. Ermeey, A.K.; Taib, M.M.; Nasran, A.R.; Yushafizee, Y.M. A Vertical Wind Turbine Monitoring System Using Commercial Online Digital Dashboard. Int. J. Electr. Comput. Eng. (IJECE) 2020, 10, 5131–5138. [CrossRef].
13. Pereira, R.I.S.; Dupont, I.M.; Carvalho, P.C.M.; Jucá, S.C.S. IoT Embedded Linux System Based on Raspberry Pi Applied to Real-Time Cloud Monitoring of a Decentralized Photovoltaic Plant. Measurement 2018, 114, 286–297. [CrossRef].
14. Sánchez-Herrera, M.R.; Márquez, M.; de la Torre, L. Secure and Private Internet of Things for Industry, Training, and Homes: ACommunications Solution for Connected Devices. IEEE Ind. Electron. Mag.2023, 17, 14Œ21. [CrossRef].
15. Sasikala, G.; Chandra, Y.P.S.; Siva, N.; Vinesh, A.S. Wind Turbine Fault Monitoring System Using MQTT. J. Phys. Conf. Ser.2021,2040, 012002. [CrossRef].
16. Zhao, D.; Shao, D.; Wang, T.; Cui, L. Time-Frequency Self-Similarity Enhancement Network and Its Application in Wind Turbines Fault Analysis. Adv. Eng. Inform.2025, 65, 103322. [CrossRef].
17. Zhao, D.; Shao, D.; Cui, L. CTNet: A Data-Driven Time-Frequency Technique for Wind Turbines Fault Diagnosis under Time Varying Speeds. ISA Trans. 2024, 154, 335–351. [CrossRef].
18. Wiens, M.; Steindl, G.; Tubeuf, C.; Birkelbach, F.; Burfeind, J.; Meyer, T. DigiWind-An Open-Source Digital Twin Framework for Wind Energy Systems. IEEE Access 2024, 12, 84046–84063. [CrossRef]

ISSN 3030-3907

19. Vairavasundaram, I.; Ramu, S.K.; Stephenraj, J.P.; D, O.P.; Irudayaraj, G.C.R. IoT Based Monitoring System for DFIG Based Wind Turbines under Voltage Dips. E-Prime-Adv. Electr. Eng. Electron. Energy 2024, 9, 100690. [CrossRef]
20. Alam,M.; Kumar, K.; Verma, S.; Dutta, V. Renewable Sources Based DC Microgrid Using Hydrogen Energy Storage: Modelling and Experimental Analysis. Sustain. Energy Technol. Assess. 2020, 42, 100840. [CrossRef]
21. Gómez-Ruiz, G.; Sánchez-Herrera, R.; Clavijo-Camacho, J.; Cano, J.M.; Ruiz-Rodríguez, F.J.; Andújar, J.M. A Versatile Platform for PVSystem Integration into Microgrids. Electronics 2024, 13, 3995. [CrossRef]
22. Deowan,M.d.E.; Nuhel, A.K.; Sazid, M.M.; Meghla, R.T.; Haider, I.; Hazari, M.d.R. Design and Analysis of IoT-Based Adaptive Microgrid System Including Renewable Energy Sources for Decentralized Zones. In Proceedings of the 2023 3rd International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST), Dhaka, Bangladesh, 7–8 January 2023; pp. 84–89.
23. Cabrera, M.H.; Gómez, A.B.; Torres, C.J.; Morales, A.S.; Ramírez, A.G. Integration of Industrial Power Quality Analyzer and OpenSource Hardware and Software Solution for Microgrids Monitoring. In Proceedings of the 2019 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON), Valparaiso, Chile, 13–27 November 2019; pp. 1–6.
24. Truong, D.-N.; Thi, M.-S.N.; Ngo, V.-T.; Hoang, A.-Q. Development of the Monitoring Program for an Integrated Small-Scale Wind and Solar Systems Based on IoT Technology. J. Sci. Technol. Issue Inf. Commun. Technol. 2021, 19, 26–31. [CrossRef]
25. Wang, J.; Li, D.; Lv, X.; Meng, X.; Zhang, J.; Ma, T.; Pei, W.; Xiao, H. Two-Stage Energy Management Strategies of Sustainable Wind-PV-Hydrogen-Storage Microgrid Based on Receding Horizon Optimization. Energies 2022, 15, 2861. [CrossRef]

ISSN 3030-3907