ISHLAB CHIQARISH JARAYONLARIDA ENERGIYA SARFINI MONITORING QILISH VA OPTIMALLASHTIRISH ALGORITMINI ISHLAB CHIQISH

Kamolova Fotima Alisher qizi
Toshkent to'qimachilik va yengil sanoat instituti (TTYeSI)
DOI:https://doi.org/10.5281/zenodo.22877215

ANNOTATSIYA

Ushbu tezisda ishlab chiqarish jarayonlarida elektr energiyasi sarfini real vaqt rejimida monitoring qilish, energiya samaradorligi ko'rsatkichlarini hisoblash, me'yordan og'ishlarni aniqlash va moslashuvchan yuklamalarni optimallashtirishga mo'ljallangan ko'p bosqichli algoritm taklif etiladi. Algoritm smart-meter, tok va kuchlanish sensorlari, PLC/SCADA/MES hamda sanoat IoT shlyuzlaridan keladigan vaqt qatorlarini birlashtiradi; ma'lumotlarni tozalash va sinxronlashdan so'ng energiya bazaviy chizig'i, maxsus energiya sarfi (SEC), cho'qqi quvvat, bekor turish energiyasi va EnPI og'ishi hisoblanadi. Keyingi bosqichda prognoz modeli kutilayotgan iste'molni baholaydi, anomaliya moduli ortiqcha sarfni belgilaydi va ko'p mezonli optimallashtirish bloki ishlab chiqarish hajmini pasaytirmagan holda energiya, tarif xarajati hamda cho'qqi yuklamani minimallashtiruvchi boshqaruv qarorini shakllantiradi. Algoritmning ishlash mantig'i imitatsion 24 soatlik ishlab chiqarish profili orqali namoyish etildi. Natijalar monitoringni faqat vizual nazoratdan yopiq siklli "o'lchash–tahlil–qaror–teskari aloqa" tizimiga o'tkazish energiya menejmenti samaradorligini oshirishini ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: energiya monitoringi, energiya samaradorligi, Industry 4.0, IIoT, SCADA, EnPI, energiya bazaviy chizig'i, maxsus energiya sarfi, mashinaviy o'qitish, optimallashtirish algoritmi.

АННОТАЦИЯ

В тезисе предложен многоэтапный алгоритм мониторинга и оптимизации энергопотребления производственных процессов в реальном времени. Алгоритм объединяет данные интеллектуальных счетчиков, датчиков тока и напряжения, PLC/SCADA/MES и промышленного Интернета вещей; рассчитывает энергетические показатели, выявляет отклонения от базового режима, прогнозирует ожидаемое потребление и формирует управляющие воздействия с учетом производственных ограничений. Работоспособность подхода демонстрируется на имитационном суточном профиле. Предлагаемая архитектура ориентирована на переход от пассивного учета энергии к замкнутому циклу «измерение–анализ–решение–обратная связь».

Ключевые слова: энергетический мониторинг, энергоэффективность, IIoT, SCADA, EnPI, удельное энергопотребление, машинное обучение, оптимизация.

ABSTRACT

This thesis proposes a multi-stage algorithm for real-time monitoring and optimization of energy consumption in manufacturing processes. The algorithm integrates time-series data from smart meters, electrical sensors, PLC/SCADA/MES and industrial IoT gateways; computes energy-performance indicators, detects deviations from a baseline, forecasts expected consumption and generates control decisions under production constraints. A 24-hour simulation profile is used to demonstrate the logic of

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

the approach. The proposed architecture transforms passive energy metering into a closed-loop "measure–analyse–decide–feedback" energy-management process.

Keywords: energy monitoring, energy efficiency, IIoT, SCADA, EnPI, specific energy consumption, machine learning, optimization algorithm.

KIRISH

Sanoat korxonalarida energiya resurslari nafaqat ishlab chiqarish tannarxining muhim tarkibiy qismi, balki texnologik barqarorlik va ekologik samaradorlikni belgilovchi omillardan biridir. Zamonaviy ishlab chiqarish tizimlarida elektr yuritmalar, kompressorlar, pechlar, nasoslar, ventilyatsiya, robotlar va yordamchi infratuzilma bir vaqtning o'zida turli yuklama rejimlarida ishlaydi. Shu sababli umumiy hisoblagichdan olingan sutkalik yoki oylik ko'rsatkich energiya isrofining aynan qaysi jarayonda, qaysi vaqtda va qanday sabab bilan yuzaga kelganini aniqlash uchun yetarli emas. ISO 50001 energiya menejmentini uzluksiz takomillashtirishga qaratilgan tizimli yondashuv sifatida belgilaydi, ISO 50006 esa energiya samaradorligini EnPI va energiya bazaviy chiziqlari orqali o'lchash va monitoring qilishni tavsiya etadi (1, 2).

Raqamlashtirish sharoitida energiya monitoringi alohida o'lchash vazifasidan ma'lumotlarga asoslangan boshqaruv konturiga aylanmoqda. May va hammualliflar ishlab chiqarishdagi energiya menejmenti axborot-kommunikatsiya texnologiyalari, strategik boshqaruv, qo'llab-quvvatlovchi usullar va ishlab chiqarish ko'rsatkichlari bilan birgalikda ko'rilishi kerakligini ko'rsatadi (3). IoT va kiber-fizik tizimlar yordamida uskunalar darajasida tok, kuchlanish, quvvat, energiya, holat, takt va ishlab chiqarish sonini bir xil vaqt shkalasida yig'ish imkoniyati paydo bo'ladi. Soori, Arezoo va Dastres smart-fabrikalarda IoT ishlab chiqarish jarayonlarini real vaqt rejimida kuzatish, energiya sarfini tahlil qilish va optimallashtirishning asosiy texnologik tayanchlaridan biri ekanini ta'kidlaydi (4).

Muammo shundaki, ko'plab korxonalarda monitoring tizimi mavjud bo'lsa ham, u ko'pincha energiya sarfini grafikda ko'rsatish bilan chegaralanadi. Bunday yondashuvda energiya normasi ishlab chiqarish hajmi, mahsulot turi, uskunaning ish holati, smena, tashqi harorat yoki texnologik setpointlar bilan bog'lanmaydi. Natijada bir xil 1000 kWh sarf bir holatda normal, boshqa holatda esa ortiqcha bo'lishi mumkin. Cai va hammualliflarning tizimli sharhi energiya samaradorligini yaxshilashda monitoring, baholash, optimallashtirish va benchmarkingni yagona integratsiyalangan zanjir sifatida tashkil etish zarurligini ko'rsatadi (5).

Ishlab chiqarishning murakkabligi energiya samaradorligini faqat bitta mezon bo'yicha optimallashtirishga yo'l qo'ymaydi. Masalan, cho'qqi quvvatni keskin pasaytirish ishlab chiqarish siklini uzaytirishi, uskunalarni tez-tez o'chirib-yoqish texnik resursga salbiy ta'sir qilishi, energiya narxi past bo'lgan soatlarga yuklamani ko'chirish esa buyurtma muddatlariga zid kelishi mumkin. Shu sababli energiya, quvvat, xarajat, ishlab chiqarish va texnologik cheklovlarni birgalikda ko'radigan ko'p mezonli algoritmlar dolzarbdir. Energiya samarador scheduling bo'yicha tadqiqotlar ishlab chiqarish jadvalini energiya talabi bilan uyg'unlashtirish sezilarli optimallashtirish imkoniyatini yaratishini ko'rsatadi (6, 7).

Mashinaviy o'qitish va raqamli egizak konsepsiyasi energiya modelini statik normadan adaptiv prognoz modeliga aylantirmoqda. Bermeo-Ayerbe, Ocampo-Martinez va Diaz-Rozo real vaqt ma'lumotlari asosida energiya iste'molini moslashuvchan modellash, konsept driftni aniqlash va modelni yangilash orqali uskunaning o'zgaruvchan holatiga moslashishni taklif qilgan (8). Billey va Wuest energiya yo'naltirilgan raqamli egizaklarda jismoniy obyekt bilan virtual model o'rtasidagi ikki

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

tomonlama axborot almashinuvi optimallashtirish qarorlarini real jarayonga qaytarish uchun muhim ekanini ko‘rsatgan (9, 10).

Mazkur tezisning maqsadi ishlab chiqarish jarayonlarida energiya sarfini real vaqt rejimida monitoring qilish, ortiqcha iste’molni aniqlash va ishlab chiqarish cheklovlarini hisobga olgan holda energiya sarfini optimallashtirishga mo‘ljallangan algoritmik yondashuvni ishlab chiqishdan iborat. Vazifalar: o‘lchov ma’lumotlari tarkibini belgilash; ma’lumotlarni tozalash va sinxronlash usulini shakllantirish; EnPI va bazaviy ko‘rsatkichlarni hisoblash; prognoz va anomaliya aniqlash modulini tavsiflash; ko‘p mezonli maqsad funksiyasini qurish; algoritmning ishlashini imitatsion ma’lumotlar asosida baholash. Ilmiy yangilik monitoring, adaptiv baseline, anomaliya aniqlash va operativ optimallashtirishni yagona yopiq siklga birlashtirish hamda qaror mezoniga maxsus energiya sarfi, cho‘qqi quvvat va ishlab chiqarish cheklovlarini bir vaqtda kiritish bilan izohlanadi.

MATERIALLAR VA METODLAR

Tadqiqot metodologiyasi tizimli tahlil, energiya menejmenti standartlari, sanoat IoT arxitekturasi, vaqt qatorlarini qayta ishlash, regressiya/prognozlash va ko‘p mezonli optimallashtirish usullarini birlashtiradi. Algoritmning konseptual bazasi ISO 50001 va ISO 50006 talablari bilan uyg‘unlashtirildi: energiya ko‘rsatkichlari ishlab chiqarish hajmi va ta’sir etuvchi omillar bilan bog‘landi, monitoring natijalari esa qaror qabul qilish bosqichiga uzatildi (1, 2). Real korxona ma’lumotlari taqdim etilmaganligi sababli natijalar bo‘limida algoritmning hisoblash mantig‘ini ko‘rsatish uchun imitatsion 24 soatlik profil ishlatildi; ushbu raqamlar real ishlab chiqarish obyektida olingan eksperimental natijalar sifatida talqin qilinmaydi.

Ma’lumotlar arxitekturasi uch qatlamga ajratildi. Birinchi qatlam – o‘lchash: uch fazali smart-meterlar, tok transformatorlari, kuchlanish, aktiv/reaktiv quvvat, cosφ, pnevmatik tizim uchun bosim va sarf, issiqlik jarayonlari uchun harorat sensorlari. Ikkinchi qatlam – ishlab chiqarish konteksti: PLC holat teglari, mashina ON/RUN/IDLE/FAULT holati, mahsulot soni, takt va buyurtma identifikatori. Uchinchi qatlam – integratsiya va analitika: OPC UA yoki MQTT orqali gateway, vaqt qatori ma’lumotlar bazasi, SCADA/MES bilan integratsiya va algoritmik servis. IoT asosidagi monitoring zavoddagi energiya shaffofligini oshirishi va energiya tejash choralarini aniqlashga yordam berishi adabiyotlarda qayd etilgan (4, 11).

Vaqt qatorlarini tayyorlashda turli manbalardan kelgan teglar yagona vaqt indeksiga keltiriladi. Taklif etilgan algoritm uchun bazaviy diskretlash qadami $\Delta t = 1$ min deb olinadi; tez jarayonlarda bu qiymat 1–10 s gacha kamaytirilishi mumkin. Yo‘qolgan qisqa intervallar chiziqli interpolatsiya bilan, uzun uzilishlar esa 'missing' statusi bilan saqlanadi. Fizik jihatdan imkonsiz qiymatlar diapazon filtri orqali, impulsli shovqinlar median filtri yordamida ajratiladi. Outlier qiymatlar rolling median va median absolute deviation (MAD) asosida belgilanadi. Bu bosqichdagi maqsad ML modeliga 'iflos' ma’lumot uzatilishi natijasida noto‘g‘ri optimallashtirish qarori paydo bo‘lishining oldini olishdir.

Energetik KPIlar quyidagicha shakllantirildi. Interval energiyasi $E_k=P_k\cdot\Delta t$, sutkalik energiya $E_{day}=\Sigma E_k$. Maxsus energiya sarfi $SEC=E/Q$, bunda Q – ishlab chiqarilgan mahsulot miqdori. Bekor turish energiyasi ulushi $IER=E_{idle}/E_{total}\cdot 100\%$. Bazaviy energiya modeli esa $E_{base}=f(Q, T, s, x)$ ko‘rinishida ifodalanadi; bu yerda T – tashqi yoki texnologik harorat, s – smena/rejim, x – boshqa relevan omillar. Energiya samaradorligi og‘ishi $D=(E_{actual}-E_{base})/E_{base}\cdot 100\%$. D musbat va belgilangan chegaradan yuqori bo‘lsa, ortiqcha sarf signali shakllanadi. ISO 50006 energiya ko‘rsatkichlarini energiya bazaviy chizig‘i bilan taqqoslash samaradorlikdagi real o‘zgarishni ajratishga xizmat qilishini ta’kidlaydi (2).

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

Prognoz moduli ikki darajali ko‘rinishda qurildi. Birinchi daraja – tushuntiriladigan rolling regressiya modeli; u tez yangilanadi va operatorga ishlab chiqarish hajmi hamda asosiy parametrlarning energiyaga ta’sirini ko‘rsatadi. Ikkinchi daraja – nolinear holatlar uchun Random Forest yoki LSTM kabi model. IoT ma’lumotlarida RF va LSTMning ishlab chiqarish amaliyotlarida keng ishlatilishi tizimli sharhlarda ko‘rsatilgan (12). Sanoat robotlari energiyasini prognozlash va optimallashtirishda LSTM va genetik yondashuv kombinatsiyasi ham muvaffaqiyatli sinovdan o‘tgan (13). Shu sababli algoritm aniq obyektga qarab sodda regressiyadan murakkab modelga bosqichma-bosqich o‘tishni ko‘zda tutadi.

Anomaliya aniqlash qoidasi prognoz xatosi va energetik KPIlarni birlashtiradi. Agar $|E_{actual}-E_{pred}|/E_{pred} > \theta_E$ bo‘lsa yoki SEC bazaviy median qiymatdan θ_{SEC} ga yuqori bo‘lsa, hodisa 'energetik anomaliya' sifatida ro‘yxatga olinadi. Taklif etilgan boshlang‘ich chegaralar $\theta_E=10\%$ va $\theta_{SEC}=12\%$ bo‘lib, ular real obyektning tarixiy dispersiyasiga mos kalibrlanishi kerak. Hodisa uskunaning holati bilan bog‘lanadi: IDLE holatidagi yuqori quvvat – standby yo‘qotishi, RUN holatidagi SEC ortishi – texnologik yoki texnik sabab, FAULT oldidan quvvat profili o‘zgarishi esa diagnostik signal bo‘lishi mumkin. Adaptiv energiya modellari uskunadagi degradatsiya va konsept driftni ajratish uchun foydalidir (8).

Optimallashtirish bosqichida qaror vektori $u=[u_1,\ldots,u_n]$ moslashuvchan yuklamalarning ish boshlash vaqti, setpoint yoki standby siyosatini ifodalaydi. Maqsad funksiyasi $J=\alpha\cdot SEC_n+\beta\cdot P_{peak,n}+\gamma\cdot C_n+\delta\cdot T_{delay,n}$ ko‘rinishida qabul qilindi. Bunda indeks n normallashtirilgan qiymatni, $\alpha+\beta+\gamma+\delta=1$ ni bildiradi. Ishlab chiqarish ustuvor bo‘lgan holat uchun $\alpha=0.35$, $\beta=0.25$, $\gamma=0.25$ va $\delta=0.15$ tavsiya etildi. Cheklovlar: $Q\geq Q_{plan}$, texnologik ketma-ketlik buzilmasligi, $P_t\leq P_{limit}$, kritik uskunalar o‘chirilmasligi, ruxsat etilgan temperaturaviy/texnologik oraliqlar saqlanishi. Energiya samarador scheduling bo‘yicha sharhlar ko‘p mezonli yondashuv va metaevristik optimallashtirish usullarining ishlab chiqarish uchun mosligini ko‘rsatadi (6, 7).

Algoritm real vaqt rejimida har bir monitoring oynasi tugagach KPIlarni qayta hisoblaydi. Agar anomaliya bo‘lmasa, yangi ma’lumot bazaviy modelni yangilash uchun ishlatiladi. Anomaliya aniqlansa, tizim avval sabab sinfini baholaydi; keyin ruxsat etilgan boshqaruv ta’sirlari ro‘yxatidan optimal variantni tanlaydi. Qarorlar avtomatik bajarilish darajasi xavfsizlik sinfiga bog‘liq: ma’lumot berish (advisory), operator tasdig‘i bilan boshqarish (supervisory) yoki xavfsiz past darajadagi konturlarda avtomatik closed-loop. Raqamli egizaklar ushbu qarorni jismoniy tizimga qaytarishdan oldin virtual tekshirish imkonini beradi (9, 10).

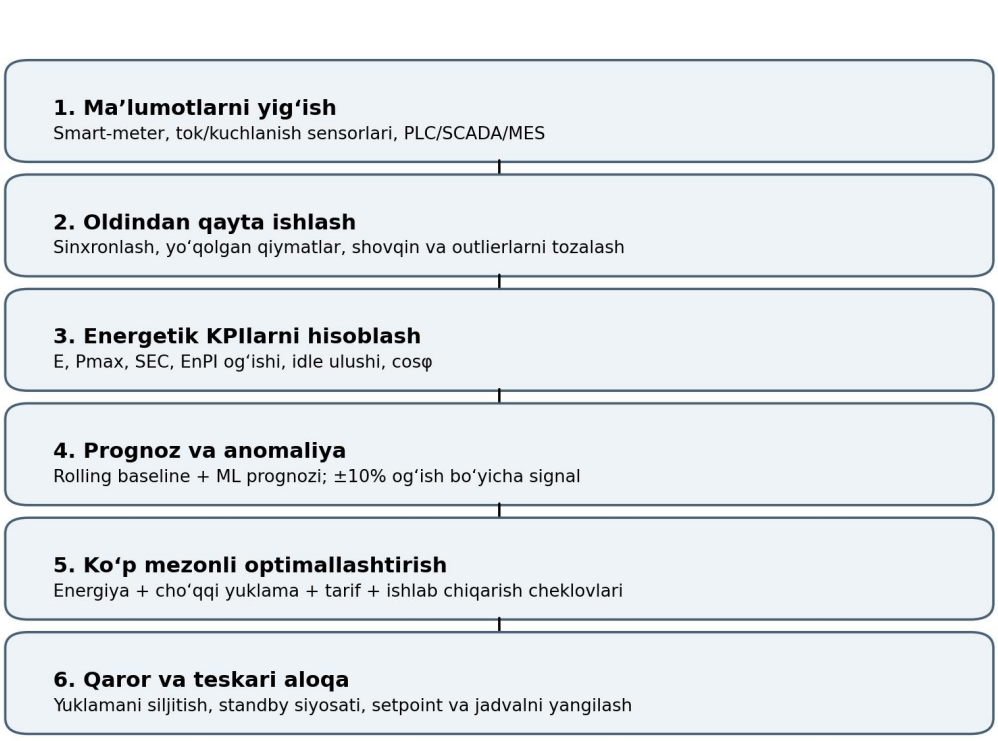
1-jadval. Monitoring tizimida tavsiya etiladigan ma’lumotlar va KPIlar

№	Ma’lumot guruhi	Asosiy teglar	Davriylik	Algoritmdagi vazifasi
1	Elektr parametrlar	U, I, P, Q, cosφ, kWh	1 s–1 min	Yuklama profili va sifat nazorati
2	Uskuna holati	RUN/IDLE/FAULT/OFF	1–10 s	Bekor turish energiyasini ajratish
3	Ishlab chiqarish	Mahsulot soni, takt, buyurtma	1 min / event	SEC va baseline normalizatsiyasi
4	Texnologik	T, p, tezlik, setpoint	1–60 s	Energiya

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

№	Ma'lumot guruhi	Asosiy teglar	Davriylik	Algoritmdagi vazifasi
	parametr			sabablarini tushuntirish
5	Energiya KPI	SEC, Pmax, IER, EnPI og'ishi	5–15 min	Qaror va ogohlantirish
6	Tarif va limit	Vaqt bo'yicha tarif, P_limit	15–60 min	Cho'qqi va xarajat optimallashtirish

1-rasm. Taklif etilgan monitoring va optimallashtirish algoritmining funksional oqimi



TAKLIF ETILGAN ALGORITM

Taklif etilgan algoritmning asosiy xususiyati monitoring va optimallashtirishni alohida modullar sifatida emas, bir-birini uzluksiz to'ldiradigan sikl sifatida tashkil etishdir. Monitoring bosqichi energiya sarfi 'qancha?' degan savolga javob beradi; baseline va prognoz 'qancha bo'lishi kerak edi?' degan savolni yechadi; anomaliya moduli 'farq qayerda?' degan savolni, optimallashtirish esa 'qanday boshqaruv ta'siri bilan farqni kamaytirish mumkin?' degan savolni hal qiladi. Shu tarzda tizim oddiy dashboarddan operativ qarorlarni tavsiya qiluvchi energiya menejmenti vositasiga aylanadi.

Algoritmning birinchi iteratsiyasida kamida 2–4 haftalik tarixiy ma'lumotdan normal ish holatlari ajratilib, baseline parametrlari baholanadi. Keyingi ishlashda sliding window yondashuvi qo'llanib,

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

model yangi ma'lumotlar bilan qayta kalibrlanadi. Ammo anomaliya sifatida belgilangan interval baselinega avtomatik qo'shilmaydi, aks holda ortiqcha sarf asta-sekin 'normal' holatga aylanib qolishi mumkin. Shu mexanizm energiya menejmentida ma'lumot sifati va model boshqaruvining muhim jihatidir.

Qaror shakllantirishda ustuvorliklar uch darajaga ajratildi. A-daraja – sarfsiz yoki past xarajatli tashkiliy chora: bekor ishlayotgan agregatni standbyga o'tkazish, kompressor bosimini ruxsat etilgan diapazonda pasaytirish, ventilyatsiyani smena jadvaliga bog'lash. B-daraja – jadval optimallashtirish: moslashuvchan operatsiyalarni cho'qqi yuklama yoki yuqori tarif davridan boshqa oynaga siljitish. C-daraja – investitsion chora: energiya samarali motor, VFD, issiqlikni qayta ishlatish yoki uskunani modernizatsiya qilish. Algoritm A va B qarorlarini real vaqt yoki kunlik rejalashtirish konturida, C qarorlarini esa analitik hisobotda shakllantiradi.

Energiya raqamli egizagi bilan integratsiya qilinganda optimallashtirish qarori real uskunaga yuborilishidan oldin virtual modelda sinovdan o'tkaziladi. Billey va Wuestning case-study tadqiqoti ikki tomonlama OPC UA aloqasi bilan yopiq siklli energiya optimallashtirishning amaliy imkoniyatini ko'rsatgan (10). Bu yondashuv ayniqsa pech, issiqlik kamerasi, HVAC, kompressor stansiyasi kabi inertsiya yuqori obyektlarda texnologik xavfsizlikni saqlagan holda energiya tejamkor setpointlarni tanlash uchun muhimdir.

2-jadval. Algoritmning hisoblash bosqichlari va chiqishlari

Bosqich	Modul	Asosiy amal	Chiqish
1	Ingest	Sensor/PLC/MES teglarini qabul qilish	Vaqt qatori
2	Preprocess	Resampling, interpolatsiya, median/MAD filtri	Tozalangan dataset
3	KPI	E, SEC, Pmax, IER, EnPI og'ishi	Energetik holat
4	Predict	Baseline + RF/LSTM (zaruratga ko'ra)	E_pred va ishonch oralig'i
5	Detect	Prognoz xatosi va SEC chegarasi	Anomaliya flagi va sababi
6	Optimize	Ko'p mezonli J(u), ishlab chiqarish cheklovlari	Optimal jadval/setpoint
7	Feedback	Operator/PLC ga tavsiya yoki boshqaruv	Yangi ish rejimi
8	Learn	Tasdiqlangan normal ma'lumot bilan model update	Adaptiv baseline

NATIJALAR

Taklif etilgan algoritmning hisoblash mantig'i 24 soatlik imitatsion ishlab chiqarish profili yordamida baholandi. Profil korxona bo'yicha real eksperimental ma'lumot emas; u uch smenali ishlab

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

chiqarishdagi odatiy yuklama o'zgarishini tasvirlash uchun tuzilgan sintetik misoldir. Bazaviy rejimda sutkalik yig'indi energiya 1631 shartli kWh, maksimal quvvat 101 shartli kW deb olindi. Optimallashtirish blokida tun va smena oralig'idagi bekor turish yuklamalari qisqartirildi, moslashuvchan yuklamalar cho'qqi intervaldan yelka intervaliga ko'chirildi va bir vaqtning o'zida ishlaydigan yuqori quvvatli iste'molchilar soni cheklab turildi. Natijada sutkalik energiya 1399 shartli kWh gacha, maksimal quvvat 84 shartli kW gacha pasaydi.

Sutkalik ishlab chiqarish hajmi 400 birlik darajasida o'zgarmas deb qabul qilindi. Shu shartda maxsus energiya sarfi bazaviy rejimda 4.077 shartli kWh/birlikdan optimallashtirilgan rejimda 3.498 kWh/birlikka tushdi. Bu algoritm energiya tejashni ishlab chiqarish hajmini kamaytirish hisobiga emas, ish rejimini samaraliroq tashkil etish orqali amalga oshirishga yo'naltirilganini ko'rsatadi. Real obyektga joriy etishda ishlab chiqarish sifati, takt va texnologik harorat kabi qo'shimcha cheklovlar maqsad funksiyasiga kiritilishi zarur.

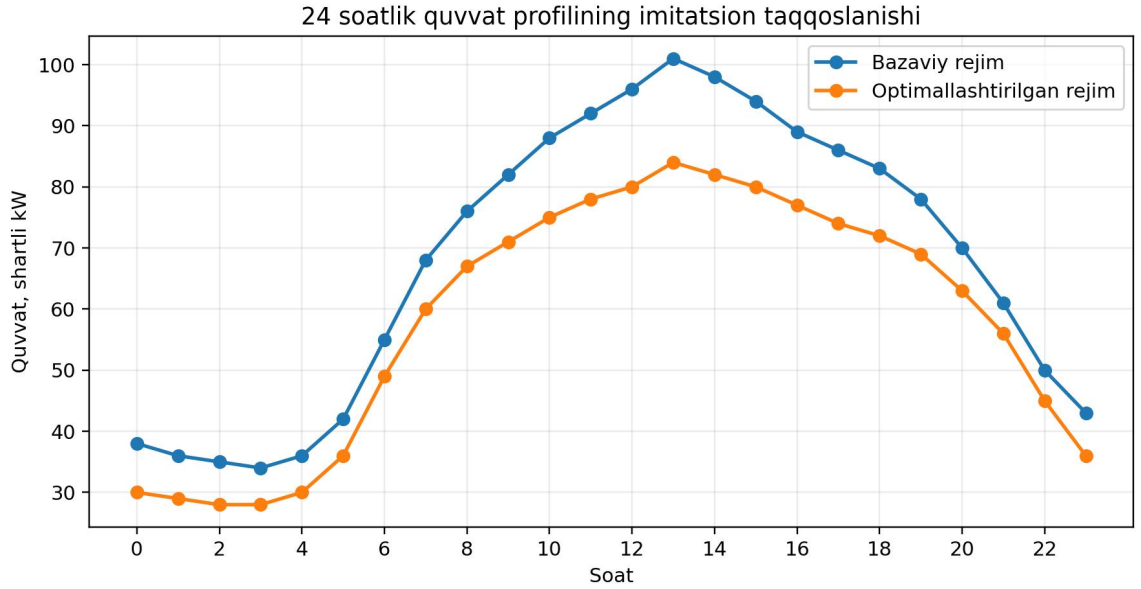
Quvvat profilining silliqlanishi ikki jihatdan foydali. Birinchidan, transformator va elektr ta'minoti elementlariga tushadigan cho'qqi yuklama kamayadi. Ikkinchidan, demand charge yoki vaqtga bog'liq tarif qo'llanadigan sharoitda xarajatni energiya miqdoridan tezroq pasaytirish mumkin. Imitatsion misolda tarif vaznlarini hisobga olgan normalizatsiyalangan xarajat 100 birlikdan 86.2 birlikka kamaydi. Bu natija real tarif strukturasiga bog'liq bo'lib, algoritmdagi γ koeffitsiyenti korxonaning iqtisodiy ustuvorligiga qarab sozlanadi.

Natijalarning yana bir muhim tomoni bekor turish energiyasini alohida ajratishdir. Umumiy energiya iste'molini ishlab chiqarish hajmiga bo'lish ba'zan muammoni yashiradi: masalan, smena oxirida uskunalar RUN emas, ammo yordamchi tizimlar to'liq quvvatda qolishi mumkin. Holat teglarini energiya ma'lumoti bilan birlashtirish IER ko'rsatkichini hisoblash imkonini beradi. Imitatsion ssenariyda IER 15.6% dan 8.9% gacha kamaytirildi. IoT bilan uskunalar holatini kontekstli kuzatish energiya isrofi manbasini aniqlashni yengillashtiradi (4, 11).

Prognoz qatlami energiya sarfining kutilgan qiymatini ishlab chiqarish sharoiti bilan normalizatsiya qiladi. Bu ayniqsa mahsulot miksi o'zgaradigan korxonalarda muhim: faqat oldingi kun bilan taqqoslash noto'g'ri signal berishi mumkin. Sanoat energiyasini data-driven modellashtirish va ML bilan prognozlash tadqiqotlari ushbu usul monitoring hamda texnik xizmatni birlashtirish imkonini ko'rsatgan (8). Presciuttini va hammualliflarning sistematik sharhida ham IoT ma'lumotlari asosida ML qo'llash ishlab chiqarish operatsiyalarida prognoz va qarorlarni kuchaytirishi, biroq interpretatsiyalanuvchanlik masalasi hali muhim ekanligi qayd etiladi (12). Shu sababli taklif etilgan algoritmda murakkab model bilan bir qatorda operator tushuna oladigan KPI va baseline saqlanadi.

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

2-rasm. Bazaviy va optimallashtirilgan 24 soatlik quvvat profili (imitatsion ma'lumot)

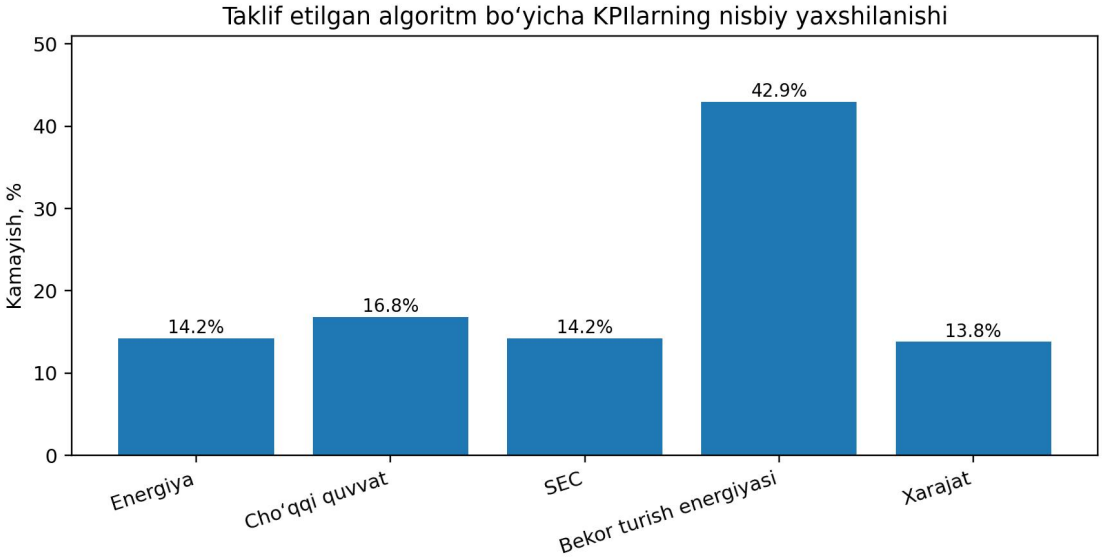


3-jadval. Imitatsion ssenariydagi asosiy energetik natijalar

Ko'rsatkich	Bazaviy	Optimallashtirilgan	O'zgarish
Sutkalik energiya, shartli kWh	1631	1399	−14.2%
Cho'qqi quvvat, shartli kW	101	84	−16.8%
SEC, shartli kWh/birlik	4.077	3.498	−14.2%
Bekor turish energiyasi ulushi	15.6%	8.9%	−42.9%
Normalizatsiyalangan energiya xarajati	100.0	86.2	−13.8%
Ishlab chiqarish hajmi, birlik	400	400	0%

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

3-rasm. Energetik KPIlarning nisbiy yaxshilanishi (imitatsion ssenariy)



MUHOKAMA

Olingan imitatsion natijalar taklif etilgan algoritmning asosiy qiymati faqat energiyani kamaytirish emas, energiya iste'molini ishlab chiqarish konteksti bilan bog'lash ekanini ko'rsatadi. Bunday bog'lanishsiz korxona energiya sarfidagi o'sishning sababi ishlab chiqarish hajmi ko'payganidanmi, uskunaning samaradorligi pasayganidanmi yoki bekor turish yo'qotishidanmi – farqlay olmaydi. ISO 50001 va ISO 50006 yondashuvlari ham energiya samaradorligini tizimli boshqarish, EnPI va baseline yordamida o'lchash hamda doimiy yaxshilashni talab qiladi (1, 2).

Taklif etilgan arxitektura adabiyotdagi to'rtta asosiy yo'nalishni birlashtiradi: monitoring, baholash, prognoz va optimallashtirish. Cai va hammualliflar ushbu yo'nalishlarni barqaror ishlab chiqarishda energiya samaradorligini oshirishning o'zaro bog'liq komponentlari sifatida ko'rsatgan (5). Amaliyotda esa ko'pincha bu modullar turli platformalarda ajralgan bo'ladi: SCADA o'lchaydi, ERP ishlab chiqarishni biladi, energiya mutaxassisi Excelda tahlil qiladi, optimallashtirish esa qo'lda bajariladi. Taklif qilinayotgan yagona ma'lumot modeli vaqt belgisi va uskunaning identifikatori orqali ushbu axborotlarni birlashtirishga qaratilgan.

IoT joriy etishning afzalligi sensor sonining ko'pligida emas, kerakli granularlikdagi va kontekstli ma'lumotni ishonchli olishdadir. Gan va hammualliflar sheet-metal forming sexi uchun IoT asosidagi energiya samaradorligi monitoringi ishlab chiqarish jarayonidagi energiya oqimini tahlil qilishga xizmat qilishini ko'rsatgan (11). Smart-fabrika sharhlarida ham IoT real vaqt ma'lumotlari, predictive maintenance va energiya optimallashtirish bilan bog'lanadi (4). Shu bilan birga, ortiqcha sensorlashtirish ma'lumotlar hajmini oshirib, analitik qiymat bermasligi mumkin. Shu sababli 1-jadvalda minimal zarur teglar energiya qaroriga ta'siri bo'yicha tanlangan.

Energiya prognozi uchun model tanlashda aniqlik va interpretatsiya o'rtasidagi muvozanat zarur. RF yoki LSTM murakkab nolinear bog'lanishlarni ushlashi mumkin, ammo operator uchun sababni izohlash qiyinlashadi. Presciuttini va hammualliflar IoT ma'lumotlariga ML qo'llashda interpretatsiyalanuvchanlik yetarlicha o'rganilmagan jihatlardan ekanini qayd etgan (12). Shuning uchun taklif etilgan algoritmda SHAP kabi izohlash vositalari yoki kamida feature importance hisobotlarini

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

qo'llash maqsadga muvofiq. Bundan tashqari, modelning RMSE/MAE ko'rsatkichlari vaqt bo'yicha kuzatilib, xato oshganda qayta o'qitish triggeri berilishi kerak.

Ko'p mezonli optimallashtirishning afzalligi energiya maqsadini ishlab chiqarish maqsadidan ajratmasligidadir. Gahm va hammualliflar energiya samarador schedulingda energiya talabi, energiya ta'minoti va ishlab chiqarish rejalashtirishini birgalikda ko'rish zarurligini ko'rsatgan (6). Gao va hammualliflar esa intelligent production systems uchun swarm intelligence va evolutionary algoritmlar keng qo'llanishini qayd etadi (7). Ushbu tezisda algoritmning arxitekturasi optimallashtiruvchi solverga bog'lanmagan: kichik obyekt uchun qoidaviy/linear programming, murakkab job-shop uchun GA/PSO, dinamik muhit uchun reinforcement learning qo'llash mumkin.

Raqamli egizaklar monitoring va boshqaruv orasidagi xavfsiz sinov qatlami sifatida istiqbolli. 2023-yilgi sharh energiya digital twin tadqiqotlarining ko'pchiligi hali to'liq ikki tomonlama closed-loop darajasiga yetmaganini ko'rsatgan (9). 2024-yilgi case-study esa fizik heating tunnel va Python asosidagi virtual komponent o'rtasida OPC UA orqali ikki tomonlama aloqa yordamida energiya optimallashtirishni amaliy namoyish qilgan (10). Bu natijalar taklif etilgan algoritmning keyingi bosqichida optimallashtirish qarorlarini digital twin orqali tekshirish konsepsiyasini asoslaydi.

Mashinaviy o'qitish asosidagi optimallashtirish rivojlanayotgan bo'lsa-da, energiya qarorining ishonchliligi birlamchi o'lchov sifatiga bog'liq. Noto'g'ri kalibrlangan tok transformatori yoki vaqt belgilarining siljishi eng yaxshi ML modelini ham noto'g'ri qarorga olib keladi. Shuning uchun metrologik tekshiruv, sensor health monitoring, vaqt sinxronizatsiyasi (NTP/PTP) va ma'lumot lineage tizimi algoritmning texnik infratuzilmasiga kiritilishi lozim. Energiya boshqaruvining raqamlashtirilishi monitoring, performance evaluation va energiya-samarali jarayon dizaynini kuchaytirishi 2025-yildagi Industry 4.0 tadqiqotida ham ko'rsatilgan (14).

Tadqiqotning cheklovi shundaki, natijalar real sanoat datasetiga emas, algoritmni tushuntirish uchun tuzilgan imitatsion profilga asoslangan. Shu sababli jadvaldagi foizlarni universal energiya tejash darajasi deb qabul qilish mumkin emas. Real joriy etishda kamida 4–12 haftalik bazaviy ma'lumot, turli mahsulot va smena rejimlari, tarif tuzilmasi hamda texnologik cheklovlar bilan pilot sinov o'tkazish zarur. Shuningdek, kiberxavfsizlik, tarmoq kechikishi va PLCga boshqaruv komandalarini yuborishdagi functional safety talablari alohida baholanishi kerak. Zamonaviy tadqiqotlar IIoT va AI energiya samaradorligini oshirish uchun katta imkoniyat berishini, lekin tizim integratsiyasi va ma'lumot sifati hal qiluvchi omil bo'lib qolishini ko'rsatadi (14, 15).

XULOSA

Ishlab chiqarish jarayonlarida energiya sarfini samarali boshqarish uchun faqat hisoblagich ko'rsatkichlarini yig'ish yetarli emas; energiya ma'lumoti ishlab chiqarish hajmi, uskunaning holati, texnologik parametr va tarif bilan kontekstlashtirilishi lozim. Ushbu tezisda monitoring, baseline, prognoz, anomaliya aniqlash va ko'p mezonli optimallashtirishni yagona yopiq siklga birlashtiruvchi algoritm taklif etildi.

Algoritm smart-meter va PLC/SCADA/MES ma'lumotlarini sinxronlash, SEC, Pmax, IER va EnPI og'ishini hisoblash, kutilayotgan sarfni prognozlash, me'yordan og'ishni aniqlash hamda ishlab chiqarish cheklovlari ostida energiya va cho'qqi yuklamani minimallashtirish bosqichlaridan iborat. Imitatsion 24 soatlik ssenariy algoritmning bekor turish yo'qotishlarini kamaytirish, cho'qqi yuklamani silliqlash va bir birlik mahsulotga to'g'ri keladigan energiya sarfini pasaytirish mexanizmini namoyish etdi.

Amaliy joriy etish uchun uch bosqichli yo'l tavsiya etiladi: 1) energetik submetering va uskunalar holatini yig'ish; 2) 4–12 haftalik ma'lumot asosida baseline va dashboard yaratish; 3) prognoz,

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

anomaliya va optimallashtirish modulini pilot liniyada sinab, xavfsiz boshqaruv nuqtalarini bosqichma-bosqich closed-loopga o'tkazish. Keyingi tadqiqotlarda real sanoat datasetida RF/LSTM/XGBoost modellarini taqqoslash, optimallashtirish uchun MILP, GA/PSO va reinforcement learning usullarini solishtirish hamda digital twin orqali qarorlarni oldindan verifikatsiya qilish maqsadga muvofiq.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. International Organization for Standardization. (2018). ISO 50001:2018 Energy management systems — Requirements with guidance for use. Geneva: ISO. (Amendment 1:2024).
2. International Organization for Standardization. (2023). ISO 50006:2023 Energy management systems — Evaluating energy performance using energy performance indicators and energy baselines. Geneva: ISO.
3. May, G., Stahl, B., Taisch, M., & Kiritsis, D. (2017). Energy management in manufacturing: From literature review to a conceptual framework. Journal of Cleaner Production, 167, 1464–1489. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.191
4. Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (2023). Internet of things for smart factories in Industry 4.0, a review. Internet of Things and Cyber-Physical Systems, 3, 192–204. https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2023.04.006
5. Cai, W., Wang, L., Li, L., Xie, J., Jia, S., Zhang, X., Jiang, Z., & Lai, K.-H. (2022). A review on methods of energy performance improvement towards sustainable manufacturing from perspectives of energy monitoring, evaluation, optimization and benchmarking. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 159, 112227. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112227
6. Gahm, C., Denz, F., Dirr, M., & Tuma, A. (2016). Energy-efficient scheduling in manufacturing companies: A review and research framework. European Journal of Operational Research, 248(3), 744–757. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.07.017
7. Gao, K., Huang, Y., Sadollah, A., & Wang, L. (2020). A review of energy-efficient scheduling in intelligent production systems. Complex & Intelligent Systems, 6, 237–249. https://doi.org/10.1007/s40747-019-00122-6
8. Bermeo-Ayerbe, M. A., Ocampo-Martinez, C., & Diaz-Rozo, J. (2022). Data-driven energy prediction modeling for both energy efficiency and maintenance in smart manufacturing systems. Energy, 238, 121691. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121691
9. Billey, A., & Wuest, T. (2023). Energy digital twins in smart manufacturing systems: A literature review. Manufacturing Letters, 35(Suppl.), 1318–1325. https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2023.08.047
10. Billey, A., & Wuest, T. (2024). Energy digital twins in smart manufacturing systems: A case study. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 88, 102729. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102729
11. Gan, L., Huang, H.-H., Li, L., Xiong, W., & Liu, Z.-F. (2022). IoT-enabled energy efficiency monitoring and analysis method for energy saving in sheet metal forming workshop. Journal of Central South University, 29, 239–258. https://doi.org/10.1007/s11771-022-4933-9
12. Presciuttini, A., Cantini, A., Costa, F., & Portioli-Staudacher, A. (2024). Machine learning applications on IoT data in manufacturing operations and their interpretability implications: A systematic literature review. Journal of Manufacturing Systems, 74, 477–486. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.04.012

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

13. Jiang, P., Wang, Z., Li, X., Wang, X. V., Yang, B., & Zheng, J. (2023). Energy consumption prediction and optimization of industrial robots based on LSTM. Journal of Manufacturing Systems, 70, 137–148. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.07.009
14. Cagno, E., Accordini, D., Thollander, P., Andrei, M. G., Hasan, A. S. M. M., Pessina, S., & Trianni, A. (2025). Energy management and Industry 4.0: Analysis of the enabling effects of digitalization on the implementation of energy management practices. Applied Energy, 390, 125877. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125877
15. Elsisi, M., Amer, M., Dababat, A., & Su, C.-L. (2023). A comprehensive review of machine learning and IoT solutions for demand side energy management, conservation, and resilient operation. Energy, 281, 128256. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128256

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.