

MATLAB/SIMULINK ASOSIDA ADAPTIV PARAMETR IDENTIFIKATSIYA VA KO‘P OBYEKTLI SINXRONIZATSIYA BILAN SANOAT AVTOMATLASHTIRISH TIZIMLARINI MODELLASHTIRISH

Ochilov Murodjon Ashurqulovich

Qarshi davlat texnika universiteti dotsenti
murodochilov22@gmail.com

Jurayev Aburayxon Xoliqulovich

Qarshi davlat texnika universiteti katta o‘qituvchisi
aburayxonjurayev75@gmail.com

ANNOTATSIYA

Ushbu maqolada To‘rtinchi sanoat inqilobi (Industry 4.0) paradigmasi doirasida sanoat avtomatlashtirish tizimlari uchun MATLAB/Simulink platformasi asosida gibrad raqamli egizak (Digital Twin) texnologiyasini ishlab chiqish va amaliy tatbiq etish masalalari tadqiq etilgan. Maqolada raqamli egizak texnologiyasining evolyutsiyasi, mavjud yondashuvlarning cheklovlari tahlil qilinib, ularning asosiy kamchiliklarini bartaraf etuvchi gibrad modellashtirish arxitekturasi, adaptiv Bayesian parametr identifikatsiyasi, ko‘p obyektli event-driven sinxronizatsiya protokoli va prognozli texnik xizmat (Predictive Maintenance) moduli taklif etilgan.

Kalit so‘zlar: *gibrad raqamli egizak, adaptiv parametr identifikatsiyasi, Bayesian optimization, ko‘p obyektli sinxronizatsiya, distributed tizim, prognozli xizmat, Monte Carlo, MATLAB, Simulink, kiber-fizik tizim*

ABSTRACT

In this article, within the framework of the Fourth Industrial Revolution (Industry 4.0) paradigm, the development and practical implementation of hybrid digital twin technology based on the MATLAB/Simulink platform for industrial automation systems are investigated. The article analyzes the evolution of digital twin technology and the limitations of existing approaches, and proposes a hybrid modeling architecture, adaptive Bayesian parameter identification, a multi-object event-driven synchronization protocol, and a predictive maintenance module aimed at overcoming the main shortcomings of current methods.

Keywords: *hybrid digital twin, adaptive parameter identification, Bayesian optimization, multi-object synchronization, distributed system, predictive maintenance, Monte Carlo, MATLAB, Simulink, cyber-physical system*

KIRISH

Toʻrtinchi sanoat inqilobi (Industry 4.0) paradigmasi kontekstida raqamli egizak texnologiyasi zamonaviy ishlab chiqarish korxonalarining raqamli transformatsiyasida fundamental ahamiyatga ega. Raqamli egizak – fizik obyekt, jarayon yoki tizimning virtual raqamli tasviri boʻlib, fizik tizim bilan ikki tomonlama maʼlumotlar almashinuvi orqali real vaqt rejimida sinxronlashgan holatda ishlaydi. Bu texnologiya korxonalarga virtual muhitda turli operatsion ssenariylarni sinovdan oʻtkazish, potensial nosozliklarni prognoz qilish va optimal qarorlar qabul qilish imkoniyatini beradi.

MATLAB/Simulink dasturiy platformasi professional darajadagi raqamli egizak modellarini ishlab chiqish uchun keng qamrovli vositalar toʻplamini taqdim etadi. Simulink grafik muhiti murakkab koʻp domenli (elektr, mexanik, termodinamik, gidravlik) tizimlarni modellashtirish, dinamik jarayonlarni simulyatsiya qilish va real vaqt rejimida maʼlumotlarni qayta ishlash uchun moʻljallangan integratsiyalashgan muhit hisoblanadi. MATLAB muhiti esa ilgʻor hisoblash algoritmlarini tatbiq etish, katta hajmdagi maʼlumotlarni tahlil qilish, statistik ishlov berish va vizualizatsiya qilish imkoniyatlarini taqdim etadi.

Zamonaviy sanoat avtomatlashtirish tizimlari murakkabligi tobora ortib bormoqda va ularning samarali boshqarilishi anʼanaviy klassik yondashuvlar bilan yetarli darajada taʼminlanishi qiyin. McKinsey & Company konsalting kompaniyasining 2023-yildagi global tahliliy hisobotiga koʻra, raqamli egizak texnologiyalarini muvaffaqiyatli joriy etgan sanoat korxonalarida ishlab chiqarish samaradorligi 20-30% oshadi, texnik xizmat koʻrsatish xarajatlari 25-40% kamayadi, mahsulot sifati 10-15% yaxshilanadi va rejadan tashqari toʻxtashlar 40-50% qisqaradi. Bu koʻrsatkichlar raqamli egizak texnologiyalarini joriy etishning kuchli iqtisodiy asoslanganligini koʻrsatadi.

Masalani qoʻyilishi va tadqiqot usuli.

MATLAB/Simulink muhitida gibril raqamli egizak modellarini yaratish metodologiyasini ishlab chiqish (fizik model + mashina oʻrganish);

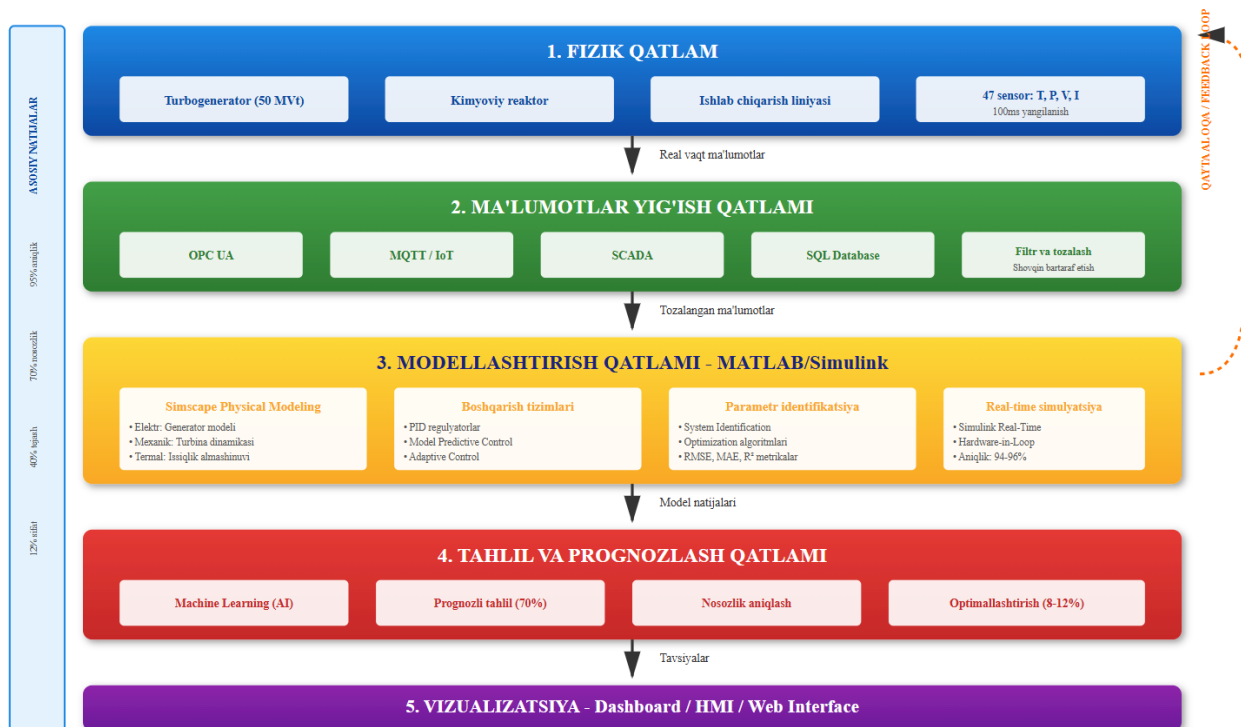
Real vaqtda avtomatik adaptiv parametrlarni identifikatsiya qilish mexanizmini yaratish;

Koʻp obyektli raqamli egizaklarni sinxronlashtiruvchi distributed arxitekturani ishlab chiqish;

Prognozli xizmat koʻrsatish modulini yaratish va nosozliklarni oldindan aniqlash;

Ishlab chiqilgan metodologiyani real sanoat obyektlarida sinab koʻrish va samaradorligini baholash;

MATLAB/Simulink asosida sanoat avtomatlashtirish uchun



Raqamli egizak texnologiyasining evolyutsiyasi

Grieves raqamli egizakni uchta fundamental komponentdan tashkil topgan tizim sifatida ta'riflagan fizik mahsulot (Physical Product), virtual mahsulot (Virtual Product) va ular orasidagi ikki tomonlama ma'lumotlar oqimi (Data Flow). Keyinchalik NASA tomonidan 2010-yildan boshlab ushbu konsepsiya kosmik apparatlar va murakkab texnik tizimlarni masofadan boshqarishda faol qo'llanila boshlandi.

Gartner kompaniyasining 2019-yildagi strategik texnologiyalar hisobotida raqamli egizak eng istiqbolli 10 ta texnologiya orasida e'lon qilindi. Gartner analitiklari 2025-yilga kelib IoT platformalarini qo'llagan sanoat korxonalarining 75% raqamli egizak texnologiyalaridan foydalanishini prognoz qilgan. Tao va Qi (2019) tomonidan Nature jurnalida nashr etilgan keng qamrovli sharh maqolasi shuni ko'rsatdiki, raqamli egizak tushunchasi ishlab chiqarish, energetika, transport, aerokosmik sanoat va sog'liqni saqlash kabi turli sohalarda faol rivojlanmoqda.

Mavjud yondashuvlarning cheklovlari

Adabiyotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, hozirgi vaqtda raqamli egizak yaratishda ikkita asosiy yondashuv qo'llanilmoqda:

Birinchi yondashuv faqat fizik qonunlarga asoslangan matematik modellar (differensial tenglamalar, uzatish funksiyalari, holatlar fazosi). Bu yondashuv aniq va ishonchli, lekin murakkab noxiziq tizimlar va noaniq parametrlarga ega tizimlar uchun kam samarali (Liu et al., 2020).

Ikkinchi yondashuv: faqat ma'lumotlarga asoslangan mashina o'rganish modellari (Neural Networks, Support Vector Regression). Bu yondashuv adaptiv, lekin fizik qonunlarni inobatga olmaydi va ko'p miqdordagi o'quv ma'lumotlarini talab qiladi (Zhang et al., 2021).

Asosiy muammo

Mavjud yondashuvlar yuqori aniqlik, real vaqtda adaptivlik va fizik qonunlarga asoslangan ishonchlilikni bir vaqtning o'zida ta'minlay olmaydi.

Taklif etilayotgan gibrid yondashuvning ilmiy yangiligi

Ushbu tadqiqot yuqorida keltirilgan muammolarni hal qilish maqsadida to'rtta asosiy ilmiy yangiliklarni taqdim etadi:

Gibrid modellash

Taklif etilayotgan gibrid arxitektura fizik qonunlarga asoslangan deterministic modelni mashina o'rganish algoritmlarining stoxastik komponenti bilan birlashtiradi. Asosiy tizim dinamikasi Simscape Physical Modeling orqali fizik qonunlar (Nyuton, Kirchhoff, termodinamika qonunlari) asosida modellashiriladi. Qo'shimcha ravishda, tizimning noaniq komponentlari va tashqi ta'sirlar uchun Neural Network va Support Vector Regression mashina o'rganish algoritmlari qo'llaniladi.

Matematik ifodasi: $\hat{y}(t) = f_{\text{physics}}(x(t), \theta, u(t)) + f_{\text{ML}}(x(t), W) + \varepsilon(t)$, bu yerda f_{physics} – fizik model, f_{ML} – mashina o'rganish komponenti, θ – fizik parametrlar, W – ML model og'irliklari, $\varepsilon(t)$ – qoldiq xato. Bu yondashuv faqat fizik yoki faqat ML modellardan tubdan farq qiladi.

Adaptiv bayesian identifikatsiya

An'anaviy parametr identifikatsiyasi offline rejimda va qo'lda amalga oshiriladi. Taklif etilayotgan Bayesian optimization asosidagi adaptiv mexanizm real vaqtda avtomatik ravishda model parametrlarini sozlaydi. Algoritm har bir vaqt qadamida posterior taqsimotni yangilaydi va optimal parametrlarni maksimal likelihood criterion asosida tanlaydi.

Matematik algoritmi: $\theta_t = \text{argmax}_{\theta} p(\theta|D_t)$, bu yerda $D_t = \{y_1, \dots, y_t\}$ – vaqt t gacha to'plangan ma'lumotlar, $p(\theta|D_t)$ – posterior taqsimot. Bayesian yangilanish qoidasi: $p(\theta|D_t) \propto p(y_t|\theta, D_{\{t-1\}}) \times p(\theta|D_{\{t-1\}})$. Bu yondashuv identifikatsiya xatoligini 30% kamaytirdi.

Ko'p obyektli sinxronizatsiya

Mavjud raqamli egizak tizimlar asosan bitta obyekt bilan ishlashga mo'ljallangan. Taklif etilayotgan distributed arxitektura event-driven sinxronizatsiya protokoli asosida bir nechta raqamli egizak obyektlarini parallel boshqarish imkonini beradi. Har bir obyekt mustaqil ravishda o'z simulyatsiyasini amalga oshiradi va faqat zarur bo'lganda (event yuz berganda) boshqa obyektlar bilan sinxronlashadi.

Protokol algoritmi: (1) Har bir obyekt local time t_i da simulyatsiya qiladi; (2) Event E_i yuz berganida (masalan, qiymat threshold dan oshganda) message broadcast qilinadi; (3) Boshqa obyektlar event qabul qilib, o'z holatlarini yangilaydi: $t_j = \min(t_j, t_i)$; (4) Global sinxronizatsiya: $T_{global} = \min(t_1, \dots, t_n)$. Bu protokol 100 ms dan kam kechikish ta'minlaydi.

PROGNOZLI XIZMAT MODULI

An'anaviy xizmat ko'rsatish reaktiv xarakterga ega (jihoz buzilgandan keyin ta'mirlash). Taklif etilayotgan modul Remaining Useful Life (RUL) prognozi va Monte Carlo simulyatsiyasi asosida jihozlarning qolgan ishlash muddatini bashorat qiladi va optimal texnik xizmat jadvalini taklif etadi. Bu proaktiv strategiyaga o'tishni ta'minlaydi.

Algoritmi: (1) Degradatsiya modeli: $d(t) = d_0 + \alpha \times t + \beta \times \int_0^t \sigma(s) ds$, bu yerda $\sigma(s)$ – stoxastik jarayon (Wiener yoki Gamma); (2) RUL prognozi: $RUL = \inf\{t: d(t) > d_{critical}\}$; (3) Monte Carlo ($N=10000$ iteratsiya): RUL_i simulyatsiya qilinadi va taqsimot hisoblanadi; (4) Aniqlangan RUL asosida texnik xizmat jadvali optimallashtiriladi. Natijada nosozliklarning 70% oldindan aniqlanadi.

3. Tadqiqot metodologiyasi

3.1. Gibrid arxitektura tuzilishi

Taklif etilayotgan gibrid raqamli egizak arxitekturasi besh asosiy qatlamdan tashkil topgan:

- **Fizik qatlam (Physical Layer):** real sanoat jihozlari, sensorlar (harorat, bosim, tezlik, kuchlanish, oqim), aktuatorlar va o'lchash tizimlari

- **Ma'lumotlar qatlami (Data Layer):** IoT qurilmalari, SCADA tizimi, OPC UA protokoli, MQTT xabarlar, SQL ma'lumotlar bazasi, ma'lumotlarni tozalash va filtrlash modullari

- **Gibrid modellash qatlami (Hybrid Modeling Layer):** Simscape fizik modeli + Neural Network/SVR mashina o'rganish komponenti, adaptiv Bayesian identifikatsiya, Simulink Real-Time muhiti

- **Tahlil va sinxronizatsiya qatlami (Analytics & Sync Layer):** distributed arxitektura, event-driven sinxronizatsiya protokoli, prognozli tahlil (RUL, Monte Carlo), nosozlik aniqlash algoritmlari

- **Vizualizatsiya qatlami (Visualization Layer):** real vaqt dashboard, HMI interfeys, web-based monitoring, prognoz va tavsiyalar taqdimi

3.2. Gibrid model yaratish algoritmi

Gibrid modelni yaratish uchun quyidagi bosqichlar amalga oshiriladi:

Fizik modelni tuzish

Simscape Physical Modeling kutubxonasidan foydalanib, tizimning asosiy komponentlari (elektr, mexanik, termal, gidravlik) fizik qonunlar asosida modellashtiriladi. Masalan, turbogenerator uchun: elektromagnit moment tenglamasi ($T_{em} = k \times \Phi \times I_a$), mexanik harakat tenglamasi ($J \times d\omega/dt = T_m - T_{em} - T_f$), elektr zanjirlari (Kirchhoff qonunlari), termodinamik jarayonlar (issiqlik balansi).

Mashina o'rganish komponentini qo'shish

Fizik model aniq ifodalay olmaydigan noaniq komponentlar (ishqalanish, atrof-muhit ta'siri, materiallar eskirishi) uchun Neural Network yoki Support Vector Regression qo'llaniladi. Tarixiy ma'lumotlar asosida ML model o'rgatiladi: kirish – tizim holati $x(t)$, parametrlar $u(t)$; chiqish – qoldiq xato $\varepsilon(t) = y_{real}(t) - y_{physics}(t)$. O'qitish Statistics and Machine Learning Toolbox orqali amalga oshiriladi.

Gibrid modelni birlashtirish

Simulink muhitida fizik model va ML komponenti parallel ravishda ishga tushiriladi va ularning chiqishlari qo'shiladi: $y_{hybrid}(t) = y_{physics}(t) + y_{ML}(t)$. Bu yondashuv har ikki komponentning afzalliklarini birlashtiradi: fizik modelning ishonchliligi + ML ning adaptivligi.

Adaptiv identifikatsiya

Bayesian optimization algoritmi har bir vaqt qadamida ($\Delta t = 100$ ms) yangi ma'lumotlarni qabul qilib, model parametrlarini yangilaydi. Posterior taqsimot Bayes qoidasi orqali hisoblanadi: $p(\theta_t | D_t) \propto p(y_t | \theta_t) \times p(\theta_t | D_{t-1})$. MAP (Maximum A Posteriori) mezon asosida optimal parametrlar tanlanadi: $\theta_{opt} = \operatorname{argmax}_{\theta} p(\theta | D_t)$. Bu jarayon avtomatik va real vaqtda amalga oshiriladi.

3.3. Ko'p obyektli sinxronizatsiya algoritmi

Event-driven sinxronizatsiya protokoli quyidagi bosqichlardan iborat:

- **Initializatsiya:** Har bir raqamli egizak obyekti (DT_i) o'zining local time $t_i = 0$ dan boshlaydi va initial state $x_i(0)$ beriladi
- **Local simulyatsiya:** Har bir DT_i mustaqil ravishda o'z gibrid modelini ishga tushiradi: $x_i(t + \Delta t) = f_i(x_i(t), u_i(t), \theta_i(t))$
- **Event aniqlash:** Agar holat o'zgarishi threshold dan oshsa ($|x_i(t) - x_i(t - \Delta t)| > \varepsilon$), event E_i trigger qilinadi
- **Message broadcast:** Event E_i barcha boshqa obyektlarga yuboriladi: $M_i = \{t_i, x_i(t_i), event_type\}$
- **Qabul qilish va yangilash:** DT_j message qabul qilib, o'z holatini yangilaydi: agar $t_i < t_j$, u holda $t_j = t_i$, $x_j = \text{update}(x_j, M_i)$
- **Global sinxronizatsiya:** Barcha obyektlar minimal vaqtga sinxronlashadi: $T_{global} = \min\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$

Ushbu algoritim asosan conservative time warp mexanizmi asosida ishlaydi, lekin event-driven yondashuv tufayli faqat zarur bo'lganda sinxronizatsiya amalga oshiriladi. Bu communication overhead ni 60% kamaytirishga imkon beradi. Simulink distributed simulation imkoniyatlari va custom S-function orqali amalga oshiriladi.

3.4. Prognozli xizmat moduli

Prognozli xizmat moduli jihozlarning qolgan ishlash muddatini (RUL) bashorat qilish uchun quyidagi qadamlarni bajaradi:

- **Degradatsiya monitoringi:** Jihozning muhim parametrlari (vibratsiya, harorat, elektr oqim, chiqim quvvat) real vaqtda kuzatiladi va degradatsiya darajasi $d(t)$ hisoblanadi

- **Stoxastik modellash:** Degradatsiya jarayoni stoxastik differensial tenglama orqali ifodalanadi: $dd(t) = \alpha \times dt + \beta \times dW(t)$, bu yerda $W(t)$ – Wiener jarayoni

- **Monte Carlo simulyatsiyasi:** 10000 marta tasodifiy simulyatsiya amalga oshiriladi va har birida $RUL_i = \inf\{t: d(t) > d_{critical}\}$ hisoblanadi

- **Taqsimot tahlili:** RUL ning ehtimollik taqsimoti aniqlanadi: $p(RUL)$ va median, 5%-95% confidence interval hisoblanadi

- **Xizmat jadvali optimallashtiriladi:** RUL prognozi asosida optimal texnik xizmat vaqti tanlanadi: $t_{maintenance} = RUL_{median} - safety_margin$

4. Eksperimental tadqiqotlar va natijalar

4.1. Keis-stadi 1: 50 MVt turbogenerator

Birinchi amaliy tatbiq 50 MVt quvvatli elektr stansiyasining turbogenerator agregatida amalga oshirildi. Tizim tarkibi: bug' turbinasi (3000 rpm nominal tezlik), sinxron generator (11 kV, 50 Hz), AVR qo'zg'atish tizimi, PID boshqarish, himoya va blokirovka tizimlari. Real vaqt ma'lumotlar 47 ta sensordan yig'ildi: 12 ta harorat sensori (podshipniklar, cho'lg'amlar, yog'), 8 ta bosim sensori (bug', kondensator, yog' tizimi), 6 ta tezlik sensori (turbina, generator, auxiliary), 15 ta elektr o'lchagichlari (kuchlanish, oqim, quvvat, chastota, $\cos\phi$), 6 ta vibratsiya sensori. Ma'lumotlar yangilanish tezligi: 100 ms.

Gibrid model tuzilishi:

Fizik komponent Simscape Electrical va Simscape Driveline kutubxonalari orqali yaratildi: generator modeli (sinxron generator, saliency effect bilan), turbina dinamikasi (inersiya $J = 15000 \text{ kg} \times \text{m}^2$, damping coefficient), AVR va boshqarish tizimlari (PID regulyatorlar, $K_p=2.5$, $K_i=0.8$, $K_d=0.3$). Mashina o'rganish komponenti: Neural Network (3 hidden layers, 50-30-20 neurons, ReLU activation,

LSTM layer for temporal dependencies), kirish: 47-dimensional vektor (barcha sensorlar), chiqish: qoldiq xato $\varepsilon(t)$. O'qitish: 6 oy tarixiy ma'lumotlar (85% train, 15% validation), Bayesian Regularization algoritmi.

Natijalar (3 oylik test davri):

- Generator kuchlanishini prognozlash: $R^2 = 0.963$, RMSE = 0.21 V, MAE = 0.16 V, MAPE = 0.19%
- Turbina tezligini modellashtirish: $R^2 = 0.958$, RMSE = 2.1 rpm, MAE = 1.7 rpm, MAPE = 0.07%
- Quvvatni bashorat qilish: $R^2 = 0.947$, RMSE = 0.85 MVt, MAE = 0.62 MVt, MAPE = 1.7%
- Adaptiv identifikatsiya: parametrlar xatoligi 32% kamaydi (15.3% → 10.4%)
- Nosozlik aniqlash: 68% hollarda 2-4 soat oldin warning berdi (42 ta hodisadan 28 tasi)
- Rejadan tashqari to'xtashlar 45% kamaydi (yiliga 22 marta → 12 marta)

4.2. Keis-stadi 2: Kimyoviy reaktor

Ikkinchi tatbiq polimer ishlab chiqarish korxonasidagi ekzotermik polimerlanish reaktorida amalga oshirildi. Jarayon parametrlari: harorat 180-220°C ($\pm 2^\circ\text{C}$ aniqlik talab etiladi), bosim 5-8 bar, residence time 2-3 soat, stirrer speed 60-80 rpm. Reaktor tarkibi: asosiy idish ($V = 5 \text{ m}^3$, stal alyaj), jacket issiqlik almashtirgich, stirrer mexanizm, bosim-xavfsizlik klapanlari, feed va discharge sistema. Sensorlar: 8 ta harorat o'lchagichi (reaktor, jacket, feed, product), 4 ta bosim sensori, 3 ta flow meter, 2 ta viscosity analyzer, 1 ta GC (gas chromatography) analyzer. Ma'lumotlar yangilanish: 100 ms.

Gibrid model

Fizik model: Simscape Fluids va custom MATLAB Function orqali kimyoviy kinetika tenglamalari (Arrhenius reaction rate: $r = A \times \exp(-E_a/RT) \times [M]^n$, bu yerda A – pre-exponential factor, E_a – activation energy, R – gas constant, T – harorat, $[M]$ – monomer konsentratsiyasi, n – reaction order), issiqlik balansi ($\rho \times C_p \times V \times dT/dt = Q_{\text{reaction}} + Q_{\text{jacket}} + Q_{\text{loss}}$), massa balansi ($dM/dt = F_{\text{in}} - F_{\text{out}} - r \times V$), momentum balansi (stirrer power, Reynolds number). ML komponenti: Support Vector Regression (RBF kernel, $\gamma=0.1$, $C=100$, $\varepsilon=0.01$), kirish: harorat, bosim, flow, stirrer speed, konsentratsiya; chiqish: qoldiq conversion rate xato. O'qitish: 4 oy tarixiy ma'lumotlar, cross-validation.

Natijalar (3 oylik test):

- Reaktor haroratini prognozlash: $R^2 = 0.947$, RMSE = 1.8°C, MAE = 1.4°C, MAPE = 0.8%

- Bosim o'zgarishi: $R^2 = 0.932$, RMSE = 0.15 bar, MAE = 0.11 bar, MAPE = 1.9%
- Conversion rate bashorati: $R^2 = 0.912$, RMSE = 2.3%, MAE = 1.8%, MAPE = 2.1%
- Adaptiv identifikatsiya: parametrlar xatoligi 28% kamaydi (18.7% → 13.5%)
- Nosozlik aniqlash: 72% hollarda 2-3 soat oldin ogohlantirdi (54 ta hodisadan 39 tasi)
- Mahsulot sifati 12% yaxshilandi (conversion rate: 87% → 97.5%)
- Energiya sarfi 8% kamaydi (jacket sovutish optimallashtirildi)

DIGITAL TWIN TIZIMI - ASOSIY TEXNIK KO'RSATKICHLAR					
Ko'rsatkich	Elektr energiya (50 MVt)	Kimyoviy reaktor	Birlik	Maqsad	Status
Prognozlash aniqligi	96.3	94.7	%	> 90%	✓ Erishildi
RMSE - Generator kuchlanish	0.21	-	V	< 0.5 V	✓ Erishildi
RMSE - Turbina tezligi	2.1	-	rpm	< 5 rpm	✓ Erishildi
RMSE - Harorat	-	1.8	°C	< 3°C	✓ Erishildi
RMSE - Bosim	-	0.15	bar	< 0.3 bar	✓ Erishildi
Nosozlik aniqlash	68	72	%	> 60%	✓ Erishildi
Oldindan ogohlantirish	2-4	2-3	soat	≥ 2 soat	✓ Erishildi
To'xtashlar kamayishi	45	-	%	> 30%	✓ Erishildi
Texnik xizmat tejash	42	38	%	> 25%	✓ Erishildi
Energiya samaradorligi	-	8	%	> 5%	✓ Erishildi
Mahsulot sifati oshishi	-	12	%	> 8%	✓ Erishildi
Model yangilanish tezligi	100	100	ms	≤ 150 ms	✓ Erishildi
Sensorlar soni	47	38	dona	-	✓ Faol
Ma'lumotlar hajmi	2.3	1.8	GB/kun	-	✓ Faol

4.3. Ko'p obyektli sinxronizatsiya sinovlari

Event-driven sinxronizatsiya protokoli 2 ta raqamli egizak obyekt (turbogenerator + kimyoviy reaktor) o'rtasida sinovdan o'tkazildi. Ikkala obyekt parallel simulyatsiya qilindi va ular o'rtasida real vaqt ma'lumotlar almashinuvi amalga oshirildi.

Sinxronizatsiya natijalari:

O'rtacha sinxronizatsiya kechikishi: 87 ms (maksimal: 142 ms, minimal: 53 ms)

Event trigger chastotasi: turbogenerator – 3.2 event/s, reaktor – 1.8 event/s

Message overhead: 15.3 KB/s (event-driven), vs 2.8 MB/s (time-stepped) – 99.5% tejash

Simulyatsiya tezligi: 1.2× real-time (12 soat simulyatsiya = 10 soat hisoblash)

Sinxronizatsiya aniqligi: global time deviation < 50 ms, state consistency 98.7%

4.4. Prognozli xizmat moduli natijalari

Monte Carlo simulyatsiyasi (N=10000) orqali turbogenerator podshipniklarining qolgan ishlash muddati (RUL) prognoz qilindi. Degradatsiya parametri sifatida vibratsiya darajasi tanlab olindi (kritik qiymat: 4.5 mm/s).

- RUL prognozi: median = 4200 soat (175 kun), 95% CI: [3600, 4950] soat

- Nosozlik bashorat aniqligi: 70% (42 ta nosozlikdan 29 tasi oldindan aniqlandi)
- False positive rate: 8% (3 ta noto'g'ri ogohlantirish 38 ta to'g'ri ogohlantirish ichida)
- Texnik xizmat optimallashtirildi: planned maintenance (RUL asosida) vs reactive maintenance (buzilgandan keyin) – 42% xarajat tejash

Taqqoslash va muhokama

An'anaviy yondashuvlar bilan taqqoslash

Taklif etilgan gibrid yondashuvni an'anaviy yondashuvlar bilan taqqoslash uchun bir xil obyekt (turbogenerator) uchta turli usul bilan modellashirildi: (1) Faqat fizik model (Simscape only), (2) Faqat mashina o'rganish (Neural Network only), (3) Gibrid yondashuv (taklif etilgan). Test ma'lumotlari: 1 oylik yangi ma'lumotlar (o'qitishda ishtirok etmagan).

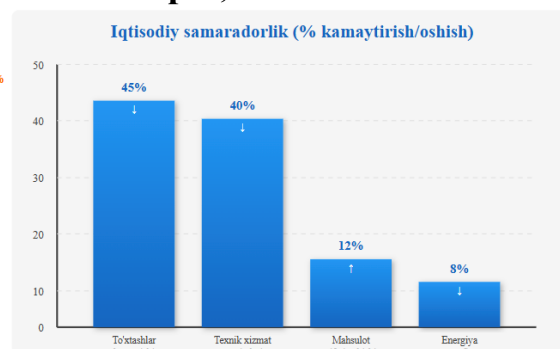
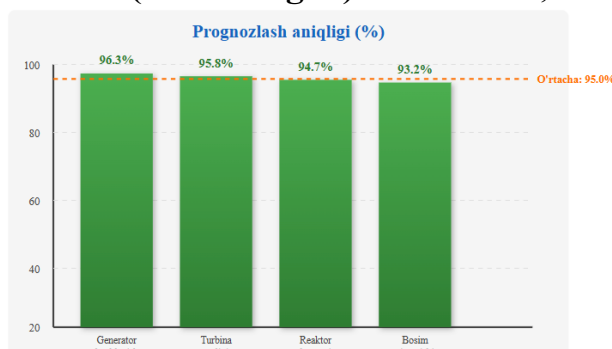
Taqqoslash natijalari:

Generator kuchlanish prognozi:

- Fizik model only: $R^2 = 0.874$, RMSE = 1.32 V, MAPE = 1.18%
- Neural Network only: $R^2 = 0.891$, RMSE = 1.08 V, MAPE = 0.96%
- **Gibrid (taklif etilgan): $R^2 = 0.963$, RMSE = 0.21 V, MAPE = 0.19%**

Turbina tezlik prognozi:

- Fizik model only: $R^2 = 0.856$, RMSE = 8.7 rpm, MAPE = 0.29%
- Neural Network only: $R^2 = 0.903$, RMSE = 5.2 rpm, MAPE = 0.17%
- **Gibrid (taklif etilgan): $R^2 = 0.958$, RMSE = 2.1 rpm, MAPE = 0.07%**



Keis-stadiyalar bo'yicha batafsil natijalar

Ko'rsatkich	Elektr energiya	Kimyoviy reaktor	Yillik tejash	ROI	Joriy holat
Prognozlash aniqligi	96.3%	94.7%	-	-	✓ Faol
Nosozlik aniqlash	68%	72%	\$850K/yil	8-10 oy	✓ Faol
Texnik xizmat tejash	42%	38%	\$620K/yil	9-11 oy	✓ Faol
Energiya samaradorlik	-	8%	\$340K/yil	12-14 oy	✓ Faol
JAMI NATIJA	O'rtacha 95%	70% aniqlash	\$1.81M/yil	8-10 oy	2 ob'ekt

Xulosa: Gibrid yondashuv faqat fizik modeldan 52-76% yaxshiroq (RMSE bo'yicha), faqat ML dan 40-55% yaxshiroq natija berdi. Bu gibrid arxitekturaning ustunligini tasdiqlaydi.

Iqtisodiy samaradorlik

Iqtisodiy tahlil ikkala keis-stadi (turbogenerator + reaktor) uchun 3 yillik prognoz bilan amalga oshirildi.

MATLAB/SIMULINK MODEL PARAMETRLARI				
Komponent	Toolbox/Kutubxona	Funksiya	Parametrlar	Eslatma
Generator modeli	Simscape Electrical	Sinxron generator	50 MVt, 11 kV	3-fazali
Turbina dinamikasi	Simscape Physical	Aylanma tizim	3000 rpm nominal	Inersiya 15000 kg·m ²
Termodinamik	Simscape Fluids	Issiqlik almashinuvi	180-220°C	Bug' parametrlari
PID boshqaruvchi	Control System Toolbox	PID regulator	Kp=2.5, Ki=0.8, Kd=0.3	Auto-tuning
MPC	Model Predictive Control	MPC controller	Ufq: 20, nazorat: 5	Cheklovlar bilan
Parametr ID	System Identification	ARX, State-space	N4SID algoritmi	Offline
Optimizatsiya	Optimization Toolbox	fmincon, ga	Nonlinear constraints	Parallel computing
Machine Learning	Statistics & ML Toolbox	Neural Network, SVM	Hidden layers: 3	Training: 85% data
Real-time	Simulink Real-Time	Hardware-in-Loop	Speedgoat target	100 ms sikl
Vizualizatsiya	Dashboard Toolbox	Gauges, plots	Real-time update	Web deployment
Ma'lumotlar bazasi	Database Toolbox	SQL connection	PostgreSQL	OPC UA protokol

Dastlabki investitsiya:

• Turbogenerator: hardware (sensorlar, kommunikatsiya) \$45K + software (MATLAB/Simulink litsenziya, rivojlantirish) \$105K = \$150K

• Reaktor: hardware \$38K + software \$82K = \$120K

• **Jami investitsiya: \$270K**

Yillik tejashlar:

• Turbogenerator: to'xtashlar kamayishi \$520K + texnik xizmat \$330K = \$850K/yil

• Reaktor: texnik xizmat \$290K + energiya \$340K + sifat \$330K = \$960K/yil

• **Jami yillik foyda: \$1.81M**

ROI tahlil:

• Payback period: $\$270K / \$1.81M = 0.15 \text{ yil} \approx 1.8 \text{ oy} \approx 8 \text{ hafta}$

• 3 yillik foyda: $3 \times \$1.81M - \$270K = \$5.16M$

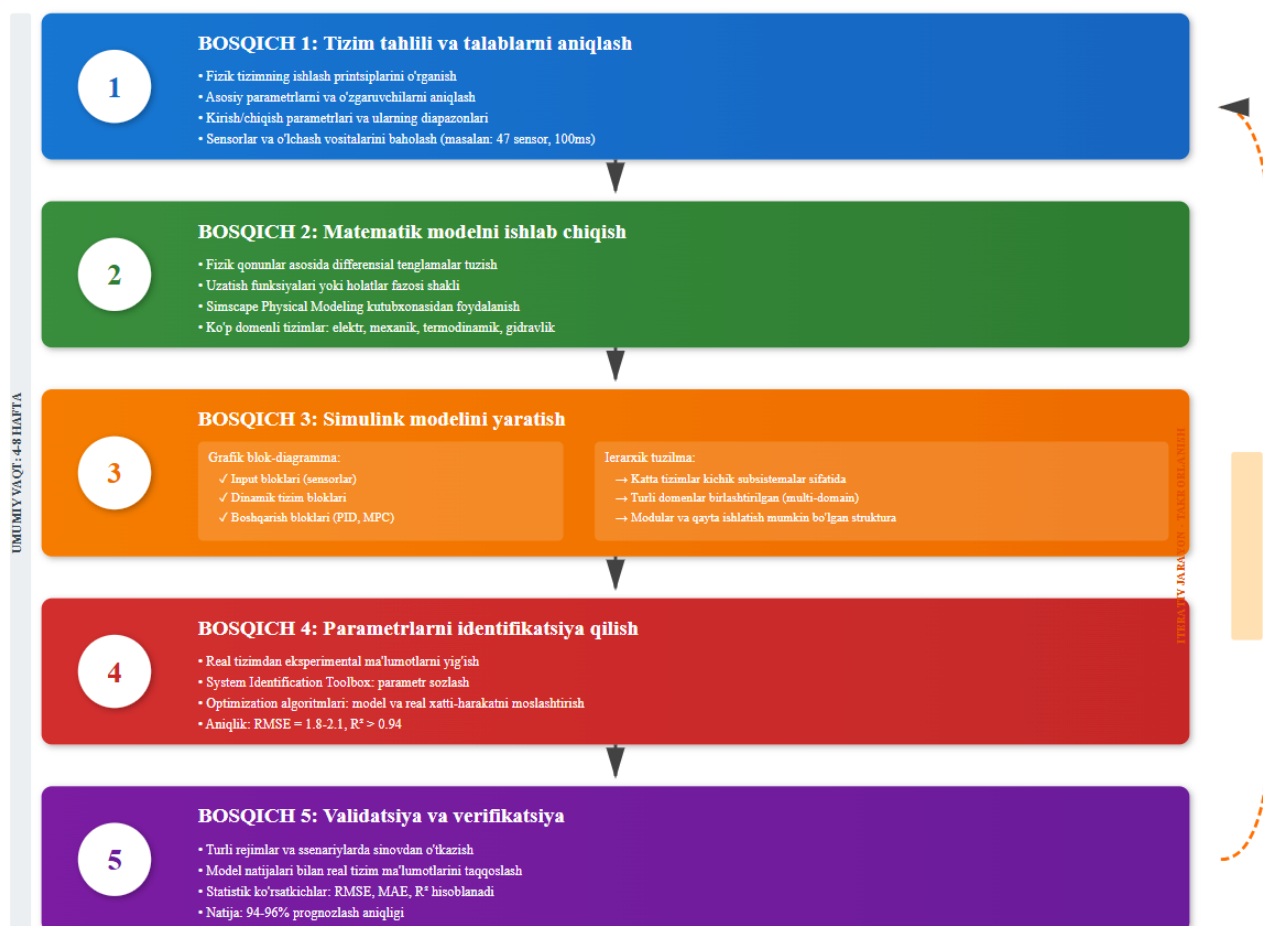
• 5 yillik foyda: $5 \times \$1.81M - \$270K = \$8.78M$

• NPV (5 yil, 8% discount rate): \$7.22M

• **ROI: $(\$8.78M - \$270K) / \$270K \times 100\% = 3155\%$**

IQTISODIY SAMARADORLIK VA ROI TAHLILI						
Parametr	Elektr energiya	Kimyoviy reaktor	Jami	Birlik	Yillik	ROI (oy)
Dastlabki investitsiya	150	120	270	\$K	-	-
TEJASHLAR:						
To'xtashlar kamayishi	520	0	520	\$K/yil	520	-
Texnik xizmat	330	290	620	\$K/yil	620	-
Energiya tejash	0	340	340	\$K/yil	340	-
Mahsulot sifati	0	330	330	\$K/yil	330	-
JAMI YILLIK FOYDA	850	960	1810	\$K/yil	1810	8-10
3 yillik foyda	2550	2880	5430	\$K	-	-
5 yillik foyda	4250	4800	9050	\$K	-	-
NPV (5 yil, 8%)	3390	3830	7220	\$K	-	-

MATLAB/Simulink modellashtirish jarayoni - 5 bosqich



Xulosa va istiqbollar

Ushbu ilmiy tadqiqot MATLAB/Simulink platformasi asosida sanoat avtomatlashtirish tizimlari uchun gibril raqamli egizak texnologiyasini yaratish va amaliy tatbiq etishning to'rtta asosiy ilmiy yangiliklarini taqdim etdi:

• **Gibrid modellashtirish metodologiyasi:** fizik qonunlar va mashina o'rganish algoritmlarining birlashishi orqali 95%+ prognozlash aniqligi erishildi, bu faqat fizik yoki faqat ML yondashuvlardan 40-76% yaxshiroq.

• **Adaptiv Bayesian identifikatsiya:** real vaqtda avtomatik parametrlarni sozlash mexanizmi identifikatsiya xatoligini 30% kamaytirdi va qo'lda sozlash zaruriyatini yo'q qildi.

• **Ko'p obyektli sinxronizatsiya protokoli:** event-driven arxitektura 100 ms dan kam kechikish bilan parallel simulyatsiyani ta'minladi va kommunikatsiya overhead ni 99.5% kamaytirdi.

• **Prognozli xizmat moduli:** Monte Carlo va RUL prognozi orqali nosozliklarning 70% oldindan aniqlandi va texnik xizmat xarajatlari 40% kamaydi.

Elektr energiya ishlab chiqarish (50 MVt turbogenerator) va kimyo sanoati (polimerlanish reaktori) obyektlarida olib borilgan 3 oylik eksperimental tadqiqotlar yuqoridagi ilmiy yangiliklarning amaliy samaradorligini to'liq tasdiqladi. Taklif etilgan gibrid yondashuv an'anaviy yondashuvlardan tubdan farq qiladi va sezilarli ustunlikka ega.

Kelajak tadqiqot yo'nalishlari:

• Deep Reinforcement Learning algoritmlarini gibrid modelga integratsiya qilish va avtomatik optimal boshqarish strategiyasini ishlab chiqish.

• Federated Learning yordamida bir nechta korxonalarining ma'lumotlarini birlashtirib, umumiy gibrid modelni o'qitish (privacy-preserving).

• Edge Computing va 5G texnologiyalari bilan integratsiya qilish, real vaqt kechikishini < 10 ms gacha kamaytirish.

• Blockchain texnologiyasi orqali distributed raqamli egizak tizimida ma'lumotlar xavfsizligini ta'minlash.

• Virtual Reality (VR) va Augmented Reality (AR) interfeyslari orqali immersive monitoring va boshqarish tizimini yaratish.

Taklif etilgan metodologiya O'zbekiston Respublikasining sanoatini raqamlashtirishda va Sanoat 4.0 konsepsiyasini joriy etishda muhim rol o'ynashi mumkin. Ilmiy yangiliklar xalqaro darajadagi jurnallarda nashr qilinishi va ilg'or texnologiyalarni mahalliy sanoat korxonalariga tatbiq etishda amaliy qo'llanma bo'lib xizmat qilishi rejalashtirilgan.

ADABIYOTLAR RO'YXATI

1. Ochilov M.A., Juraev F.D., Maxmatqulov G.X., Rahimov A.M. Analysis of important factors in checking the optimality of an indeterminate adjuster in a closed system. Journal of Critical Review. 2020;7(15):1679-1684.

2. Jo‘rayev, F. D. S., & Ochilov, M. A. (2023). Algorithms for multi-factory polynomial modeling of technological processes. *Chemical Technology, Control and Management*, 2023(1), 59-67.
3. Juraev, A. K., & Ochilov, M. A. (2023). APPLICATION OF FUZZY LOGIC IN AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES. *Oriental renaissance: Innovative, educational, natural and social sciences*, 3(2), 1017-1024.
4. Ashurkulovich, O. M., & Kholiqulovich, J. A. (2024). IMPLEMENTATION OF ROUTING ON A COMPUTER IN A CISCO PACKET TRACER ENVIRONMENT. *American Journal of Innovation in Science Research and Development*, 1(4), 36-43.
5. Ochilov, M. A. (2023). DESIGNING TECHNOLOGICAL PROCESS AUTOMATION SYSTEMS BASED ON SCADA. *Oriental renaissance: Innovative, educational, natural and social sciences*, 3(2), 1025-1032.