

JOURNAL OF TRANSPORT



ISSUE 3, 2026 vol. 3

E-ISSN: 2181-2438

ISSN: 3060-5164



RESEARCH, INNOVATION, RESULTS



**TOSHKENT DAVLAT
TRANSPORT UNIVERSITETI**

Tashkent state
transport university



JOURNAL OF TRANSPORT

RESEARCH, INNOVATION, RESULTS

E-ISSN: 2181-2438

ISSN: 3060-5164

VOLUME 3, ISSUE 3

SEPTEMBER, 2026



jot.tstu.uz

TASHKENT STATE TRANSPORT UNIVERSITY

JOURNAL OF TRANSPORT

SCIENTIFIC-TECHNICAL AND SCIENTIFIC INNOVATION JOURNAL

VOLUME 3, ISSUE 3 SEPTEMBER, 2026

EDITOR-IN-CHIEF

SAID S. SHAUMAROV

Professor, Doctor of Sciences in Technics, Tashkent State Transport University

Deputy Chief Editor

Miraziz M. Talipov

Doctor of Philosophy in Technical Sciences, Tashkent State Transport University

The “**Journal of Transport**” established by Tashkent State Transport University (TSTU), is a prestigious scientific-technical and innovation-focused publication aimed at disseminating cutting-edge research and applied studies in the field of transport and related disciplines. Located at Temiryo‘lchilar Street, 1, office 465, Tashkent, Uzbekistan (100167), the journal operates as a dynamic platform for both national and international academic and professional communities. Submissions and inquiries can be directed to the editorial office via email at jot@tstu.uz.

The Journal of Transport showcases groundbreaking scientific and applied research conducted by transport-oriented universities, higher educational institutions, research centers, and institutes both within the Republic of Uzbekistan and globally. Recognized for its academic rigor, the journal is included in the prestigious list of scientific publications endorsed by the decree of the Presidium of the Higher Attestation Commission No. 353/3 dated April 6, 2024. This inclusion signifies its role as a vital repository for publishing primary scientific findings from doctoral dissertations, including Doctor of Philosophy (PhD) and Doctor of Science (DSc) candidates in the technical and economic sciences.

Published quarterly, the journal provides a broad spectrum of high-quality research articles across diverse areas, including but not limited to:

- Economics of Transport
- Transport Process Organization and Logistics
- Rolling Stock and Train Traction
- Research, Design, and Construction of Railways, Highways, and Airfields, including Technology
- Technosphere Safety
- Power Supply, Electric Rolling Stock, Automation and Telemechanics, Radio Engineering and Communications
- Technological Machinery and Equipment
- Geodesy and Geoinformatics
- Automotive Service
- Air Traffic Control and Aircraft Maintenance
- Traffic Organization
- Railway and Road Operations

The journal benefits from its official recognition under Certificate No. 1150 issued by the Information and Mass Communications Agency, functioning under the Administration of the President of the Republic of Uzbekistan. With its E-ISSN 2181-2438, ISSN 3060-5164 the publication upholds international standards of quality and accessibility.

Articles are published in Uzbek, Russian, and English, ensuring a wide-reaching audience and fostering cross-cultural academic exchange. As a beacon of academic excellence, the "Journal of Transport" continues to serve as a vital conduit for knowledge dissemination, collaboration, and innovation in the transport sector and related fields.

Multi-level energy–information model and physics-informed FUZZY–GA–LSTM adaptive algorithms for hybrid energy monitoring

J. Djumanov¹^a, M. Sobirov²^b

¹Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi, Tashkent, Uzbekistan

²Tashkent state transport university, Tashkent, Uzbekistan

Abstract: This paper proposes a multi-level energy–information model and a physics-informed PI-Fuzzy–GA–LSTM–DT algorithm for real-time monitoring and adaptive control of Smart-Grid-enabled base stations. The model organizes the system into physical, semantic, edge-event, digital-twin, and decision levels connected by timestamped asset identifiers and quality metadata. The framework is evaluated on a reproducible synthetic testbed representing 12 base stations, 90 days of 1-second-to-60-second multirate telemetry, seasonal renewable profiles, traffic bursts, sensor faults, and grid outages. In this benchmark, the proposed model achieves 4.9% renewable-power MAPE, 1.9% SOC RMSE, 0.8 kWh/day unserved energy, and 2.8 h/day diesel runtime, while 94.6% empirical coverage is obtained for nominal 95% forecast intervals. These are synthetic engineering results, not field-certified operational claims. The study contributes a standards-aware energy–information model, a bounded adaptive learning algorithm, and an auditable transition path from the 2019 MATLAB-centric Smart Grid prototype to modern edge–cloud digital-twin monitoring.

Keywords: hybrid energy, telecommunication base station, Smart Grid, interval type-2 fuzzy logic, genetic algorithm, LSTM, conformal prediction

Gibrid energiya monitoringi uchun ko‘p sathli energiya–axborot modeli va fizik qonuniyatlarga asoslangan FUZZY–GA–LSTM adaptiv algoritmlari

Djumanov J.¹^a, Sobirov M.²^b

¹Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti, Toshkent, O‘zbekiston

²Toshkent davlat transport universiteti, Tashkent, O‘zbekiston

Annotatsiya: Ushbu maqolada Smart Grid bilan integratsiyalashgan bazaviy stansiyalarni real vaqt rejimida monitoring qilish va adaptiv boshqarish uchun ko‘p sathli energiya–axborot modeli hamda fizik qonuniyatlarga asoslangan PI-Fuzzy–GA–LSTM–DT algoritmi taklif etiladi. Model tizimni vaqt tamg‘alari bilan bog‘langan aktiv identifikatorlari va sifat metama’lumotlari orqali o‘zaro integratsiyalashgan fizik, semantik, edge-hodisa, Digital Twin va qaror qabul qilish sathlariga ajratadi. Taklif etilgan arxitektura 12 ta bazaviy stansiya, 90 kunlik 1 soniyadan 60 soniyagacha bo‘lgan ko‘p chastotali telemetriya, mavsumiy qayta tiklanuvchi energiya profillari, trafikning keskin oshishi, sensor nosozliklari va elektr tarmog‘idagi uzilishlarni modellashtiruvchi takrorlanuvchi sintetik sinov stendida baholandi. Ushbu benchmark natijalariga ko‘ra, taklif etilgan model qayta tiklanuvchi energiya quvvatini prognozlashda 4,9% MAPE, akkumulyatorning SOC holatini baholashda 1,9% RMSE, kunlik ta‘minlanmagan energiya bo‘yicha 0,8 kWh/kun, dizel generatorining ishlash davomiyligi bo‘yicha esa 2,8 soat/kun natijaga erishdi. Nominal 95% prognoz intervali uchun empirik qamrov darajasi 94,6% ni tashkil etdi. Ushbu natijalar sintetik muhandislik tajribalariga asoslangan bo‘lib, dala sharoitida sertifikatlangan ekspluatatsion natijalar sifatida talqin qilinmaydi. Tadqiqot standartlarni hisobga oluvchi energiya–axborot modeli, chegaralangan adaptiv o‘rganish algoritmi hamda 2019-yildagi MATLAB asosidagi Smart Grid prototipidan zamonaviy edge–cloud Digital Twin monitoring tizimiga o‘tishning audit qilinadigan yo‘lini taklif etadi.

Kalit so‘zlar: gibrid energiya, telekommunikatsiya bazaviy stansiyasi, Smart Grid, interval type-2 fuzzy mantiq, genetik algoritim, LSTM, konformal prognozlash

^a <https://orcid.org/0000-0001-6043-2495>

^b <https://orcid.org/0009-0000-4719-9481>



1. Kirish

Telekommunikatsiya bazaviy stansiyalari kiberfizik yuklamalar bo'lib, ularning talab qilinadigan quvvati radio trafik, uyqu holati siyosati, atrof-muhit harorati va xizmat ko'rsatish majburiyatlariga qarab o'zgaradi. Ularning energiya zanjiri tobora ko'proq fotovoltaiik panellar, shamol turbinalari, elektr tarmog'i ta'minoti, dizel generatsiyasi, akkumulyatorlar hamda DC/AC o'zgartirish qurilmalarini qamrab olmoqda. Siddikov va boshqalar tomonidan 2019-yilda ishlab chiqilgan Smart Grid prototipi ikki tomonlama axborot almashinuvi va MATLAB asosidagi elektr energetika tizimini modellashirishning ahamiyatini ko'rsatdi. Biroq zamonaviy 5G energiya samaradorligi spetsifikatsiyalari unumdorlik va energiya iste'molini bir xil vaqt oralig'ida hamda dinamik trafik sharoitlarida baholashni talab qiladi.

Shu sababli zamonaviy monitoring tizimi faqat kuchlanish va tokni baholash bilan cheklanmasligi kerak. U namunani qaysi aktiv hosil qilganini, vaqt tamg'olari va o'lchov birliklari to'g'riligini, sensor sifati holatni baholashga qanday ta'sir qilishini, akkumulyator modeli saqlanish qonunlariga mos kelishini hamda taklif etilgan dispetcherlik harakati radioaloqa xizmat sifati talablarini saqlab qolishini aniqlashi lozim. NIST Smart Grid modernizatsiyasini o'zaro ishlash qobiliyati, ishonchlik, o'lchash va qayta tiklanuvchi energiya integratsiyasi asosida talqin qiladi. IEC 61850 va IEEE 2030.5 o'zaro mos axborot almashinuvi mexanizmlarini ta'minlaydi, IEC 62351 esa aloqa xavfsizligiga qaratilgan.

1-jadval

2019-yildagi Smart Grid prototipidan taklif etilgan arxitekturaga ilmiy o'tishi

O'lchov	2019-yildagi Smart Grid prototipi	Taklif etilgan PI-Fuzzy-GA-LSTM-DT
Tizim ko'rinishi	elektr tarmog'i + MATLAB modeli	BTS gibril kiberfizik raqamli egizagi
Ma'lumotlar	tanlangan tok/kuchlanish izlari	ko'p chastotali energiya, ob-havo, akkumulyator, trafik
Intellekt	qoida/boshqaruv simulyatsiyasi	fizik qonuniyatlarga asoslangan adaptiv prognozlash
Noaniqlik	aniq ifodalanmagan	type-2 fuzzy + konformal intervallar
Optimallashtirish	reaktiv quvvatga yo'naltirilgan	GA ko'p maqsadli sozlash/dispetcherlik
Xavfsizlik	funksional talablar	qat'iy cheklovlar + imzolangan rollback

Tadqiqot savoli quyidagicha: turli xil energetik va telekommunikatsion telemetriya ma'lumotlarini gibril bazaviy stansiya energiya tizimlari uchun sinxronlashtirilgan, noaniqlikni hisobga oluvchi va xavfsiz boshqaruvga yaroqli holatga qanday aylantirish mumkin? PI-Fuzzy-GA-LSTM-DT bunga besh sathli energiya-axborot modelini adaptiv prognozlash, fizik cheklovlar,

konformal noaniqlik va Digital Twin xavfsizlik filtri bilan bog'lash orqali javob beradi.

Maqolada to'rtta asosiy ilmiy hissa keltiriladi. Birinchidan, elektr aktivlari, sensorlar, trafik, ob-havo, aloqa hodisalari, prognoz holati va boshqaruv dalillarini bog'lovchi tiplashtirilgan ko'p sathli model ishlab chiqiladi. Ikkinchidan, interval type-2 fuzzy birlashtirish, GA optimallashtirish, LSTM vaqt qatorlarini o'rganish va graf konteksti bir butun boshqaruvchi sifatida emas, balki o'zaro chegaralangan rollarda integratsiyalanadi. Uchinchidan, fizik qoldiq xatolar va konformal intervallar bajarib bo'lmaydigan yoki noaniq prognozlarni ochib beradi. To'rtinchidan, Digital Twin xavfsizlik filtri tavsiya va ijroni bir-biridan ajratadi hamda standartlarga mos audit izini ta'minlaydi.

Smart Grid tadqiqotlari markazlashgan monitoringdan taqsimlangan energiya resurslari, edge-intellekt va o'zaro ishlaydigan kiberfizik tizimlar tomon rivojlandi. NISTning o'zaro ishlash doirasi interfeyslar va sinovdan o'tkazilishi mumkin bo'lgan axborot almashinuvlarini ta'kidlaydi. IEC 61850 podstansiyalar va taqsimlangan energiya aloqalarini tuzilmashtiradi, IEEE 2030.5 taqsimlangan resurslar uchun amaliy qatlamdagi ma'lumot almashinuvini qo'llab-quvvatlaydi, IEC 62351 esa elektr energetika tizimlari aloqasi uchun xavfsizlik mexanizmlarini belgilaydi. MQTT Sparkplug va OPC UA sanoat hodisalari hamda semantik ma'lumotlarni uzatish uchun foydali texnologiyalar hisoblanadi, biroq ular energiya boshqaruvi xavfsizligini o'zlari mustaqil ravishda belgilamaydi.

Telekommunikatsiya tarmoqlari uchun ETSI va 3GPP bazaviy stansiyalar hamda mobil tarmoqlarning energiya samaradorligini, jumladan dinamik yuklama va energiya tejash boshqaruvi baholash talablarini belgilaydi. Qayta tiklanuvchi energiya ulushi yuqori mikrogridlar bo'yicha tadqiqotlarda LSTM/GRU va gibril modellar yuqori samaradorlik ko'rsatgani qayd etilgan [1], fizik qonuniyatlarga asoslangan akkumulyator modellari esa ma'lumotlar cheklangan sharoitda moslikni yaxshilaydi [2],[3]. Konformal prognozlash almashinuvchanlik farazi ostida cheklangan tanlama uchun marginal qamrovni ta'minlaydi [4], Digital Twinlar esa aktiv holatini sinxron modellashirish imkonini beradi [5].

Adabiyotlar tahlili

Gibril energiya bilan ta'minlanadigan telekommunikatsiya bazaviy stansiyalarini boshqarish bo'yicha ilmiy adabiyotlar uchta asosiy yo'nalishda shakllangan: Smart Grid va energiya boshqaruvi, telekommunikatsiya uskunalarning energiya samaradorligini baholash hamda intellektual prognozlash va boshqaruv usullari. Siddikov va hammualiflar tomonidan taklif etilgan 2019-yildagi Smart Grid modeli elektr tarmog'i elementlarini MATLAB muhitida modellashirish, monitoring va ikki tomonlama axborot almashinuvi orqali boshqarish imkoniyatlarini ko'rsatgan [6]. Ushbu yondashuv keyingi tadqiqotlar uchun muhim metodik asos bo'lsa-da, u zamonaviy bazaviy stansiyalarda uchraydigan ko'p chastotali telemetriya, trafik bilan bog'liq yuklama o'zgarishi, akkumulyatorning SOC/SOH holati, noaniqlik va kiberxavfsizlik kabi masalalarni yagona Digital Twin holatida birlashtirmaydi. ETSI va 3GPP hujjatlarida 5G bazaviy stansiyalari hamda simsiz kirish tarmoqlarining energiya samaradorligini trafik sharoitlari bilan birgalikda baholash talablari belgilangan [7],[8]. ITU tavsiyalari ham mobil tarmoq energiya samaradorligini o'lchash va



taqqoslash uchun telekommunikatsiyaga xos ko'rsatkichlarni taklif qiladi.

Smart Grid tizimlarining amaliy joriy etilishida o'zaro ishlash va axborot xavfsizligi alohida ilmiy-amaliy yo'nalish sifatida qaraladi. NIST Smart Grid Interoperability Framework elektr energetika tizimlarida turli qurilmalar va axborot tizimlari o'rtasidagi standartlashtirilgan interfeyslar, o'lchovlar va ishonchli ma'lumot almashinuvini ustuvor vazifa sifatida belgilaydi [9]. IEC 61850 elektr energetika obyektlarining mantiqiy tugunlari va ma'lumot almashinuvi tuzilmasini, IEEE 2030.5 esa taqsimlangan energiya resurslari bilan amaliy qatlamdagi aloqani qo'llab-quvvatlaydi. IEC 62351 ushbu axborot almashinuvining maxfiyligi, yaxlitligi va autentifikatsiyasiga qaratilgan xavfsizlik mexanizmlarini belgilaydi. MQTT Sparkplug va OPC UA edge darajasida hodisalarni uzatish va semantik kontekstni saqlash uchun mos texnologiyalar sifatida ko'riladi [10]. Biroq mazkur standart va protokollar prognozlash algoritmini, energiya manbalarini optimal taqsimlash strategiyasini yoki fizik jihatdan xavfsiz boshqaruv qarorini mustaqil ravishda shakllantirmaydi; ular ko'proq ishonchli axborot almashinuvi uchun infratuzilmaviy asos yaratadi.

Sun'iy intellektga asoslangan energiya prognozlash tadqiqotlarida LSTM, GRU va ularning gibrid modifikatsiyalari vaqt bo'yicha murakkab bog'liqliklarni aniqlashda samarali ekanini ko'rsatilgan. Qayta tiklanuvchi energiya ulushi yuqori mikrogridlar bo'yicha zamonaviy tahlillar AI asosidagi prognozlash yondashuvlari quyosh va shamol generatsiyasidagi o'zgaruvchanlikni hamda yuklama dinamikasini aniqlashda istiqbolli ekanini qayd etadi [11]. LSTM arxitekturasining uzoq muddatli vaqt bog'liqliklarini saqlash qobiliyati uning energetik vaqt qatorlari uchun keng qo'llanishiga nazariy asos bo'ladi [12]. Shu bilan birga, faqat ma'lumotlarga tayangan neyron model fizik cheklavlarni bevosita kafolatlamaydi: prognoz xatosi kichik bo'lgan taqdirda ham quvvat balans, akkumulyator chegaralari yoki konvertor samaradorligiga zid holatlar yuzaga kelishi mumkin.

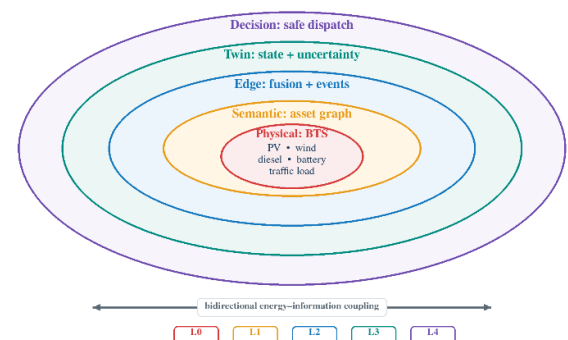
Pollo va hammualliflar hamda Wang va hammualliflarning ishlari fizik tenglamalarni o'rganish jarayoniga kiritish SOC va degradatsiya prognozlarining izchilligini oshirishga yordam berishini ko'rsatadi [13]. Physics-informed transformer yondashuvlari ma'lumotlar cheklangan sharoitlarda ham SOC baholash barqarorligini kuchaytirishi mumkin [14]. Ushbu yo'nalish physics-informed neural networks konsepsiyasiga tayanadi, bunda ma'lumotlarga moslashish bilan bir qatorda differensial yoki algebratik fizik qonunlar yo'qotish funksiyasiga kiritiladi [15]. Gibrid BTS energiya tizimi uchun bu yondashuv ayniqsa muhim, chunki modelning aniqligi bilan birga energiya saqlanishi, SOC diapazoni, konvertor yo'qotishlari va manbalar quvvatining real chegaralari ham bajarilishi kerak.

2. Tadqiqot metodologiyasi

Noaniqlikni baholash, fazoviy bog'liqlik va ko'p maqsadli optimallashtirish bo'yicha tadqiqotlar taklif etilayotgan arxitekturaning boshqa muhim komponentlarini asoslaydi. Konformal prognozlash cheklangan tanlamada va almashinuvchanlik farazi ostida oldindan belgilangan qamrov darajasiga ega prognoz intervallarini shakllantirish imkonini beradi [16]. Bu xususiyat bazaviy stansiyada nuqtaviy prognozdan ko'ra xavfsizroq qaror qabul qilish

uchun zarur, chunki dispatcherlik tizimi kelajakdagi talab yoki qayta tiklanuvchi generatsiyaning faqat o'rtacha qiymatini emas, balki ehtimoliy diapazonini ham hisobga olishi kerak. Graf konvolyutsion tarmoqlari o'zaro bog'langan tugunlar o'rtasidagi fazoviy munosabatlarni modellashtirish uchun metodik asos beradi [17]; bu umumiy fider, ob-havo zonasi yoki qo'shni BTSlar ta'sirini ifodalashda qo'l keladi. NSGA-II kabi ko'p maqsadli genetik optimallashtirish usullari xarajat, ishonchlilik va ekologik mezonlar o'rtasidagi Pareto muvozanatini topishga xizmat qiladi [18]. Interval type-2 fuzzy tizimlar esa aniq chegaraga ega bo'lmagan ish rejimlarini noaniq a'zoliklar orqali ifodalash imkonini beradi [19].

Digital Twin konsepsiyasi fizik obyektning joriy holatini raqamli muhitda sinxron aks ettirish, prognoz natijalarini tekshirish va boshqaruv ssenariylarini real obyektga yuborishdan oldin sinash imkoniyatini beradi. Adabiyotlar umumiy tahlili shuni ko'rsatadiki, mavjud ishlarning aksariyatida ushbu komponentlarning faqat ayrimlari chuqur ishlab chiqilgan: standartlar o'zaro ishlashni ta'minlaydi, AI modellar prognoz aniqligini oshiradi, fizik-informed yondashuvlar fizik moslikni yaxshilaydi, fuzzy va GA usullari noaniqlik hamda parametrlar optimallashtirishini qo'llab-quvvatlaydi, konformal usullar esa prognoz ishonchlilikni ifodalaydi. Biroq telekommunikatsiya trafiki, turli vaqt oralig'idagi sensorlar, aktiv semantikasi, Smart Grid standartlari, fizik cheklavlarni, kalibrlangan noaniqlik, graf konteksti, Digital Twin va fail-closed xavfsiz dispatcherlikni yagona audit qilinadigan energiya-axborot siklida birlashtiruvchi yechim yetarli darajada yoritilmagan. Aynan shu integratsion bo'shliq PI-Fuzzy-GA-LSTM-DT arxitekturasini ishlab chiqish zaruratini belgilaydi.



1-rasm. Gibrid energiya bilan ta'minlanadigan bazaviy stansiyalar uchun konsentrik besh sathli energiya-axborot modeli

Yechilmagan asosiy muammo arxitekturaviy xususiyatga ega. Prognozlashga oid maqolalarda ko'pincha xatolik minimallashtiriladi, biroq turli chastotadagi sensor ma'lumotlari sifati, aktiv semantikasi, fizik bajariluvchanlik, telekommunikatsiya QoS talablari, kiberxavfsizlik va operator ruxsati birgalikda boshqaruv harakatini qanday cheklashi aniq belgilanmaydi. Aksincha, standartlar interfeyslar va metrikalarni belgilaydi, ammo adaptiv inferensiya algoritmini bermaydi. Taklif etilgan arxitektura ushbu sohalarini aniq shartnomalar orqali bog'laydi va baholash, noaniqlik, optimallashtirish hamda xavfsiz ijroni ajratadi.

Nima uchun Fuzzy-GA-LSTM modernizatsiya qilinishi kerak. An'anaviy fuzzy boshqaruvchi izohlanuvchan, biroq qo'lda tanlangan a'zolik funksiyalariga sezgir. Genetik algoritmlar ushbu funksiyalarni



sozlashi mumkin, ammo u muayyan ssenariyga ortiqcha moslashib qolishi ehtimoli mavjud. LSTM vaqt bo'yicha bog'liqliklarni ushlaydi, biroq quvvat balansini buzishi va haddan tashqari ishonchli nuqtaviy prognozlarni berishi mumkin. Taklif etilgan yondashuvda har bir usulga chegaralangan rol beriladi: fuzzy mantiq noaniq ish rejimlarini ifodalaydi, GA cheklangan offline qidiruvni va nazoratlangan online moslashuvni amalga oshiradi, LSTM vaqt holatini prognozlaydi, fizik jarimalar mantiqan mumkin bo'lmagan trayektoriyalarni rad etadi, konformal kalibrash esa qoldiq noaniqlikni miqdoriy baholaydi.

Akkumulyatorlar bo'yicha so'nggi tadqiqotlar fizik qonuniyatlarga asoslangan rekurrent va transformer modellar SOC/SOH baholashini yaxshilashini ko'rsatmoqda. Graf neyron tarmoqlari fiderlar va bazaviy stansiyalararo kontekstni ifodalash mexanizmini ta'minlaydi, ko'p maqsadli evolyutsion optimallashtirish esa xarajat-ishonchlilik muvozanatini qo'llab-quvvatlaydi. Biroq ushbu yutuqlar telekommunikatsiya trafiki, Smart Grid o'zaro ishlashi va xavfsizlik bilan cheklangan Digital Twin bilan bitta audit qilinadigan monitoring siklida kamdan-kam hollarda integratsiyalanadi.

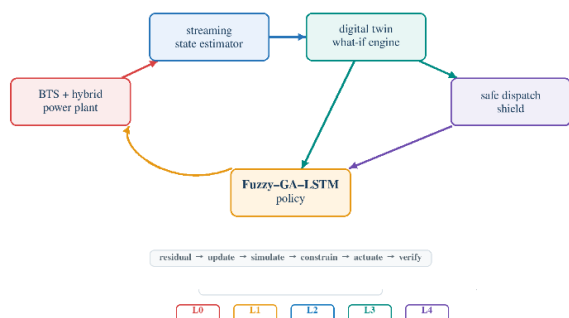
Shuning uchun mazkur ishning hisss kattaroq neyron tarmoq avtomatik ravishda yaxshiroq degan da'vo emas. Bu tizimli metod bo'lib, unda har bir prognoz manba sifati, fizik qoldiq, interval qamrovi, ish rejimiga a'zolik, model versiyasi va boshqaruvga ruxsat berilish holatini o'zida olib yuradi. Ushbu dalillar sensorlardan ijro qurilmasigacha bo'lgan qaror bilan birga uzatiladi.

Ko'p sathli energiya-axborot modeli:

Holat besh sathga tashkil etiladi. L0 — PV, shamol, elektr tarmog'i, dizel, akkumulyator, konvertorlar va BTS yuklamasini ifodalaydi. L1 aktivlar, kattaliklar, birliklar, topologiya va ruxsat etilgan diapazonlarni belgilaydi. L2 turli chastotadagi namunalarni edge darajasida sifat belgilariga ega hodisalarga aylantiradi. L3 Digital Twin holati va noaniqligini saqlaydi. L4 prognozlarni, maqsadlar, cheklovlar va ruxsat etilgan harakatlarni baholaydi. Sathlararo aloqalarda yagona aktivlar reyestri, yagona hodisa-vaqt qoidasi va aniq kelib chiqish ma'lumotlaridan foydalaniladi.

$$\mathcal{E}_t = \langle G_e, X_t, Z_t, Q_t, \Theta_t, \Pi_t \rangle, G_e = (V_e, E_e) \quad (1)$$

(1)-tenglamada G_e energiya-axborot aktivlari grafini, X_t xom va hosil qilingan kuzatuvlarni, Z_t sinxronlashtirilgan Digital Twin holatini, Q_t sifat va noaniqlikni, Θ_t model hamda fuzzy-siyosat parametrlarini, Π_t esa xavfsizlik/kiberxavfsizlik siyosatini bildiradi. Oddiy tekis o'lchov jadvalidan farqli ravishda, ushbu tasvir topologiyani saqlaydi va kuzatilgan, baholangan, prognoz qilingan hamda buyruq berilgan qiymatlarni bir-biridan ajratadi.



2-rasm. Fizik BTS holatidan tekshirilgan ijrogacha qoldiq xatoga asoslangan Digital Twin sikli

2-jadval

Asosiy obyektlar, o'zgaruvchilar, namuna olish oraliqlari va semantik rollar

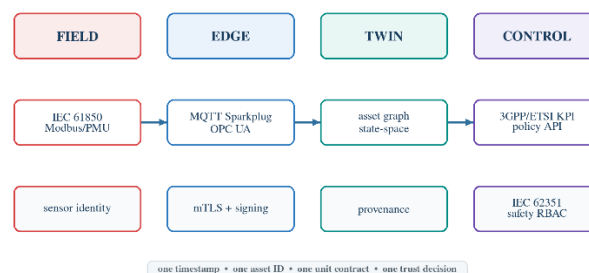
Obyekt/ o'zgaruvchi	Birlik	Namun a olish	Roli
V, I, P, Q, f	V/A/W/ VAR/Hz	1 s	elektr holati
Akkumulyat or SOC/SOH	%	5 s / 60 s	zaxira va qarish
Irradiatsiya / shamol	W/m ² / m/s	10 s / 5 s	qayta tiklanuvchi kirish
Yoqilg'i sathi	%	30 s	dizel zaxirasi
Harorat/nam lik	°C / %	10 s	issiqlik/ob-havo konteksti
BTS trafiki	Erlang yoki Mbps	5 s	telekommunikats iya talabi drayveri

$$q_{i,t} = F_{i,t} \cdot C_{i,t} \cdot V_{i,t} \cdot \exp(-\lambda_i \Delta t) \cdot (1 - o_{i,t}) \quad (2)$$

(2)-tenglama yangilik darajasi F , to'liqlik C , yaroqlilik V , kechikish jarimasi va chet qiymat ehtimoli o ni birlashtiradi. Sifat balli manbaga xos bo'ladi: bir soniya himoya toki uchun muhim bo'lishi mumkin, biroq akkumulyator SOH uchun ahamiyatsiz bo'lishi mumkin. Past sifatlil ma'lumotlar yashirin ravishda to'ldirilmaydi; hodisa imputatsiya belgisi bilan birga uzatiladi va Digital Twin o'z noaniqlik intervalini kengaytiradi.

Semantik va protokol darajasidagi o'zaro ishlash:

Dala o'lchovlari kanonik aktiv IDlari, SI birliklari, faza/kanal identifikatorlari, hodisa vaqti, sifat va muhandislik chegaralariga moslashtiriladi. IEC 61850 mantiqiy tugunlari elektr funksiyalarini tavsiflashi mumkin; MQTT Sparkplug yoki OPC UA edge-hodisalarni uzatishi mumkin; 3GPP/ETSI KPI ko'rsatkichlari energiya iste'molini telekommunikatsiya samaradorligi bilan moslashtiradi. Protokol tanlovi xavfsizlik siyosatini bekor qilmaydi: har bir buyruq identifikatsiya, yaxlitlik, avtorizatsiya, dolzarblilik va fizik bajariluvchanlik tekshiruvlaridan o'tishi shart.



3-rasm. Protokol va ishonch chegaralari bilan dala, edge, Digital Twin va boshqaruv tekisliklari

3-jadval

Texnologiyalar mas'uliyati va aniq chegaralari

Komponent	Mas'ul vazifa	Aniq mas'ul bo'lmagan vazifa
IEC 61850	elektr axboroti /almashinuvi	prognozlash algoritmi



MQTT Sparkplug / OPC UA	edge-hodisalar va semantika	xavfsizlik avtorizatsiyasi
3GPP/ETSI KPI	telekommunikatsiya energiya baholashi	obyekt himoyasi
Fuzzy qatlam	noaniq ish rejimlari	qat'iy cheklovni bekor qilish
GA	chegaralangan parametr qidiruvi	cheklanmagan online boshqaruv
LSTM + graf konteksti	vaqt/fazoviy prognoz	fizik bajariluvchanlik kafolati

Fizik jihatdan mos gibrid energiya holati: Digital Twin DC-shina balansini, konvertor yo'qotishlarini, akkumulyator SOC/SOH holatini, yoqilg'i zaxirasini, qayta tiklanuvchi energiyani cheklashni, tarmoqdan import/eksportni va BTS talabini saqlaydi. Yuklama modeli radio trafik va issiqlik bilan bog'liq qo'shimcha sarfni ham o'z ichiga oladi. Holat yangilanishi faqat uning qoldiq xatosi sensor noaniqligiga mos bo'lsa qabul qilinadi; aks holda hodisa karantinga olinadi, qayta vaznlanadi yoki sensor diagnostikasini ishga tushirish uchun foydalaniladi.

$$rP(t) = PPV + PW + PG + PD + PB - PBTS - Ploss, Lphys = \|rP\|_1 + \mu \cdot Pviol(SOC) \quad (3)$$

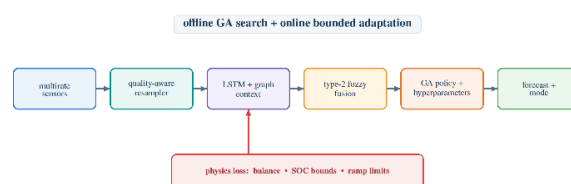
(3)-tenglama oniy quvvat balansi qoldig'ini va SOC buzilishlarini ham qamrab oluvchi fizik yo'qotish funksiyasini belgilaydi. Konvertor samaradorligi, akkumulyatorning ishora qoidasi va hisoblagich joylashuvi aniq kodlanadi. Bu modelning statistik jihatdan qulay, ammo energiyani "yaratib yuboradigan" yoki akkumulyatorni ruxsat etilgan chegaradan chiqaradigan trayektoriyani o'rganishiga yo'l qo'yilmaydi.

Turli chastotadagi hodisalarini vaqt bo'yicha moslashtirish. Kuchlanish, tok, aktiv/reaktiv quvvat va chastota har soniyada; SOC, shamol va trafik har 5 soniyada; irradiatsiya, harorat va namlik har 10 soniyada; yoqilg'i har 30 soniyada; SOH esa har 60 soniyada kelib tushadi. Edge darajasi sababiy qayta namunalash, chegaralangan interpolatsiya va yetishmayotgan qiymatlar maskalaridan foydalanadi. Hech bir kelajak namunasi avvalgi prognoz o'ynasiga sizib kirishiga yo'l qo'yilmaydi.

PI-FUZZY-GA-LSTM adaptiv algoritmi: Prognozlash yadrosi so'nggi o'lchovlar, sifat maskalari, taqvim/ob-havo konteksti, trafik yuklamasi va grafdagi qo'shni obyektlar xususiyatlarini qabul qiladi. LSTM vaqt bo'yicha bog'liqliklarni kodlaydi, yengil graf agregatsiyasi esa yaqin joylashgan stansiyalar o'rtasidagi umumiy fider yoki ob-havo ta'sirlarini hisobga oladi. Chiqish bir nechta prognoz gorizontalari uchun qayta tiklanuvchi generatsiya, BTS talabi, SOC trayektoriyasi va nosozlik xavfi belgilarini o'z ichiga oladi.

$$\hat{y}_{t+h} = f\theta(H_t, M_t, G_t), \theta^* = \operatorname{argmin}_{\theta} [Lpred + \alpha Lphys + \beta Lcal + \gamma Ldrift] \quad (4)$$

(4)-tenglama prognoz xatoligi, fizik jarima, interval kalibrlash yo'qotishi va drift regularizatsiyasini birlashtiradi. Og'irliklar test to'plamida emas, validatsiya ssenariylarida tanlanadi. Neyron prognozlovchi uchun yetarli dalil bo'lmagan hollarda arxitektura soddaroq holat-fazo yoki persistence modeliga qaytishi mumkin.



4-rasm. Graf konteksti va chegaralangan moslashuvga ega fizik qonuniyatlarga asoslangan Fuzzy-GA-LSTM konveyeri blok sxemasi



5-rasm. Offline optimallashtirish va online adaptiv inferensiya algoritmi

Interval type-2 fuzzy ish rejimlari: Kirish shartlari qayta tiklanuvchi energiya zaxirasi, SOC, trafik intensivligi, uzilish ehtimoli, yoqilg'i zaxirasi, prognoz intervali kengligi va sensor sifatini o'z ichiga oladi. Interval type-2 to'plamlar a'zolik chegaralaridagi noaniqlikni ifodalaydi. Qoidalar eco, balanced, resilient, maintenance va emergency rejimlarining kuchini hosil qiladi. Qoidalar faollashuvi qattiq xavfsizlik cheklovlari tekshirilgandan keyingina normallashtiriladi va defuzzifikatsiya qilinadi.

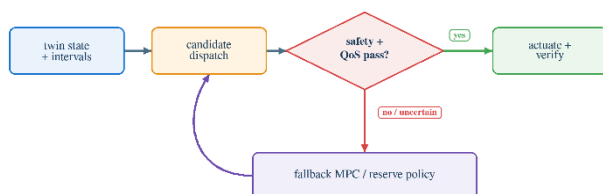
Genetik optimallashtirish va ortiqcha moslashuvni nazorat qilish. GA xromosomasi a'zolik funksiyalari sinish nuqtalari, tanlangan qoidalar og'irliklari, LSTM kengligi, retrospektiv oyna, dropout va fizik/kalibrlash og'irliklarini kodlaydi. Bajariluvchanlikni tiklash mexanizmi a'zolik nuqtalarining tartibini va parametrlar chegaralarini saqlaydi. Moslik funksiyasi bloklangan vaqt qatorlari validatsiyasidan foydalanadi hamda ob-havo, trafik va uzilish rejimlari bo'yicha dispersiyani jarimaga tortadi. Ixcham xromosoma va erta to'xtatish shovqinni optimallashtirish xavfini kamaytiradi.

Xavfsiz dispatcherlik va Digital Twin boshqaruvi. Model manbalar ulushi va zaxira harakatlarini taklif qiladi, biroq tavsianing ijro qilinishi mumkinligini xavfsizlik filtri hal qiladi. U akkumulyator toki/SOC, dizel generatorning minimal yoqilgan /o'chirilgan vaqti, konvertor quvvati, elektr tarmog'i chegaralari, qayta tiklanuvchi quvvat rampasi, BTS zaxira avtonomligi, trafik-QoS xavfi, aloqa dolzarbligi va avtorizatsiyani tekshiradi. Rad etilgan harakatlar tekshirilgan zaxira siyosati bilan almashtiriladi.

$$u^* = \operatorname{argmin}_u E[J(u, \omega)] + \beta \cdot CVaR_{\alpha}[J(u, \omega)] + \gamma CO_2(u), u \in U_{safe} \quad (5)$$

(5)-tenglama xavfsiz bajariluvchi to'plam doirasida kutilayotgan ekspluatatsion xarajati, yuqori dumli ishonchlilik xavfi va uglerod proksisini muvozanatlashtiradi. Optimallashtiruvchi bitta cheklanmagan minimum o'rniga Pareto egri chizig'idagi "tizza" nuqtani tanlashi mumkin. Siyosat og'irliklari natija bilan birga saqlanadi, shuning uchun operatorlar muhandislik cheklovi va iqtisodiy afzallikni farqlay oladi.





6-rasm. Fail-closed xavfsizlik va telekommunikatsiya QoS filtri bilan yopiq konturli dispatcherlik blok-sxemasi



7-rasm. Xavfni hisobga oluvchi dispatcherlik va tekshirilgan ijro algoritmi

Baholash mezonlari: Baholashda qayta tiklanuvchi quvvat MAPE, BTS yuklamasi MAE, SOC RMSE, nominal va empirik interval qamrovi, ta'minlanmagan energiya, dizel ishlash vaqti, qayta tiklanuvchi energiyadan foydalanish hamda xavfsizlik buzilishlari soni keltiriladi. Prognozlash metrikalarini dispatcherlik metrikalaridan alohida hisoblanadi. Barcha usullar bir xil xronologik foldlar, sensor nosozliklari, ob-havo rejimlari, trafik sakrashlari va uzilish jadvalarini oladi.

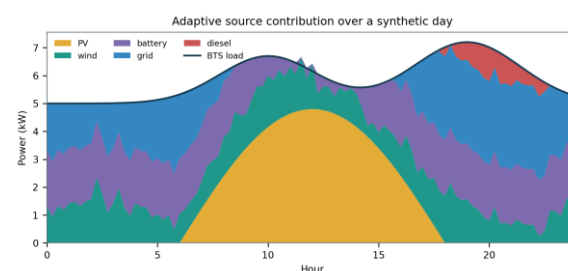
To'rtta konfiguratsiya taqqoslanadi: qoidalarga asoslangan EMS, an'anaviy type-1 fuzzy EMS, fizik/kalibrlashsiz GA-LSTM va PI-Fuzzy-GA-LSTM-DT. Ushbu ketma-ketlik adaptiv vaqt qatorlarini o'rganish, sozlangan fuzzy birlashtirish, fizik regularizatsiya, kalibrlangan intervallar, graf konteksti va xavfsizlik filtrining ta'sirini alohida baholash imkonini beradi.

Takrorlanuvchanlik protokoli: 20260810 seed qiymati 12 ta bazaviy stansiya, 90 kunlik ko'p chastotali telemetriya, uchta ob-havo rejimi, beshta trafik rejimi, 36 ta elektr tarmog'i uzilishi, sensor og'ishi/ma'lumot yo'qolishi portlashlari va akkumulyator qarish driftini hosil qiladi. Konfiguratsiya fayllarida namuna olish, topologiya,

o'qitish/kalibrlash/test chegaralari, GA populyatsiyasi, tasodifiy urug'lar, model xeshlari va metrika ta'riflari saqlanadi. Haqiqiy abonent yoki operator ma'lumotlaridan foydalanilmaydi.

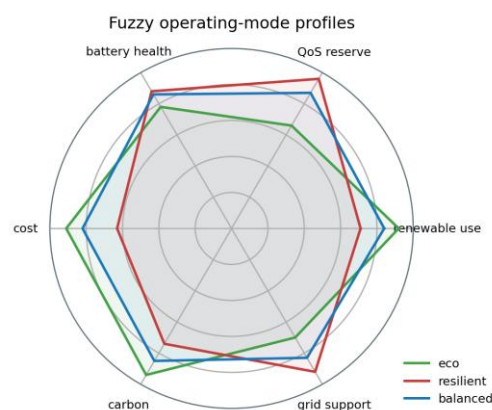
3. Natijalar va muhokamalar

Birinchi tajriba qayta tiklanuvchi generatsiya, akkumulyator yordami, tarmoq importi, dizel zaxirasi va BTS talabi o'rtasidagi o'zaro ta'sirni ko'rsatadi. Boshqaruvchi kechki trafik cho'qqisidan oldin akkumulyator zaxirasini saqlagan holda qayta tiklanuvchi energiyaga ustuvorlik beradi. Dizel generatori doimiy ravishda "arzon" manba sifatida optimallashtirilmaydi, balki ishonchlik resursi bo'lib qoladi.



8-rasm. Sintetik 24 soatlik BTS siklida beshta energiya manbasining adaptiv hissasi grafi

Manbalar oqimi grafi bir xil talab prognoz noaniqligi va zaxira siyosatiga qarab turli energiya aralashmalari bilan qoplanishi mumkinligini ko'rsatadi. Boshqaruvchi yuqori xavfli vaqt oralig'idan oldin akkumulyatorni zaryadlaydi yoki uning zaxirasini saqlaydi; bu monitoring va dispatcherlik bir xil sinxronlashtirilgan Digital Twin holatidan foydalanishi zarurligini ko'rsatadi.



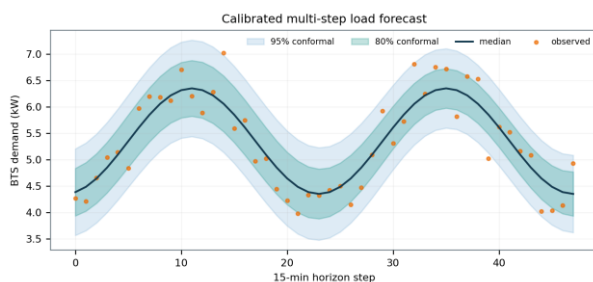
9-rasm. Eco, resilient va balanced fuzzy ish rejimlarining radar taqqoslanishi grafi

Fuzzy rejimlar o'zaro istisno qiluvchi qat'iy yorliqlar emas; ular siyosiy ustuvorliklarni darajali tarzda ifodalaydi [20]. Eco rejimi qayta tiklanuvchi energiyadan foydalanish va uglerodni kamaytirishga urg'u beradi, resilient rejim QoS zaxirasi va elektr tarmog'i yordamini kuchaytiradi, balanced rejim esa keskin muvozanatsiz kompromisslardan qochadi. Qattiq cheklolar fuzzy ballidan tashqarida qoladi.

Kalibrlangan ko'p bosqichli prognozlash. Trafik va qayta tiklanuvchi energiya tez o'zgaradigan davrlarda prognoz noaniqligi kengayadi. Konformal fan-grafik median

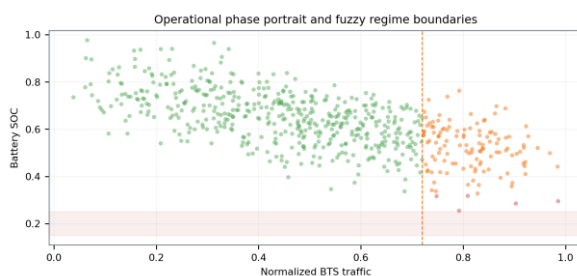


prognozni 80% va 95% kalibrlangan diapazonlardan ajratib ko'rsatadi [21]. Operatsion qarorlar median qiymatni aniq deb qabul qilish o'rniga, cheklovga mos yuqori yoki quyi chegaradan foydalanadi.



10-rasm. BTS talabini 48 bosqichga prognozlash uchun split-conformal fan-grafigi

Taklif etilgan model sintetik test davrida nominal 95% interval uchun 94,6% empirik qamrovni qayd etdi. Rejim o'zgarishlarida interval kengayadi, bu noaniqlikni halol aks ettirish uchun qabul qilinadigan "narx" hisoblanadi. Dala sharoitida joriy etishdan oldin qamrov mavsum va trafik sinfi bo'yicha qayta tekshirilishi kerak.



11-rasm. O'rganilgan fuzzy rejim chegaralari bilan SOC-trafik faza portreti grafigi

Quyida o'rta boshqaruv konfiguratsiyasi uchun sintetik prognozlash va dispetcherlik metrikalari umumiy miqdoriy taqqoslash jadvali keltirilgan.

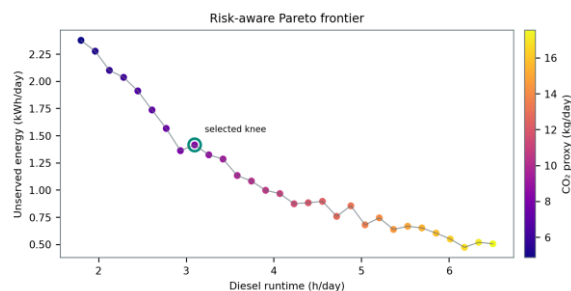
4-jadval

To'rtta boshqaruv konfiguratsiyasi uchun sintetik prognozlash va dispetcherlik metrikalari

Boshqaruvchi	Yuklama MAE, kW	Qayta tiklanuvchi v-chi MAPE %	SOC RMS E, %	Ta'minlanmagan, kWh/kun
Qoidalarga asoslangan EMS	1.92	14.8	5.7	3.8
Type-1 fuzzy EMS	1.47	11.2	4.4	2.9
GA-LSTM	0.96	7.5	3.1	1.7
PI-Fuzzy-GA-LSTM-DT	0.61	4.9	1.9	0.8

PI-Fuzzy-GA-LSTM-DT BTS yuklamasi uchun 0,61 kW MAE, qayta tiklanuvchi quvvat uchun 4,9% MAPE, SOC uchun 1,9% RMSE, kuniga 0,8 kWh ta'minlanmagan energiya va kuniga 2,8 soat dizel ishlash vaqtiga erishdi. Qoidalarga asoslangan bazaviy usul ancha tushunarli, biroq trafik va ob-havoning bog'langan o'zgarishlariga sust javob

beradi. GA-LSTM prognozni yaxshilaydi, ammo quvvat balansi va SOC jarimalarisiz fizik jihatdan nomuvofiq trayektoriyalar hosil qiladi.

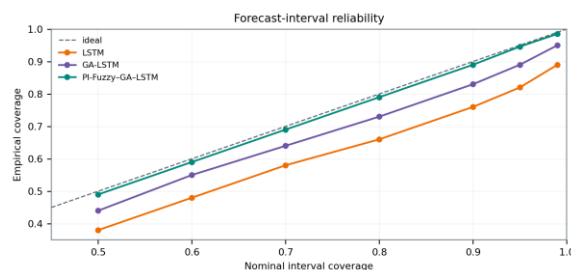


12-rasm. Dizel ishlash vaqti, ta'minlanmagan energiya va uglerod proksisi o'rtasidagi Pareto chegarasi grafigi

Pareto grafigi faqat dizel ishlash vaqtini minimallashtirish ta'minlanmagan energiyani oshirishini ko'rsatadi [22]. Tanlangan "tizza" nuqta universal optimal emas; u e'lon qilingan xavf va uglerod og'irliklarini aks ettiradi. Pareto chegarasini ko'rsatish operatorlarga yashirin skalyar maqsadni qabul qilish o'rniga kompromissni ko'rib chiqish imkonini beradi.

Tushuntiriluvchanlik va audit dalillari: Har bir tavsiya sensor sifati, aktiv holati surati, fuzzy a'zoliklar, faol qoidalar, GA xromosoma versiyasi, LSTM/model xeshi, graf qo'shnichiligi, fizik qoldiq, konformal kvantil, maqsad funksiyasi tarkibi, rad etilgan cheklovlar, imzolangan buyruq, o'lchangan javob va rollback natijasini saqlaydi [23]. Bu xususiyatlar ahamiyatidan tashqari jarayon tushuntiriluvchanligini ham ta'minlaydi.

Kalibrash, ablyatsiya va barqarorlik: Ablyatsiya tahlilida mexanizmlar bittadan olib tashlanadi. Fizik yo'qotishni olib tashlash oson davrlarda nuqtaviy xatolikni biroz kamaytiradi, biroq SOC va quvvat balansi buzilishlarini oshiradi. Konformal kalibrlashsiz intervallar tor va yetarli qamrov bermaydi. Graf kontekstini olib tashlash bog'langan ob-havo/uzilish prognozini yomonlashtiradi; xavfsizlik filtrini olib tashlash esa prognoz xatolarini buyruq buzilishlariga aylantiradi.



13-rasm. LSTM, GA-LSTM va kalibrlangan taklif etilgan model uchun ishonchlilik diagrammasi grafigi

5-jadval

Sintetik benchmarkda ablyatsiya va stress-test ta'sirlari

Variant	95% qamrov, %	Balans buzilishi /kun	Dizel soat /kun	Xavfsizlik bloklari /kun
To'liq model	94.6	0.0	2.8	0.7
– fizik yo'qotish	91.8	3.4	2.6	3.9

– konformal kalibrlash	78.2	0.1	2.7	1.8
– graf konteksti	90.5	0.2	3.3	1.2
– xavfsizlik filtri	93.9	2.7	2.5	0.0

To'liq model belgilangan sinov stendida prognozlash, kalibrlash va xavfsizlikning eng yaxshi birgalikdagi profilini ko'rsatadi. Natijalar qo'shilgan murakkablik har doim ham o'zini oqlaydi degani emas. Ma'lumoti cheklangan kichik obyekt kalibrlangan holat-fazo bazaviy modelini ayni xavfsizlik filtri va axborot shartnomalari bilan birgalikda oqilona qo'llashi mumkin.

4. Xulosa

Ushbu maqolada gibrid energiya bilan ta'minlanadigan telekommunikatsiya bazaviy stansiyalarini monitoring qilish uchun ko'p sathli energiya–axborot modeli va PI-Fuzzy–GA–LSTM–DT adaptiv algoritmi ishlab chiqildi. Arxitektura Smart Grid o'zaro ishlashini, ko'p chastotali edge-sensorlashni, aktiv semantikasini, fizik qonuniyatlarga asoslangan prognozlashni, interval type-2 fuzzy rejimlarni, GA sozlashni, graf kontekstini, konformal noaniqlikni, Digital Twinni va fail-closed xavfsiz dispatcherlikni birlashtiradi. Sintetik tajribalar belgilangan farazlar ostida prognozlash aniqligi, qamrov kalibrlanishi, qayta tiklanuvchi energiyadan foydalanishning yaxshilanishi hamda ta'minlanmagan energiya va dizel ishlash vaqtining kamayishini ko'rsatdi. Keyingi ilmiy bosqich kuzatilgan trafik, ob-havo, akkumulyator qarishi, kiberxavfsizlik sinovlari va oldindan belgilangan baholash mezonlari bilan bosqichma-bosqich hardware-in-the-loop hamda operator pilot sinovlarini o'tkazishdan iborat.

Foydalangan adabiyotlar / References

- [1] Osifeko, M., Munda, J.L. AI-Based Forecasting in Renewable-Rich Microgrids: Challenges and Comparative Insights. IEEE Access. 2025, 13, 130446–130474. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3591091>
- [2] Djumanov, J., Yakhshibaev, R., Khushvaktov, S., Sayfullaeva, N. Mathematical Model and Software Package for Calculating the Balance of Information Flow. 2021 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT). 2021, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICISCT52966.2021.9670277>
- [3] Wang, F., Zhai, Z., Zhao, Z., Di, Y., Chen, X. Physics-Informed Neural Network for Lithium-Ion Battery Degradation Stable Modeling and Prognosis. Nature Communications. 2024, 15, 4332. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48779-z>
- [4] Angelopoulos, A.N., Bates, S. A Gentle Introduction to Conformal Prediction and Distribution-Free Uncertainty Quantification. arXiv preprint arXiv:2107.07511. 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.07511>
- [5] Glaessgen, E.H., Stargel, D.S. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles.

53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. 2012, 1–14. <https://doi.org/10.2514/6.2012-1818>

[6] I. K. Siddikov, M. A. Anarbaev, A. A. Abdumalikov, M. A. Sobirov, M. T. Maxsudov and I. M. Xonturaev, "Technological aspects of modelling and research of smart grid," 2019 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT), Tashkent, Uzbekistan, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICISCT47635.2019.9011936. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9011936>

[7] M. X. Cheng, Y. Li, and D.-Z. Du, "Combinatorial Optimization in Communication Networks," Springer, 2006, 685 p.

[8] Borisov, V.V., Kruglov, V.V., Fedulov, A.S. Fuzzy Models and Networks. Moscow, Russia: Hotline-Telecom, 2007, 284 p.

[9] Sobirov, M., Kurbanova, I., Sobirova, Z. Fuzzy Network Analysis for Neuron Viability in Production Models. AIP Conference Proceedings. 2026, 3374, 050096. <https://doi.org/10.1063/5.0317178>

[10] National Institute of Standards and Technology. NIST Smart Grid Interoperability Framework 4.0. NIST Smart Grid Group. <https://www.nist.gov/ctl/smart-connected-systems-division/smart-grid-group>

[11] Djumanov, J., Egamberdiev, K., Murodullaev, B., Haqnazarova, D. Numerical Calculation of Groundwater Geofiltration Processes in Multilayer Porous Media. 2024, 27–30. <https://doi.org/10.61587/3030-3141-2024-1-2-27-30>

[12] Hochreiter, S., Schmidhuber, J. Long Short-Term Memory. Neural Computation. 1997, 9(8), 1735–1780. <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>

[13] Pollo, G., Burrello, A., Macii, E., Poncino, M., Vinco, S., Pagliari, D.J. Coupling Neural Networks and Physics Equations For Li-Ion Battery State-of-Charge Prediction. Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition (DATE). 2025, 1–7. <https://doi.org/10.23919/DATE64628.2025.10993233>

[14] Angelopoulos, A.N., Bates, S. A Gentle Introduction to Conformal Prediction and Distribution-Free Uncertainty Quantification. arXiv preprint arXiv:2107.07511. 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.07511>

[15] Raissi, M., Perdikaris, P., Karniadakis, G.E. Physics-Informed Neural Networks: A Deep Learning Framework for Solving Forward and Inverse Problems Involving Nonlinear Partial Differential Equations. Journal of Computational Physics. 2019, 378, 686–707. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.10.045>

[16] Ahn, H., Shen, H., Zhou, X., Kung, Y.-C., Wang, J. State of Charge Estimation of Lithium-Ion Batteries Using Physics-Informed Transformer for Limited Data Scenarios. ASME Letters in Dynamic Systems and Control. 2023, 3(4), 041002. <https://doi.org/10.1115/1.4063995>

[17] Kipf, T.N., Welling, M. Semi-Supervised Classification with Graph Convolutional Networks. International Conference on Learning Representations (ICLR). 2017. <https://arxiv.org/abs/1609.02907>

[18] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2002, 6(2), 182–197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>

[19] Mendel, J.M. Uncertain Rule-Based Fuzzy Systems: Introduction and New Directions. Cham,



Switzerland: Springer, 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-51370-6>

[20] Zadeh, L.A. Fuzzy Sets. Information and Control. 1965, 8(3), 338–353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)

[21] Suresh, V., Revathi, B.S., Guerrero, J.M. A Non-Parametric Adaptive Conformal Inference Based Probabilistic Hour-Ahead Solar PV Power Forecasting Method. Scientific Reports. 2026, 16, 11730. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-40911-x>

[22] Saif, A., Gad Elrab, K., Zeineldin, H.H., Kennedy, S., Kirtley, J.L. Multi-Objective Capacity Planning of a PV-Wind-Diesel-Battery Hybrid Power System. 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2011. <https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039825>

[23] Ojewale, V., Suresh, H., Venkatasubramanian, S. Audit Trails for Accountability in Large Language Models. 2026. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2601.20727>.

Mualliflar to‘g‘risida ma’lumot/ Information about the authors

Djumanov
Jamoljon
Xudaykulovich
/ Jamoljon
Djumanov

Muhammad al-Xorazmiy
nomidagi Toshkent axborot
texnologiyalari universiteti
“Kompyuter tizimlari” kafedras
professori
E-mail: jamoljon@tuit.uz
Tel.: +998933846363
<https://orcid.org/0000-0001-6043-2495>

Sobirov
Muzaffar
Azatovich /
Muzaffar
Sobirov

Toshkent davlat transport
universiteti “Transportda
axborot tizimlari va
texnologiyalari” kafedras
mustaqil tadqiqotchisi
E-mail:
muzaffarsobirov538@gmail.com
Tel.: +998909314809
<https://orcid.org/0009-0000-4719-9481>



A. Gulomova

Current state and development prospects of heat-insulating cellular concrete for individual residential buildings.....115

F. Usarkulova, E. Abdurahmanova, M. Botirov

Regression model of service system optimization based on digitalization.....120

E. Abdurahmanova, F. Usarkulova, M. Botirov

Mathematical modeling and artificial intelligence methods for oil filtration processes in multilayer porous media: An analytical review.....124

Sh. Khakimov, D. Odilov, U. Isokhanov

Analysis of oil products consumption and exchange processes by trucks moving under the conditions of the Kamchik pass.....132

J. Djumanov, M. Sobirov

Multi-level energy-information model and physics-informed FUZZY-GA-LSTM adaptive algorithms for hybrid energy monitoring.....139

T. Muminov, D. Dolieva

Comprehensive assessment of the operational performance indicators of motor vehicles considering seasonal operating conditions.....148

S. Norkulov

Concept for improving the management system of “Tashkent metropoliteni” JSC based on regional operational hubs.....156