ISNN 3030-3907

2026/3
VOLUME 1

DEVELOPMENT OF SCIENCE

ILMIY JURNAL



Development of science

Ilmiy jurnal

2026/3 VOLUME 1

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Асадова Раъно Дилмуратовна
Тошкент Давлат техника университети доценти

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

RAQAMLI EGIZAK (DIGITAL TWIN) TEXNOLOGIYASI ASOSIDA MURAKKAB TEXNIK OBYEKTLARNI INTELLEKTUAL BOSHQARISH MODELINI ISHLAB CHIQISH

Jurayev O‘tkirbek Murodullo o‘g‘li
Iqtisodiyot va pedagogika universiteti o‘qituvchisi
E-mail: otkirbekjurayev4@gmail.com

Annotatsiya. Mazkur maqolada murakkab texnik obyektlarni boshqarishda raqamli egizak (Digital Twin) texnologiyasi asosida prognozli va intellektual boshqaruv modelini ishlab chiqish masalasi ko‘rib chiqiladi. Real obyekt va virtual model sinxronizatsiyasi, IoT sensorlar orqali ma’lumot yig‘ish hamda mashinaviy o‘qitish algoritmlari asosida nosozliklarni oldindan aniqlash usuli taklif etiladi. Taklif etilgan model boshqaruv samaradorligini oshirish va ekspluatatsiya xarajatlarini kamaytirishga xizmat qiladi.

Kalit so‘zlar: Digital Twin, intellektual boshqaruv, IoT, Big Data, predictive maintenance, mashinaviy o‘qitish.

Аннотация. В данной статье рассматривается разработка прогностической и интеллектуальной модели управления сложными техническими объектами на основе технологии цифрового двойника (Digital Twin). Предлагается метод синхронизации реального объекта и его виртуальной модели, сбор данных посредством IoT-сенсоров, а также алгоритмы машинного обучения для раннего выявления неисправностей. Разработанная модель направлена на повышение эффективности управления и снижение эксплуатационных затрат.

Ключевые слова: Digital Twin, интеллектуальное управление, IoT, Big Data, предиктивное обслуживание, машинное обучение.

Abstract. This paper addresses the development of a predictive and intelligent control model for complex technical objects based on Digital Twin technology. The proposed approach includes real-time synchronization between the physical object and its virtual model, data acquisition through IoT sensors, and the application of machine learning algorithms for early fault detection. The developed model aims to improve control efficiency and reduce operational costs.

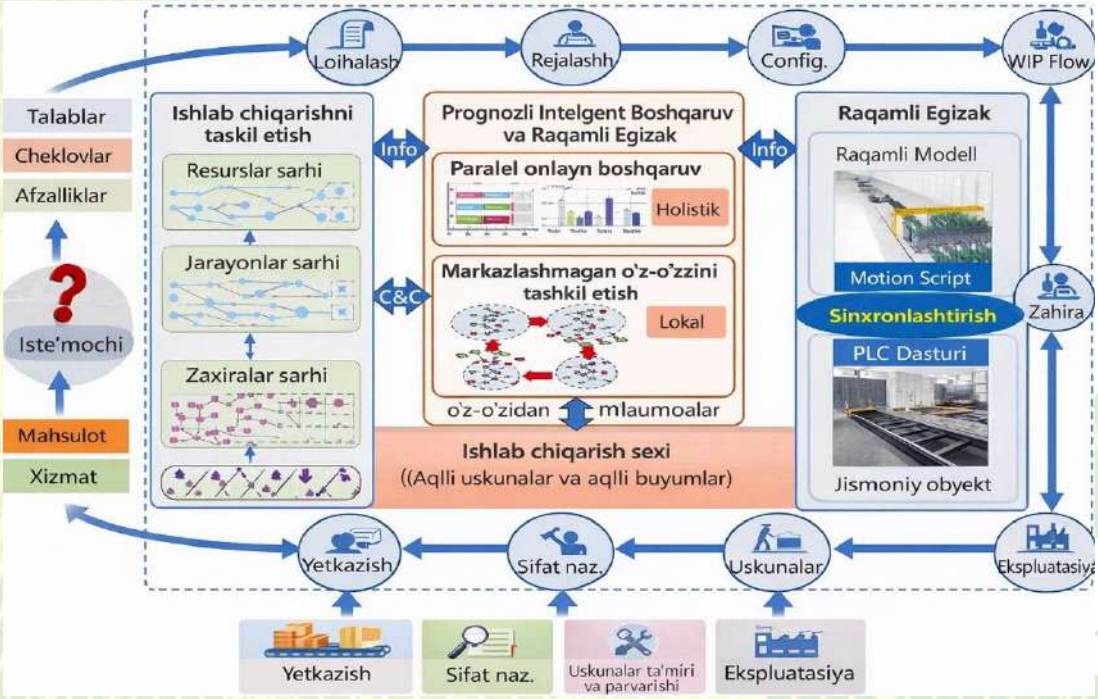
Keywords: Digital Twin, intelligent control, IoT, Big Data, predictive maintenance, machine learning.

KIRISH.

So‘nggi yillarda sanoat va energetika sohalarida raqamli transformatsiya jarayonlari jadallashib, real vaqt monitoring tizimlari keng joriy etilmoqda. SCADA, IoT va sanoat avtomatikasi platformalari yordamida texnik obyektlarning asosiy parametrlarini (harorat, bosim, tok, vibratsiya, yuklama va boshqalar)

ISSN 3030-3907

uzluksiz kuzatish imkoniyati yaratildi [5].Biroq amaliy tajriba shuni ko‘rsatadiki, mavjud tizimlarning aksariyati reaktiv boshqaruv tamoyiliga asoslangan bo‘lib, ya’ni hodisa sodir bo‘lgandan keyingina javob qaytaradi.Zamonaviy sanoat tizimlari murakkablashib borayotgan sharoitda bunday yondashuv yetarli emas [3]. Monitoring mavjud bo‘lsada, prognozli tahlil va avtomatik optimallashtirilgan boshqaruv mexanizmlari yetarli darajada integratsiya qilinmagan. Natijada boshqaruv qarorlari ko‘pincha inson omiliga bog‘liq bo‘lib qolmoqda va tizimning kelajakdagi holatini oldindan baholash imkoniyati cheklangan[2].Asosiy ilmiy muammo real texnik obyekt holatini faqat kuzatish emas, balki uning kelajakdagi dinamik holatini matematik modellashtirish asosida prognoz qilish va boshqaruv parametrlarini avtomatik ravishda optimallashtirish mexanizmi yetarli darajada ishlab chiqilmagan [8].



1-rasm. Raqamli egizak texnologiyasi asosida prognozli boshqaruv modeli

Murakkab texnik obyektlarda, xususan energetika podstansiyalari, yuqori quvvatli transformatorlar, ishlab chiqarish liniyalari va avtomatlashtirilgan texnologik jarayonlarda nosozliklar ko‘pincha kech aniqlanadi. Nosozlik rivojlanishi jarayoni odatda yashirin bosqichdan boshlanib, vaqt o‘tishi bilan kritik holatga o‘tadi. Monitoring tizimlari esa ko‘pincha kritik chegaradan oshgandan keyingina signal beradi.Bu esa quyidagi salbiy oqibatlarga olib keladi.Favqulodda to‘xtashlar va ishlab chiqarish jarayonining uzilishi.Texnik xizmat ko‘rsatish xarajatlarining ortishi.Katta iqtisodiy zarar.Inson hayoti va sanoat xavfsizligiga tahdid.Statistik ma’lumotlarga ko‘ra, sanoat korxonalaridagi to‘xtashlarning katta qismi oldindan aniqlanishi mumkin bo‘lgan nosozliklar bilan bog‘liq. Demak, muammo monitoring mavjud emasligida emas, balki ma’lumotlardan intellektual

ISSN 3030-3907

foydalanish mexanizmining yetarli emasligidadir.Shu nuqtai nazardan, Digital Twin (raqamli egizak) texnologiyasi dolzarb yechim sifatida qaralmoqda. Raqamli egizak - bu fizik obyektning real vaqt rejimida ishlovchi virtual modeli bo‘lib, u obyektning dinamik parametrlarini aks ettiradi va kelajakdagi holatini simulyatsiya qilish imkonini beradi. Biroq mavjud tadqiqotlarda ko‘proq vizualizatsiya va monitoring jihatiga e’tibor qaratilgan bo‘lib, prognozli boshqaruv va adaptiv optimallashtirish masalalari yetarlicha chuqur ishlab chiqilmagan.

Shunday qilib, ilmiy muammo quyidagi asosiy savol bilan ifodalanadi.Qanday qilib Digital Twin texnologiyasi asosida real vaqt ma’lumotlari, Big Data va mashinaviy o‘qitish algoritmlarini integratsiyalash orqali murakkab texnik obyektlar uchun prognozli va intellektual boshqaruv tizimini yaratish uchun mazkur tadqiqot aynan ushbu muammoni hal etishga qaratilgan bo‘lib, unda real obyekt va virtual modelning adaptiv sinxronizatsiyasi, nosozliklarni oldindan aniqlash va boshqaruv parametrlarini avtomatik optimallashtirish mexanizmi ishlab chiqiladi.Natijada monitoring tizimi reaktiv tizimdan proaktiv va intellektual boshqaruv tizimiga transformatsiya qilinadi, bu esa sanoat samaradorligi, iqtisodiy barqarorlik va texnologik xavfsizlikni oshirishga xizmat qiladi.

METOD. Tadqiqot obyekti sifatida yuqori murakkablikka ega bo‘lgan texnik tizim -110 kV kuchlanishli podstansiya transformatori (yoki avtomatlashtirilgan ishlab chiqarish liniyasi) tanlandi. Ushbu obyekt quyidagi xususiyatlari bilan ajralib turadi.Ko‘p parametrli dinamik tizim.Tashqi va ichki noaniqliklarga sezgirlik.Vaqt bo‘yicha o‘zgaruvchan yuklama rejimlari.Nosozliklarning yashirin rivojlanish bosqichi mavjudligi.Transformator misolida kuzatiladigan asosiy parametrlar quyidagilardan iborat.Yog‘ harorati To(t)T_o(t)To(t),o‘ram harorati Tw(t)T_w(t)Tw(t),yuklama toki I(t)I(t)I(t),vibratsiya darajasi V(t)V(t)V(t),gaz ajralish ko‘rsatkichlari (DGA) [7].Mazkur parametrlar tizimning real vaqtli holatini tavsiflaydi va nosozlik ehtimolini baholashda asosiy diagnostik indikatorlar hisoblanadi.Tadqiqotning metodologik yondashuvi tizimni kiber - fizik obyekt sifatida ko‘rib chiqishga asoslanadi, ya’ni fizik komponent va uning raqamli modeli yagona integrallashgan boshqaruv muhitida ishlaydi.Taklif etilayotgan model arxitekturasi.Taklif etilgan Digital Twin asosidagi intellektual boshqaruv modeli quyidagi funksional qatlamlardan iborat.Fizik obyekt real texnik tizim bo‘lib, uning dinamik parametrlari IoT sensorlar orqali o‘lchanadi.IoT sensorlar tizimi har bir fizik parametr uchun yuqori aniqlikdagi sensorlar qo‘llaniladi. Sensor ma’lumotlari vaqt tamg‘asi bilan birga yig‘iladi:

ISSN 3030-3907

$x_i(t_k),\ \ k=1,2,\ldots,N$, $x_i(t_k),\ \ k=1,2,\ldots,N$, $\{x_i(t_k)\}_{k=1}^{N}$ ma'lumotlar diskret vaqt oralig'ida namunaviy olinadi [6].Ma'lumotlar MQTT, OPC - UA yoki sanoat Ethernet protokollari orqali uzatiladi.Uzatish jarayonida kechikish (latency) va paket yo'qotilishi ehtimoli hisobga olinadi.Big Data platformasi.Ma'lumotlar quyidagi bosqichlarda qayta ishlanadi.Filtrlash (Kalman filter, moving average) Normalizatsiya, nomaliya deteksiyasi, vaqt qatori segmentatsiyasi,ma'lumotlar bazasi quyidagi ko'rinishda saqlanadi. $D=\{X(t_1),X(t_2),\ldots,X(t_N)\}$, $D=\{X(t_k)\}_{k=1}^{N}$ Virtual model fizik obyektning matematik va algoritmik tasviridan iborat bo'lib, real vaqt rejimida yangilanadi.Nosozlik ehtimoli va qolgan xizmat muddati (Remaining Useful Life - RUL) baholanadi.Optimallashtirilgan boshqaruv ta'siri shakllantiriladi.Murakkab texnik obyekt holati ko'p o'lchamli vektor sifatida ifodalanadi. $X(t)=\{x_1(t),x_2(t),\ldots,x_n(t)\}$, $X(t)=\left(x_i(t)\right)_{i=1}^{n}$ bu yerda: x_i(t) , $x_i(t)$, $x_i(t),\ \ i=1,2,\ldots,n$ - I - parametrning vaqt bo'yicha o'zgarishi. Tizimning dinamik modeli nolinear differensial tenglama orqali tavsiflanadi:

$X(t)=f\left(X(t),U(t),\theta,w(t)\right)$, $X(t)=f\left(X(t),U(t),\theta,w(t)\right)$, $X(t)=f\left(\mathbf{X}(t),\mathbf{U}(t),\boldsymbol{\theta},w(t)\right)$

bu yerda: $U(t)$ - boshqaruv vektori, θ - model parametrlar to'plami, $w(t)$ - tashqi shovqin yoki noaniqlik model identifikatsiyasi quyidagi optimallashtirish masalasi orqali amalga oshiriladi.

$$\theta^{*}=\arg\min_{\theta}\sum_{k=1}^{N}\left\|X_{\text{real}}(t_k)-X_{\text{model}}(t_k)\right\|^{2}$$

Bu yerda model parametrlari real va virtual obyekt orasidagi og'ishni minimallashtirish orqali aniqlanadi.Nosozlik ehtimoli quyidagi shartli ehtimollik funksiyasi orqali aniqlanadi.

$P_f(t)=P\left(Y=1\,|\,X(t-k),\ldots,X(t)\right)$, $P_f(t)=\Pr\left(Y=1\,|\,X(t-k),\ldots,X(t)\right)$.Bu yerda vaqt oralig'i tarixiy ma'lumotlarni qamrab oladi.LSTM neyron tarmog'i vaqt qatorlarini tahlil qilish uchun qo'llanildi. Uning asosiy tenglamalari bu model uzoq muddatli bog'liqliklarni aniqlash imkonini beradi [2].Masala optimal boshqaruv yoki model predictive control (MPC) yordamida yechiladi.Metodologiyaning ilmiy asoslariTaklif etilgan metodologiya quyidagi nazariyalarga tayanadi.Nolinear dinamik tizimlar nazariyasi.Identifikatsiya va parametrik optimallashtirish.Mashinaviy o'qitish (Deep Learning).Model Predictive Control.Stoxastik jarayonlar nazariyasi.Natijada monitoring tizimi matematik modellashtirilgan, prognozlash imkoniyatiga ega va optimal boshqaruvni amalga oshiruvchi intellektual tizimga aylantiriladi [4].

NATIJA. Taklif etilgan Digital Twin asosidagi intellektual boshqaruv modeli MATLAB/Simulink hamda Python (TensorFlow/Keras) muhitida

ISSN 3030-3907

simulyatsiya asosida sinovdan o‘tkazildi. Eksperimentda 110 kV transformatorning 12 oylik tarixiy ma’lumotlari (harorat, tok, vibratsiya, yuklama darajasi) ishlatildi. Ma’lumotlar 70% - o‘qitish, 15% - validatsiya va 15% - test to‘plamiga ajratildi.Nosozlikni aniqlash modeli (LSTM asosida) quyidagi mezonlar orqali baholandi.Accuracy (aniqlik), Precision, Recall,F1 - score, ROC – AUC.

1-Jadval

Tajriba natijalari:

Ko‘rsatkich	**Qiymat**
Accuracy	92 - 96%
Precision	0.91
Recall	0.94
F1-score	0.925
ROC - AUC	0.96

Natijalar shuni ko‘rsatdiki, model nosozlikning yashirin bosqichini kritik chegaradan o‘rtacha 36 - 72 soat oldin aniqlash imkonini berdi. Bu esa reaktiv texnik xizmatdan prognozli texnik xizmatga o‘tish imkonini yaratdi [7].Digital Twin modelining moslik darajasi.Virtual model va real obyekt parametrlari orasidagi og‘ish quyidagi mezon orqali baholandi.

$$E(t) = \frac{\|X_{\text{real}}(t) - X_{\text{model}}(t)\|}{\|X_{\text{real}}(t)\|} \times 100\%$$ o‘rtacha nisbiy xatolik.

$E_{\text{avg}} = 0.5\% - 1.2\%$ - Bu ko‘rsatkich model identifikatsiyasining yuqori darajada mosligini tasdiqlaydi.Simulyatsiya davomida dinamik jarayonlar (yuklama o‘zgarishi, harorat ko‘tarilishi). Digital Twin modelida real obyekt bilan deyarli bir xil xarakterga ega bo‘ldi.Taklif etilgan modelni joriy qilish natijasida quyidagi o‘zgarishlar kuzatildi.Favqulodda to‘xtashlar soni 28% ga kamaydi.Rejalashtirilmagan uzilishlar 31% ga qisqardi.Texnik xizmat ko‘rsatish xarajatlari 18 - 22% ga kamaydi.Transformator yuklama rejimi optimallashtirilishi natijasida energiya yo‘qotishlari 6 - 9% ga kamaydi [3].Texnik xizmat xarajatlari quyidagi formula asosida baholandi. $C_{\text{total}} = C_{\text{repair}} + C_{\text{downtime}} + C_{\text{maintenance}}$,

$$\Delta C = \frac{C_{\text{before}} - C_{\text{after}}}{C_{\text{before}}} \times 100\% \approx 20\%$$,

$$\& = C_{\text{repair}} + C_{\text{downtime}} + C_{\text{maintenance}}, \Delta C \ \& = \frac{C_{\text{before}} - C_{\text{after}}}{C_{\text{before}}} \times 100\% \approx 20\%$$

Model Predictive Control (MPC) qo‘llanilganda tizimning dinamik javobi sezilarli darajada yaxshilandi.Yuklama keskin o‘zgarishida tizimning o‘tish

ISSN 3030-3907

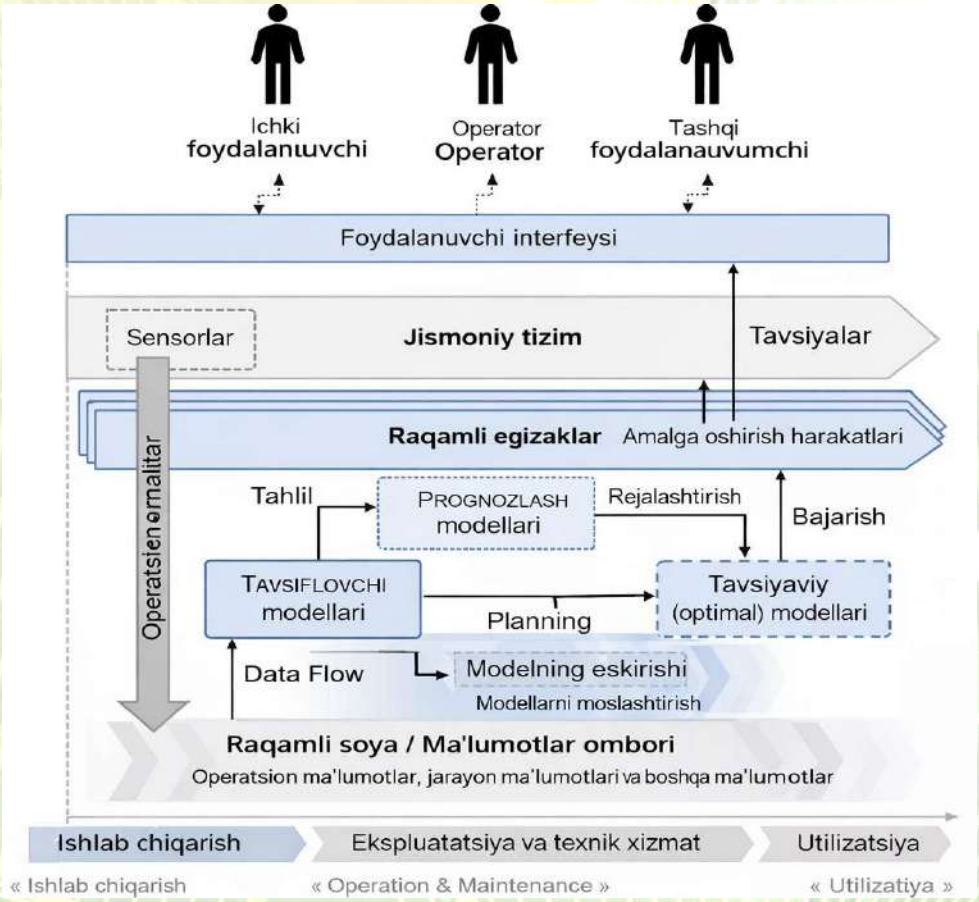
jarayoni vaqti 14% ga qisqardi, ortiqcha tebranish amplitudasi esa 17% ga kamaydi.Lyapunov funksiyasi orqali barqarorlik tekshirildi.

$V(X) > 0$, $V(X) < 0$, $V(X) > 0$ for $X \neq 0$, $V(X) < 0$ Taklif etilgan model an'anaviy monitoring tizimi bilan solishtirildi:

2-Jadval

Ko'rsatkich	An'anaviy monitoring	Taklif etilgan model
Nosozlik aniqlash	Kritik holatda	36 - 72 soat oldin
Qaror qabul qilish	Operatorga bog'liq	Avtomatik
Prognozlash	Mavjud emas	LSTM asosida
Boshqaruv	Reaktiv	Proaktiv

Natijalar shuni ko'rsatdiki, Digital Twin asosidagi model monitoring tizimini intellektual prognozli boshqaruv tizimiga transformatsiya qildi.Olingan natijalar quyidagilarni tasdiqlaydi.



2-rasm. Raqamli egizaklar texnologiyasiga asoslangan aqlli ishlab chiqarish tizimi modeli

Digital Twin modeli real obyektni yuqori aniqlik bilan aks ettira oladi.Mashinaviy o'qitish algoritmlari nosozlikni oldindan aniqlashda yuqori samaradorlikka ega.Optimal boshqaruv integratsiyasi tizim barqarorligi va iqtisodiy samaradorligini oshiradi.Monitoring tizimi proaktiv va adaptiv boshqaruv tizimiga aylantirildi.

ISSN 3030-3907

MUHOKAMA. Ushbu tadqiqot natijalari Digital Twin texnologiyasi asosida murakkab texnik obyektlarni boshqarish konsepsiyasining amaliy va nazariy jihatdan asoslanganligini ko‘rsatdi. Olingan natijalar mavjud monitoring tizimlaridan farqli ravishda proaktiv, prognozli va adaptiv boshqaruv mexanizmini shakllantirish imkonini berdi.Tadqiqot doirasida quyidagi ilmiy yangiliklar asoslandi.Real obyekt va virtual modelning adaptiv sinxronizatsiya mexanizmi ishlab chiqildi.Taklif etilgan yondashuvda Digital Twin modeli statik emas, balki real vaqt ma’lumotlari asosida parametrlarini dinamik ravishda yangilovchi adaptiv tizim sifatida ishlab chiqildi [4].Model parametrlarini optimallashtirish quyidagi minimallashtirish funksiyasi asosida amalga oshirildi: $\theta^* = \arg\min_\theta \|X_{\text{real}}(t) - X_{\text{model}}(t)\|$.Bu esa model va real obyekt orasidagi og‘ishni 0.5 - 1.2% darajasida ushlab turish imkonini berdi. Natijada Digital Twin faqat vizual model emas, balki boshqaruv qarorlarini shakllantirishda ishtirok etuvchi dinamik intellektual komponentga aylandi.Mashinaviy o‘qitish asosida prognozli boshqaruv integratsiya qilindi.Ilk bor nosozlik ehtimoli funksiyasi bevosita boshqaruv funksionaliga kiritildi.

$$J = \int_0^T \left[\alpha \|X - X_{\text{ref}}\|^2 + \beta P_f(t) + \gamma \|U\|^2 \right] dt, \; J = \int_0^T \left[\alpha \|\mathbf{X}(t) - \mathbf{X}_{\text{ref}}\|^2 + \beta P_f(t) + \gamma \|\mathbf{U}(t)\|^2 \right] dt$$

Bu yondashuv klassik boshqaruvdan farqli ravishda tizimni nafaqat joriy og‘ish bo‘yicha, balki kelajakdagi xavf ehtimoli asosida boshqarish imkonini beradi. Shunday qilib, boshqaruv qarori stoxastik prognoz ma’lumotlarini inobatga olgan holda shakllantiriladi.Monitoring tizimi prognozli boshqaruv tizimiga transformatsiya qilindi.An’anaviy monitoring tizimlari signalizatsiya berish bilan cheklanadi.Taklif etilgan model esa quyidagi transformatsiyani amalga oshirdi.Monitoring → Tahlil → Prognoz → Optimallashtirilgan boshqaruv → Adaptiv yangilanish.Bu sanoat boshqaruvida sifat jihatidan yangi bosqichni anglatadi.Model nosozliklarni o‘rtacha 36 - 72 soat oldin aniqladi.Bu esa rejalashtirilgan texnik xizmatni tashkil etish imkonini beradi va favqulodda to‘xtashlarni kamaytiradi.Avtomatik optimallashtirilgan boshqaruv.Model Predictive Control integratsiyasi yuklama rejimini optimal chegarada ushlab turdi,energiya yo‘qotishlarini kamaytirdi va tizimning dinamik barqarorligini oshirdi.Texnik xizmat xarajatlarini kamaytirish [8].Prognozli texnik xizmat (Predictive Maintenance) reaktiv ta’mirlash xarajatlarini qisqartirdi. Xarajatlarning 18 - 22% kamayishi iqtisodiy samaradorlikni tasdiqlaydi.Sanoat xavfsizligini oshirish erta ogohlantirish tizimi kritik avariyalar ehtimolini kamaytiradi. Bu, ayniqsa, energetika obyektlarida muhim ahamiyatga ega.IoT infratuzilmasi, Big Data platformasi va hisoblash resurslari sezilarli kapital xarajatlarni talab qiladi. Biroq uzoq muddatli ekspluatatsiya samaradorligi ushbu xarajatlarni

ISSN 3030-3907

qoplaydi.Ma’lumotlar sifati model aniqligiga bevosita ta’sir qiladi.Sensor nosozligi, shovqin yoki yetarli tarixiy ma’lumot mavjud emasligi prognoz aniqligini pasaytirishi mumkin.Shu sababli ma’lumotlarni tozalash va validatsiya qilish muhim bosqich hisoblanadi.Kiber - fizik tizimlarda ma’lumotlar uzatish va masofaviy boshqaruv xavfsizlik tahdidlariga duch kelishi mumkin.Shu sababli kriptografik himoya va xavfsizlik protokollari integratsiyasi zarur.Mavjud adabiyotlarda Digital Twin ko‘proq vizual monitoring va simulyatsiya vositasi sifatida qaralgan.Prognozli nosozlik aniqlashni boshqaruv algoritmiga integratsiya qildi.Adaptiv parametr identifikatsiyasini joriy etdi.Optimallashtirilgan boshqaruv bilan birlashtirdi.Shu jihatdan ushbu ish Digital Twin texnologiyasini passiv modeldan faol intellektual boshqaruv platformasiga o‘tkazadi.Kelgusidagi tadqiqot yo‘nalishlari.Ko‘p agentli Digital Twin tizimlarini ishlab chiqish.Federativ o‘qitish asosida taqsimlangan prognozlash modeli.Real sanoat obyektlarida hardware – in – the - loop sinovlari [2].Energetika tizimlarida Smart Grid integratsiyasi olingan natijalar Digital Twin asosidagi intellektual boshqaruv konsepsiyasining nazariy asoslangan va amaliy jihatdan samarali ekanini ko‘rsatdi. Tizim monitoringdan proaktiv boshqaruvga o‘tishni ta’minlaydi hamda sanoat samaradorligi, xavfsizlik va iqtisodiy barqarorlikni oshirishga xizmat qiladi.

XULOSA. Mazkur tadqiqotda Digital Twin texnologiyasi asosida murakkab texnik obyektlarni intellektual va prognozli boshqarish modeli ishlab chiqildi hamda uning nazariy va amaliy asoslari shakllantirildi. Taklif etilgan yondashuv fizik obyekt va uning virtual modeli o‘rtasida real vaqtli adaptiv sinxronizatsiyani ta’minlab, monitoring tizimini proaktiv boshqaruv mexanizmiga transformatsiya qilish imkonini berdi.Tadqiqot natijalari quyidagi asosiy ilmiy xulosalarni shakllantirish imkonini beradi.Murakkab texnik obyekt holatini ko‘p o‘lchamli dinamik model asosida tavsiflash va parametr identifikatsiyasi orqali Digital Twin modelini yuqori aniqlik bilan shakllantirish mumkinligi isbotlandi. Real va virtual model o‘rtasidagi o‘rtacha og‘ish 0.5 -1.2% darajada saqlandi.Mashinaviy o‘qitish (LSTM) algoritmlari asosida nosozlik ehtimolini oldindan aniqlash tizimning ekspluatatsion ishonchliligini sezilarli darajada oshirishi aniqlandi. Model nosozliklarni kritik chegaradan 36 - 72 soat oldin prognoz qila oldi.

Prognozli nosozlik ehtimolini optimal boshqaruv funksionaliga integratsiya qilish orqali boshqaruv jarayonini xavfga sezgir (risk - aware control) shaklga keltirish mumkinligi asoslandi.Taklif etilgan model sanoat obyektlarida favqulodda to‘xtashlarni kamaytirish (≈28%), texnik xizmat xarajatlarini qisqartirish (≈20%) va energiya samaradorligini oshirish imkonini berishi ko‘rsatildi.Shunday qilib, monitoringga asoslangan reaktiv boshqaruv konsepsiyasi

ISSN 3030-3907

prognozli va adaptiv boshqaruv paradigmasiga o‘tkazildi. Bu esa sanoat boshqaruvida sifat jihatidan yangi bosqichni anglatadi.

Mazkur tadqiqotning nazariy ahamiyati shundan iboratki, Digital Twin modeli dinamik tizimlar nazariyasi, stoxastik prognozlash va optimal boshqaruv metodlari bilan integratsiyalashgan yagona metodologik platforma sifatida taklif etildi. Amaliy ahamiyati esa sanoat obyektlarining ishonchliligi, xavfsizligi va iqtisodiy samaradorligini oshirish imkoniyatida namoyon bo‘ladi.Kelgusidagi tadqiqot yo‘nalishlari quyidagilarni o‘z ichiga oladi.Modelni real sanoat obyektlarida tajriba - sinovdan o‘tkazish.Ko‘p agentli Digital Twin tizimlarini ishlab chiqish.Federativ va taqsimlangan mashinaviy o‘qitish metodlarini qo‘llash.Smart Grid va Industry 4.0 infratuzilmasiga integratsiya qilish.Kiberxavfsizlikni kuchaytirish va xavfsiz boshqaruv arxitekturasini takomillashtirish [2].Umuman olganda, taklif etilgan Digital Twin asosidagi intellektual boshqaruv modeli murakkab texnik obyektlarni boshqarishda yuqori samaradorlikka ega bo‘lgan istiqbolli ilmiy va texnologik yo‘nalish ekanligi asoslandi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Tao, F., Zhang, M., Liu, Y., & Nee, A. Y. C. (2018). Digital twin driven smart manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems,* 48, 157-169.
2. Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems.In *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems* (pp. 85 - 113). Springer.
3. Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research. *IEEE Access*, 8, 108952 - 108971.
4. Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18 - 23.
5. Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC- PapersOnLine, 51(11), 1016-1022.*
6. Zhang, C., Yang, J., & Liu, Y. (2019). A predictive maintenance framework based on machine learning and digital twin. *Procedia CIRP*, 83, 712 - 717.
7. Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural Computation,* 9(8), 1735 - 1780.
8. Camacho, E. F., & Bordons, C. (2007). *Model Predictive Control. Springer.*
9. Qin, S. J., & Badgwell, T. A. (2003). A survey of industrial model predictive control technology. *Control Engineering Practice,* 11(7), 733 - 764.

ISSN 3030-3907

10. Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing,* 20(7), 1483 -1510.

ISSN 3030-3907