

**TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI  
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI  
DSc.03/30.12.2019.T.03.02 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

**TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI**

**IVANYAN ARSEN IGNATYEVICH**

**SUN'IY INTELLEKT TEXNOLOGIYALARIDAN FOYDALANIB ISHLAB  
CHIQARISH OBYEKTLARINING RAQAMLI EGIZAKLARI  
NAZARIYASINI RIVOJLANTIRISH**

**05.01.08 – Texnologik jarayonlar va ishlab chiqarishlarni  
avtomatlashtirish va boshqarish**

**TEXNIKA FANLARI DOKTORI (DSc)  
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

**Doktorlik (DSc) dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi**

**Оглавление автореферата докторской (DSc) диссертации**

**Contents of the Doctoral (DSc) Dissertation Abstract**

**Ivanyan Arsen Ignatevich**

Sun’iy intellekt texnologiyalaridan foydalanib ishlab chiqarish obyektlarining  
raqamli egizaklari nazariyasini rivojlantirish ..... 3

**Иваньян Арсен Игнатьевич**

Развитие теории цифровых двойников производственных объектов  
с использованием технологий искусственного интеллекта ..... 29

**Ivanyan Arsen Ignatevich**

Development of the theory of digital twins of production facilities using  
artificial intelligence technologies ..... 55

**E’lon qilingan ishlar ro‘yxati**

Список опубликованных работ

List of published works ..... 59

**TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI  
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI  
DSc.03/30.12.2019.T.03.02 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

**TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI**

**IVANYAN ARSEN IGNATEVICH**

**SUN'IY INTELLEKT TEXNOLOGIYALARIDAN FOYDALANIB ISHLAB  
CHIQARISH OBYEKTLARINING RAQAMLI EGIZAKLARI  
NAZARIYASINI RIVOJLANTIRISH**

**05.01.08 – Texnologik jarayonlar va ishlab chiqarishlarni  
avtomatlashtirish va boshqarish**

**TEXNIKA FANLARI DOKTORI (DSc)  
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Doktorlik (DSc) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lif, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2024.2.DSc/T790 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Doktorlik dissertatsiyasi Toshkent davlat texnika universitetida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengashning veb-sahifasida ([www.tdtu.uz](http://www.tdtu.uz)) hamda «ZiyoNet» Axborot ta'lif portalida ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)) joylashtirilgan.

**Ilmiy maslahatchi:**

**Adilov Farux Tulkunovich**

texnika fanlari doktori, professor

**Rasmiy opponentlar:**

**Igamberdiyev Xusan Zakirovich**

texnika fanlari doktori, professor, O'zR FA akademigi

**Maraximov Avazjon Raximovich**

texnika fanlari doktori, professor

**Musayev Muhammadjon Maxmudovich**

texnika fanlari doktori, professor

**Yetakchi tashkilot:**

**"O'ZLITINEFTGAZ" AJ**

Dissertatsiya himoyasi Toshkent davlat texnika universiteti huzuridagi DSc.03/30.12.2019.T.03.02 raqamli Ilmiy kengashning 2024-yil «9» 11 soat 10:00 dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 100095, Toshkent shahri, Universitet ko'chasi, 2. Tel.: (99871) 246-46-00; faks: (99871) 227-10-32; e-mail: [tstu\\_info@edu.uz](mailto:tstu_info@edu.uz)).

Dissertatsiya bilan Toshkent davlat texnika universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (40) raqami bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 100095, Toshkent shahri, Universitet ko'chasi, 2. Tel.: (99871) 207-14-70).

Dissertatsiya avtoreferati 2024-yil «21» 10 kuni tarqatildi.  
(2024-yil «11» 09 dagi 17 raqamli reyestr bayonnomasi).



N.R. Yusupbekov

Ilmiy darajalar beruvchi  
ilmiy kengash raisi,

t.f.d., professor, O'zR FA akademigi

U.F. Mamirov

Ilmiy darajalar beruvchi  
ilmiy kengash ilmiy kotibi,  
t.f.d., professor

X.Z. Igamberdiyev

Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash  
qoshidagi Ilmiy seminar raisi,  
t.f.d., professor, O'zR FA akademigi

## **KIRISH (fan doktori (DSc) dissertatsiyasi annotatsiyasi)**

**Dissertatsiya mavzusining dolzarbliji va zarurati.** Jahonda hayotning barcha sohalarida raqamlashtirish masalalarini o‘rganishni kengaytirish va chiqurlashtirishga alohida e’tibor qaratilmoqda. Bu turli omillar va tendensiyalar - insoniyatning globallashuvi, biznes samaradorligini oshirish yo‘llarini doimiy izlash, jamiyatdagi sotsiologik siljishlar, xavfsizlik va qulaylikni izlash bilan bog‘liq, ammo ularning barchasi ilmiy-texnik taraqqiyotning to‘liq raqamlashtirish va axborotlashtirishga tez va qaytarib bo‘lmaydigan rivojlanishi bilan bog‘likdir.

Shu munosabat bilan, sanoatni avtomatlashtirish dasturlarida ishlab chiqarish obyektlarining raqamli egizaklari nazariyasini ishlab chiqish maxsus tadqiqot vektoriga o‘xshamaydi, lekin ayni paytda bu zamonaviy sanoatning juda yuqori texnologik tabiatini bo‘lganligi sababli juda qiyin ilmiy, texnik va muhandislik vazifasidir. Ushbu sohada fizik prototiplarni modellashtirish texnikasi va takomillashtirish, ishlab chiqarish infratuzilmasini virtualizatsiya qilish, real vaqt rejimida avtomatik va avtomatlashtirilgan funksiyalarni bajarish, shuningdek sun’iy intellekt usullari va algoritmlarini o‘rganish va qo‘llashga alohida e’tibor qaratilmoqda.

Dunyoda ham ishlab chiqarishdagi texnologik jarayonlarni optimallashtirish, ham ma’lumotlarni boshqarish tizimlarini optimallashtirish, shu jumladan modellashtirish texnikasi va uslubiyatini, tizim ish faoliyatini yaxshilash va real vaqt rejimida ma’lumotlar bazalari bilan ishlaydigan tizimlarda ishonchli va xavfsiz interfeyslarni takomillashtirish sohasida tadqiqotlar olib borilmoqda. Haqiqatan ham ilmiy fan sifatida yaratilgan alohida ilmiy yo‘nalish bo‘lib sun’iy intellekt texnikasi va algoritmlari sohasidagi tadqiqotlar, shu jumladan sanoatga qo‘llanilishi hisoblanadi. Shu munosabat bilan sanoatda raqamli egizaklar nazariysi sohasida tadqiqotlar o‘tkazish muhim vazifa hisoblanadi.

Respublikada boshqarishni avtomatlashtirish va kompleks raqamlashtirish yo‘nalishlariga katta e’tibor qaratilmoqda. 2022-2026-yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasida, jumladan, “... iqtisodiyotning real sektorida ..... ishlab chiqarish va operatsion jarayonlarni raqamlashtirish darajasini 2026-yil yakuniga qadar 70 foizgacha oshirish”, “... dasturiy mahsulotlar industriyasi hajmini 5 baravar, ularning eksportini esa 10 baravar oshirib, 500 million AQSH dollariga yetkazish”<sup>1</sup> vazifalari belgilab berilgan. Ushbu maqsadlarga erishish uchun ishlab chiqarish infratuzilmasini raqamlashtirish va unga ishlab chiqarish aktivlarining raqamli analoglarini joriy etish, shu jumladan, sun’iy intellekt texnologiyalaridan faol foydalanish muhim masala hisoblanadi.

---

<sup>1</sup> O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-son «2022-2026-yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning TARAQQIYOT STRATEGIYASI»

Dissertatsiya tadqiqoti O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining “Raqamli O‘zbekiston 2030” Milliy strategiyasi konsepsiyasini tasdiqlash to‘g‘risida”gi Qarori, 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-son “2022-2026-yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning Taraqqiyot Strategiyasi to‘g‘risida”gi, 2017-yil 24-iyuldaggi PF-5120-son “O‘zbekiston Respublikasida loyihalarni boshqarishni amalga oshirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi Farmonlari, 2018-yil 3-iyuldaggi PQ-3832-son “Raqamli iqtisodiyotni rivojlantirish va O‘zbekiston Respublikasida kriptoaktivlari aylanmasi sohasini rivojlantirish chora-tadbirlari to‘g‘risida” gi, 2018-yil 21-noyabrdagi PQ-4022-son “Raqamli iqtisodiyotni rivojlantirish maqsadida raqamli infratuzilmani yanada modernizatsiya qilish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi, 2018-yil 18-apreldagi PQ-3673-son “Idoraviy axborot tizimlarini jadal integratsiyalash va innovatsion loyihalarni amalga oshirish bo‘yicha tashkiliy chora-tadbirlar to‘g‘risida”gi, 2021-yil 17-fevraldaggi PQ-4996-son “Sun’iy intellekt texnologiyalarini jadal joriy etish uchun shart-sharoitlar yaratish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi Qarorlari hamda ushbu sohadagi boshqa me’yoriy-huquqiy hujjatlarda nazarda tutilgan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darada xizmat qiladi.

**Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi.** Ushbu tadqiqot 2030-yilgacha fanni rivojlantirish Konsepsiyasiga muvofiq fan va texnologiyalarni rivojlantirishning ustuvor yo‘nalishlariga, xususan, sun’iy intellektni bosqichma-bosqich rivojlantirish strategiyasini ishlab chiqish konsepsiyasining bandiga muvofiq bajarilgan.

**Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha xorijiy ilmiy-tadqiqotlar sharhi<sup>2</sup>.** Ishlab chiqarish obyektlarining raqamli egizaklari nazariyasini rivojlantirishga yo‘naltirilgan keng qamrovli ilmiy-tadqiqotlar jahonning yetakchi ilmiy markazlari va oliy ta’lim muassasalarida, jumladan Honeywell (AQSH), General Electric (AQSH), Siemens (Germaniya), Schneider Electric, Schlumberger (Fransiya), Massachusetts Institute of Technology (AQSH), Tilburg University (Niderlandiya), Eindhoven University of Technology (Niderlandiya), ANSYS (AQSH), Institute of Science and Technology in Beihang University (Xitoy), National University of Singapore (Singapur), Jiangsu University of Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology (Xitoy), Technical University Munich, Karlsruhe Institute of Technology, Technical University Darmstadt (Germaniya), Imperial College London, The University of Edinburgh (Buyuk Britaniya), The University of Tokyo, Tokyo Institute of Technology (Yaponiya), Seoul National University, Korea Advanced Institute of Science

<sup>2</sup>Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha ilmiy tadqiqotlar sharhi <https://www.honeywell.com/us/en>, <https://www.siemens.com/global/en.html>, <https://www.ge.com/>, <https://www.se.com/ww/en/>, <https://www.slb.com/>, <https://web.mit.edu/>, <https://www.tilburguniversity.edu/>, <https://www.tue.nl/en/>, <https://www.ansys.com/>, <https://ev.buaa.edu.cn/>, <https://nus.edu.sg/>, <https://en.just.edu.cn/>, <https://english.hust.edu.cn/>, <https://www.tum.de/en/>, <https://www.kit.edu/english/>, <https://www.tu-darmstadt.de/index.en.jsp>, <https://www.imperial.ac.uk/>, <https://www.ed.ac.uk/>, <https://www.u-tokyo.ac.jp/en/>, <https://www.titech.ac.jp/english>, <https://en.snu.ac.kr/>, <https://www.kaist.ac.kr/en/>, <https://bmstu.ru/>, <http://www.spiiras.nw.ru/>, <http://www.mipt.ru/>, <https://msu.ru/>, <https://www.polito.it/en>, va boshqa manbalar asosida ishlab chiqilgan.

and Technology (Janubiy Koreya), Bauman nomidagi Moskva davlat texnika universiteti, Sankt-Peterburg informatika va avtomatlashtirish instituti, Lomonosov nomidagi Moskva davlat universiteti, Moskva fizika-texnika instituti (Rossiya Federatsiyasi), Turin politexnika instituti, Toshkent davlat texnika universitida (O'zbekiston Respublikasi) olib borilmoqda.

Dunyoda ishlab chiqarish obyektlari uchun raqamli egizaklar nazariyasini rivojlantirish bo'yicha olib borilgan tadqiqotlar natijasida bir qator natijalarga erishilgan, shu jumladan raqamli egizaklar konsepsiyasining asosiy tushunchalari aniqlangan (Florida texnologiya instituti (AQSH)), dinamik modellashtirish usullari ishlab chiqilgan (Moskva Fizika-texnik instituti, Buyuk Pyotr nomidagi Sankt-Peterburg Politexnika universiteti (Rossiya), Massachusetts Institute of Technology (AQSH), Tilburg University (Niderlandiya), National University of Singapore (Singapur), Jiangsu University of Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology (Xitoy)), virtualizatsiya va buyumlar-internetti platformalari uchun ilmiy va texnik yechimlarni sezilarli darajada yaxshilangan (Cisco, Microsoft (AQSH), Huawei (Xitoy)), alohida sanoat agregatlari va texnologik qurilmalar uchun raqamli egizaklarning ishchi dasturiy-algoritmik komplekslari yaratilgan (Honeywell (AQSH), General Electric (AQSH), ANSYS (AQSH), Siemens (Germaniya), Schneider Electric, Schlumberger (Fransiya) kompaniyalari), ishlab chiqarish obyektlari uchun raqamli egizaklarni yaxshilash uchun qo'llaniladigan sun'iy intellekt algoritmlari ishlab chiqilgan (Google (AQSH), IBM (AQSH), University of Washington (AQSH), Bosch (Germaniya)).

**Muammoning o'r ganilganlik daroji.** Ishlab chiqarish obyektlari uchun raqamli egizaklar nazariyasini tadqiq qilish masalalari bo'yicha qator xorijlik olimlar va muhandislar, jumladan M. Grieves<sup>3</sup>, V.M. Dozorsev<sup>4</sup>, E. Negri<sup>5</sup>, V.B. Tarasov<sup>6</sup>, A.I. Borovkov<sup>7</sup>, P. McLaughlin<sup>8</sup>, A. Rasheed<sup>9</sup>, D. Jones<sup>10</sup>, B.R. Barricelli<sup>11</sup>, J. Vickers<sup>3</sup>, J. Trauer<sup>12</sup>, M. Mortl<sup>12</sup>, S. Schweigert-

<sup>3</sup> Grieves M., Vickers J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems//Transdisciplinary perspectives on complex systems, 2017. Pp. 85-113.

<sup>4</sup> Dozorsev, V.M. Sifrovni v promishlennosti: genezis, sostav, terminologiya, texnologii, platformi, perspektivi. Avtomatizatsiya v promishlennosti, 2020. DOI: 10.25728/avtprom.2020.09.01.

<sup>5</sup> Negr E. et al. A review of the roles of digital twin in cpsbased production systems // Procedia Manufacturing, 2017. 11:939-948.

<sup>6</sup> Tarasov V. B. Strategicheskiy injiniring predpriyatii budushego: massovoye sotrudnichestvo, internet veshey, initsiativa "Industriya 4.0", chto dalshe? / Tarasov V. B. // Injiniring predpriyatii i upravleniye znaniyami (IP&UZ-2016) : sbornik nauchnih trudov XIX nauchno-prakt. konf., 26-27 aprelya 2016 g. / Ros. ekonomicheskiy un-t im. G. V. Plexanova ; nauch. red. Telnov Yu. F. - M., 2016. - S. 57-68.

<sup>7</sup> Borovkov A.I., Nezamayeva O., Bolsunovskaya M., Burlutskaya J. Podderjka prinyatiya resheniy v sotsialnoy sfere na baze sifrovoi modeli. December 2023, The Journal of Social Policy Studies, 21(4):677-692. DOI: 10.17323/727-0634-2023-21-4-677-692.

<sup>8</sup> McLaughlin, P., McAdam, R. The Undiscovered Country: The Future of Industrial Automation. Honeywell International Inc., 2016. – 14 p.

<sup>9</sup> Rasheed A. et al. Digital Twin: Values, Challenges and Enablers from a Modeling Perspective // IEEE Access. 2016. No.4:1-33.

<sup>10</sup> Jones D. et al. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 9.03.2020.

<sup>11</sup> Barricelli B.R. et al. A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications //IEEE Access. 2019. 7:167653-167671.

<sup>12</sup> Trauer, J., Schweigert-Recksiek, S., Gövert, K., Mörtl, M. and Lindemann, U. (2020) "Combining agile approaches and risk management for mechatronic product development – a case study," Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference. Cambridge University, Press, 1, pp. 767–776. doi: <https://doi.org/10.1017/dsd.2020.16>.

Recksiek<sup>12</sup>, D. Evans<sup>13</sup>, K. Jones<sup>14</sup>, C. Romatier<sup>14</sup>, S. Sukaridhoto<sup>15</sup>, H. Wicaksono<sup>15</sup>, A. Gadigi<sup>16</sup>, I.H. Roldan<sup>16</sup>, S. Kerimani<sup>16</sup>, Z. Song<sup>17</sup>, B. Huang<sup>17</sup>, Z. Ge<sup>17</sup> va boshqalar hamda mamlakatimiz olimlari, jumladan raqamli egizaklarni ishlab chiqish va tadqiq qilish sohasida ishlayotgan N.R. Yusupbekov<sup>18</sup>, F.T. Adilov<sup>18</sup>, raqamli egizaklarni yaratish uchun asos bo‘lgan modellashtirish sohasida ishlayotgan X.Z.Igamberdiyev<sup>19</sup>, T.F. Bekmuratov<sup>20</sup>, Sh.M. Gulyamov<sup>21</sup>, M.A. Ismailov<sup>22</sup>, U.F. Mamirov<sup>19</sup> va boshqalar o‘zlarining ulkan hissalarini qo‘sishgan.

Yuqorida tilga olingan olimlar tomonidan raqamli egizaklarni yaratish va amalga oshirishning fundamental asoslarini rivojlantirish va modellashtirish metodologiyasi, shuningdek, sun’iy intellekt algoritmlarini sanoat ilovalarida qo‘llash bo‘yicha tadqiqotlar o‘tkazilgan.

Umuman olganda, neft-gaz sohasida, xususan, O‘zbekiston Respublikasida sanoat korxonalarini raqamlashtirish darajasi hali ham yetarli darajada yuqori emas, shuning uchun xorijiy ilmiy tadqiqotlar jarayonida ishlab chiqilgan bir qator texnika va tushunchalardan foydalanish allaqachon katta natija beradi va faol foydalanishda yanada katta natijalar berish imkoniyati mavjud.

**Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta’lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog‘liqligi.** Dissertatsiya Toshkent davlat texnika universitetining A-5-42 – “Aprior noaniqlik sharoitida texnologik obyektlarni avtomatlashtirilgan monitoringi va boshqarishni intellektuallashtirishning dasturiy instrumental vositasi” (2015-2017); F-4-56 – “Noaniq-ko‘plik nisbatlari asosida murakkab texnologik obyektlarni intellektual boshqarish tizimlarini strukturaviy-parametrik sintezlash usullari va nazariy asoslarini ishlab chiqish” (2016-2020) ilmiy tadqiqot loyihalari doirasida bajarilgan.

---

<sup>13</sup> Evans, D. The Internet of Things. How the Next Evolution of the Internet Is Changing everything, Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG), 2011, 11 p.

<sup>14</sup> Jones, K., Romatier, C. Leveraging the Cloud to Drive Complex-wide Profitability. Honeywell UOP, 25 East Algonquin Rd, Des Plaines, IL 60016 (2017).

<sup>15</sup> Falah, M., Sukaridhoto, S., Rasyid, M., Wicaksono, H.: Design of Virtual Engineering and Digital Twin Platform as Implementation of Cyber-Physical Systems. In: Procedia Manufacturing 52, 5th International Conference on System-Integrated Intelligence, pp. 331-336. Published by Elsevier B.V. (2020). DOI: 10.1016/j.promfg.2020.11.055.

<sup>16</sup> Gadigi, A., Roldan, I.H., Kerimani, S. Brain of the Digital Twin - Reduced Order Modelling (ROM) Landscape and Potential Applications. Honeywell Technology Solutions, 2023.

<sup>17</sup> Zhiqiang Ge, Zhihuan Song, Steven X. Ding, and Biao Huang. Obrabotka bolshix obyemov dannix i analitika v promishlennosti: Rol mashinnogo obucheniya” IEEE Access 2017.

<sup>18</sup> Yusupbekov, N.R., Adilov F.T., Dozorsev V.M. Kvalifitsirovannoye kompyuternoye obucheniye imitatsionnomu modelirovaniyu i upravleniyu tipovimi texnologicheskimi ob’yektami. Uchebnik dlya prakticheskix zanyatiy po teme «Texnologicheskiye protsessi i avtomatizatsiya proizvodstva», 2016.

<sup>19</sup> Igamberdiev H.Z., Mamirov U.F. Formalization of the procedure for choosing the optimality criterion and setting the problem of ammonium nitrate production control // Chemical Technology, Control and Management: Vol. 2021: Iss. 4(100). -PP. 40-49.

<sup>20</sup> Bekmuratov, T.F., Malikov M.N., Eshmuratov U.A. Metod prinyatiya resheniya s pomoshhyu nechetkix mnojestv v texnicheskix ekspertnix sistemax // Tezis dokladov mejdunarodnoy konferensii «Intellektualizatsiya sistem upravleniya i obrabotka informatsii». Tashkent, 1994.

<sup>21</sup> Yusupbekov, N., Gulyamov, Sh., Usmanova, N. The Challenge of Adaptation in Future Networking Environment: Engineering Methodology. In book: 14th International Conference on Theory and Application of Fuzzy Systems and Soft Computing – ICAFS-2020. DOI: 10.1007/978-3-030-64058-3\_101.

<sup>22</sup> Ismailov, M., Kasimov, F. “Model for calculating the static characteristics of hydraulic systems of hydro technical buildings / Abstracts of the International scientific and practical conference “Actual problems of mathematical modelling and information technology”, Vol. 2, May 2-3, pp. 242-244.

**Tadqiqotning maqsadi** neft-kimyo sanoatining har qanday obyektida murakkab texnologik ishlab chiqarish sxemasi bilan foydalanish uchun yetarli darajada universal bo‘lgan birlashtirilgan integratsiyalashgan raqamli egizakning konseptual arxitekturasini ishlab chiqish va o‘rganish, shu bilan birga amalga oshirishning kafolatlangan yillik texnik-iqtisodiy samarasini ta’minlash.

**Tadqiqotning vazifalari:**

murakkab texnologik sxemaga ega bo‘lgan ishlab chiqarish obyekti uchun raqamli egizakning tuzilishini o‘rganish, strukturani proyeksiyalarga ajratish, yakka raqamli egizakning yakuniy konsepsiysi samaradorligiga individual proyeksiyalarning ahamiyati va ta’sirini tahlil qilish;

raqamli egizaklarning samaradorligini oshirish maqsadida ishlab chiqarish obyektlari uchun raqamli egizaklar tuzilishiga integratsiya shaklida tadqiqot va foydalanish uchun kelajakda qo‘llaniladigan va taklif qilinadigan sun’iy intellekt usullari va algoritmlari haqida umumiylar ma’lumot berish;

murakkab texnologik sxemaga ega ishlab chiqarish obyekti uchun birlashtirilgan integratsiyalashgan raqamli egizakning standart konseptual arxitekturasini ishlab chiqish;

konseptual arxitekturaga muvofiq yaratilgan raqamli egizakning individual proyeksiyalarini ishlab chiqish va tadqiq qilish;

turli xil raqamli egizak proyeksiyalarning ma’lumotlar bazasini boshqarish tizimlari (MBBT) o‘rtasidagi dasturiy interfeyslar va interfeyslarni ishlab chiqish va amalga oshirish, raqamli egizak proyeksiyalar va real vaqtida ma’lumotlar bazasini boshqarish tizimi (MBBT) o‘rtasida onlayn ma’lumotlar almashish interfeyslarini ishlab chiqish va amalga oshirish;

murakkab texnologik sxemaga ega ishlab chiqarish ob’yektining fizik prototipi sifatida tanlangan ishlab chiqarish aktivlarining barcha asosiy toifalari va barcha asosiy texnologik jarayonlarning modellarini ishlab chiqish va sinovdan o‘tkazish;

birlashtirilgan raqamli egizakka integratsiyalangan individual sun’iy intellekt usullari va algoritmlarini ishlab chiqish, tadqiq qilish va sinovdan o‘tkazish.

**Tadqiqotning obyekti** sifatida ishlab sifatida chiqarishning murakkab texnologik sxemasi va u uchun ishlab chiqilgan birlashtirilgan integratsiyalashgan virtual raqamli egizakka ega bo‘lgan ishlab chiqarish obyektining fizik prototipining simbiozi olingan.

**Tadqiqotning predmetini** birlashtirilgan raqamli egizakning proyeksiyalarini tashkil etuvchi modellar orasidagi modellar va interfeyslarni (ulanishlarni) yaratish va optimallashtirish uchun tushunchalar, usullar va yechimlar, shuningdek, birlashtirilgan integratsiyalashgan raqamli egizakning fizik prototip obyekti bilan o‘zaro ta’siri mexanizmlarini yaratish va optimallashtirish bo‘yicha tushunchalar, usullar va yechimlar tashkil etadi.

**Tadqiqotning usullari.** Dissertatsiya ishida tizimli yondashuv, obyektni avtomatlashtirish va raqamlashtirish uchun standart yechimlarni tahlil qilish

va tasniflash usullari, matematik modellashtirish, avtomatik boshqarish nazariyasi usullari, hisoblash tajribalari, tizimli dasturlash usullari qo'llaniladi.

### **Tadqiqotning ilmiy yangiligi** quyidagilardan iborat:

murakkab texnologik ishlab chiqarish sxemasiga ega ishlab chiqarish obyekti uchun yagona integratsiyalashgan raqamli egizakning tipik konseptual arxitekturasi ishlab chiqilgan;

tanlangan ishlab chiqarish aktivlarining texnologik jarayonlari va barcha asosiy toifalari modellarining to'liq kutubxonasi ishlab chiqilgan bo'lib, uning asosida obyekt samaradorligini oshirishni ta'minlovchi ko'p vazifali yagona integrallashgan raqamli egizak yaratilgan;

integrallashgan raqamli egizakning yaxlitligi va uning real vaqt bo'yicha samarali ishlashini ta'minlovchi yagona raqamli egizakning asosiy proeksiyalari: ishlab chiqarish obyektining texnologik jarayonlarini simulyatsiyalash va optimallashtirish proyeksiyasi, aktivlarning unumdarligini boshqarish proyeksiyasi, texnologik jarayonlarni boshqarish tizimining onlayn kloni proeksiyasi, texnologik jarayonlarni takomillashgan boshqarish va ishlab chiqarishni optimallashtirish proeksiyalari o'rtaсидаги о'заро aloqalarning strukturasi ishlab chiqilgan;

real vaqt rejimida ma'lumotlarni arxivlash va almashish tizimining bir nechta mexanizmlari asosida eng ishonchli ma'lumotlar manbasini ko'rsatadigan texnologik jarayonni boshqarishni qo'llab-quvvatlash uchun maxsus funksiya ishlab chiqilgan;

birinchi marta Fisher-Tropsh sintez reaktorining to'liq raqamli egizak modeli va unga mos keladigan Fisher-Tropsh usuli bo'yicha sintetik suyuq yoqilg'i ishlab chiqarish jarayonini simulyatsiyalashning raqamli egizagini modeli ishlab chiqilgan;

raqamli egizak proyeksiyalarini yanada takomillashtirish uchun sun'iy intellektning istiqbolli usullari va algoritmlari to'plami aniqlangan.

### **Tadqiqotning amaliy natijalari** quyidagilardan iborat:

murakkab texnologik sxema (UzGTL ishlab chiqarish kompleksi) bilan tanlangan ishlab chiqarish obyekti uchun raqamli egizakning ishlab chiqilgan konseptual arxitekturasi doirasida raqamli egizakning alohida proeksiyalari ishlab chiqilgan va joriy etilgan, raqamli egizaklarning turli proyeksiyalarining ma'lumotlar bazasini boshqarish tizimlari o'rtaсидада dasturiy interfeyslar va interfeyslar ishlab chiqilgan va joriy etilgan, raqamli proyeksiyalar o'rtaсидада onlayn ma'lumot almashish mexanizmlari va interfeyslari, ma'lumotlar bazasini boshqarish tizimlari real vaqtda boshqarish tizimi (MBBT RVBT), shuningdek, to'g'ridan to'g'ri UzGTL kompleksining avtomatik boshqarish tizimi ishlab chiqilgan va amalgalashirilgan;

alohida sun'iy intellekt usullari va algoritmlari (xususan, kengaytirgan APR naqshlarini aniqlash algoritmi) qo'llanilgan va raqamli egizak proyeksiyalarga kiritilgan;

ishlab chiqilgan va joriy qilingan raqamli egizak sinovdan o'tkazilgan va UzGTL kompleksining ishlab chiqarish jarayonlariga o'zgartirishlar kiritishni talab qiladigan bir nechta optimallashtirish ssenariylari ishlab chiqilgan, bu o'zgarishlardan kafolatlangan yakuniy iqtisodiy samara bilan, tegishli hisob-kitoblar bilan tasdiqlangan.

**Tadqiqot natijalarining ishonchliligi** ishlab chiqilgan raqamli egizakni ma'lum bir ishlab chiqarish korxonasida qo'llanilishi, natijalarning ishonchliligi zamonaviy usul va vositalar yordamida amalga oshirilgan nazariy va eksperimental tadqiqotlar natijalarining izchilligi, shuningdek, tajriba sinovlarining ijobiy natijalari bilan asoslanadi.

**Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.** Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati shundaki, u murakkab texnologik ishlab chiqarish sxemasiga ega bo'lgan ishlab chiqarish obyekti uchun birlashtirilgan integratsiyalashgan raqamli egizakning foydalanishga tayyor konseptual arxitekturasini, shu bilan birga o'zini doimiy ravishda takomillashtirish qobiliyatiga ega va yangi ilmiy metodlarni qo'llash orqali takomillashtirishga yetarlicha ochiq va sun'iy intellekt algoritmlarini ifodalaydi.

Ish natijalarining amaliy ahamiyatini korxonaning rejadan tashqari ishlamay qolish kunlarini qisqartirish va kerakli maqsadli mahsulot ishlab chiqarishni ko'paytirish shaklida iqtisodiy samarani beradigan birlashtirilgan integratsiyalashgan raqamli egizakning ishlab chiqilgan, joriy qilingan va sinovdan o'tgan dasturiy-apparat yechimi ifodalaydi.

**Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi.** Ishlab chiqarish obyektlarining raqamli egizaklari nazariyasini rivojlanish bo'yicha olingan ilmiy natijalar quyidagi shakllarda joriy etildi:

yagona integrallashgan raqamli egizakning strukturasi, raqamli egizaklarning proyeksiyalari hamda PHD dasturiy-apparatli platformasi asosida amalga oshirilgan real vaqt rejimida ma'lumotlar bazasini boshqarish tizimi (RVR MBBT) o'rtaida onlayn rejimda ma'lumotlar almashinuvining interfeyslari va mexanizmlari "UzGTL" MChJda joriy qilingan ("O'zbekneftgaz" AJning 2024-yil 13-avgustdaggi 03-18-8-714-son ma'lumotnomasi). Natijada texnologik jarayon to'g'risidagi ma'lumotlarni tahlil qilish uchun sarflanadigan vaqt ni kamaytirishga imkon bergen;

sun'iy intellektning integrallashgan algoritmlaridan foydalangan holda ishlab chiqilgan modellar va ular asosida texnologik jarayonlarni simulyatsiyalash va aktivlarning unumdoorligini boshqarishning raqamli egizaklari proyeksiyalari "UzGTL" MChJ da joriy etilgan ("O'zbekneftgaz" AJning 2024-yil 13-avgustdaggi 03-18-8-714-son ma'lumotnomasi). Natijada texnologik rejimning o'zgarishi haqida boshqaruva qarorlarini qabul qilish uchun sarflanadigan vaqt ni kamaytirish imkonini bergen;

barcha ishlab chiqilgan raqamli egizaklar sinovdan o'tkazilgan va UzGTL majmuasining ishlab chiqarish jarayonlariga o'zgartirishlar kiritishni talab qiladigan bir nechta optimallashtirish senariylari ishlab chiqilgan ("O'zbekneftgaz" AJning 2024-yil 13-avgustdaggi 03-18-8-714-son

ma'lumotnomasi). Natijada maqsadli mahsulotlar ishlab chiqariш 2-3 % ga oshgan va zavodning rejadan tashqari ishlamay qolish vaqtin kamaygan.

**Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi.** Tadqiqotning nazariy va amaliy natijalari 4 ta xalqaro va 2 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida ma'ruza qilingan va muhokamadan o'tkazilgan.

**Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi.** Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 23 ta ilmiy ish, shu jumladan O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan doktorlik dissertatsiyalarining asosiy ilmiy natijalarini nashr etish uchun tavsiya etilgan jurnal nashrlarida 14 ta maqola (11 ta xorijiy va 3 ta respublika jurnallarida), shuningdek 3 ta EHM uchun ishlab chiqilgan dasturiy vositalarni qayd qilish guvohnomalari olingan.

**Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi.** Dissertatsiya kirish, beshta bob, xulosa, foydalanimagan adabiyotlar ro'yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiya hajmi 200 betni tashkil etadi.

## **DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI**

**Kirish** qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurdagi asoslamagan, maqsadi va vazifalari shakllantirilgan, tadqiqot ob'yekti va predmeti aniqlangan, tadqiqotning O'zbekiston Respublikasi fan va texnika taraqqiyotining ustuvor yo'naliishlariga muvofiqligi aniqlangan, ilmiy yangilik va amaliy natijalar aniqlangan, tadqiqot bayon qilingan, natjalarning ishonchliligi tasdiqlangan, natjalarning ilmiy va amaliy ahamiyati yechib berilgan, tadqiqot natijalarini amalga oshirish ro'yxati keltirilgan, ish natijalarining aprobatsiyasi ro'yxati, nashr etilgan ishlar va dissertatsiyaning tuzilishi to'g'risidagi ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning "**Sanoat avtomatlashtirish tizimlarida raqamli egizaklarni yaratish nazariyasi va amaliyotining hozirgi holatini tahlil qilish**" deb nomlangan birinchi bobida raqamli egizaklarni qurish uchun infratuzilmaning asosiy asoslarini IoT va Sanoat 4.0 tushunchalariga ta'riflar taqdim etilgan, so'ngra sanoat avtomatlashtirish tizimlarining klassik va zamonaviy arxitekturalarini qiyosiy tahlil qilib, Perdyu modeliga e'tibor qaratilgan, bu yangi turdag'i mahsulotlarni ochadi, raqamlashtirish imkoniyatlari, raqamli egizaklar nazariyasining umumiyligi tushunchalari berilgan, turli xil dasturiy ta'minot va algoritmik komplekslarni to'g'ridan-to'g'ri tahlil qilish raqamli egizaklar, shuningdek ularni birlashtirish uchun platformalar berilgan, sanoat avtomatlashtirish tizimlarida raqamli egizaklarni yaratish nazariyasi va amaliyotining hozirgi holati haqida umumiyligi fikr keltirilgan.

Belgilangan vazifalarga qarab va ushbu bosqichda korxonaning mavjud ishlab chiqarish va tashkiliy infratuzilmasiga asoslanib, raqamli egizak individual texnologik jarayonlar oqimini simulyatsiya qiladigan zavodning oddiy matematik modeli bo'lishi mumkin, masalan, yangi texnologik rejimlarni xavfsiz sinovdan o'tkazish uchun yoki matematik modellar

to‘plami turli burchak va proyeksiyalarda ishlab chiqarish obyektining ishlashini tavsiflovchi modellar, haqiqiy ishlab chiqarish ob’yektida tavsiya etilgan nazorat harakatlarini bir zumda o‘zaro bog‘lash uchun ishlab chiqarish obyektining o‘zi va bulutga asoslangan bashoratli tahlil xizmatlari bilan doimiy real vaqtida o‘zaro aloqada bo‘lish.

Analitik bulut - bu o‘z obyektining ishlash tajribasini dunyodagi boshqa shunga o‘xhash obyektlarning ishlashiga o‘xhash tajriba bilan bir zumda taqqoslash qobiliyatiga ega bo‘lgan xalqaro axborot makoniga integratsiya. Bu ishlab chiquvchilar va yetkazib beruvchilarning ekspert fikriga doimiy kirish uchun noyob imkoniyat bo‘lib, ishlab chiqarishdagi har qanday muammolarni eng qisqa vaqt ichida hal qilishga imkon beradi. Va nihoyat, bu sayyoradagi ko‘plab ishlab chiqarish obyektlarining ma’lumotlarini real vaqt rejimida to‘playdigan hamda tahlil qiladigan va korxonaning biznes jarayonlarining asosiy ishlash ko‘rsatkichlarini (KPI) yaxshilash uchun maqbul yechimni ishlab chiqadigan ulkan analitik qurilma.

Shunday qilib, analitik bulut quyidagi tashqi tavsiyalarga doimiy kirish imkoniyatini beradi:

- korxonaning texnologik jarayonlarini ekspertlari - ishlab chiquvchilari va litsenziarlari;
- korxonaning barcha biznes jarayonlarining ishlashini kuzatuvchi ekspert-tahlilchilar. Bu foydalanuvchilarga qimmat va uzoq davom etadigan katta ma’lumotlarni tahlil qilish loyihibariga aralashmasdan o‘z ma’lumotlaridan ko‘proq qiymat olish va ekspertlar uchun g‘ayritabiyy naqshlarni aniqlash va ularni avtomatik kuzatishni oson o‘rnatish imkonini beradi;

- texnologik uskunalarni yetkazib beruvchilar-ishlab chiqaruvchilar, shu bilan ma’lum bir ishlab chiqarishning o‘ziga xos sharoitlarida ishlaydigan va turli xil obyektlardagi uskunalarning ishlashini taqqoslash, foydalanuvchilarga uskunaning yanada samarali ishlashi bo‘yicha tavsiyalar berish, uskunaning ishlashi va ishslash muddatini yaxshilash imkoniyatiga ega bo‘lgan ushbu uskunaning o‘ziga xos birliklari to‘g‘risida ma’lumot olishadi. Natijada, ishlab chiqarish obyektni boshqarish uskunaning ko‘proq ish soatlarini va kamroq ishlamay turish soatlarini oladi, operatsion xarajatlarni kamaytiradi, uskunani almashtirish va ehtiyoj qismlardan foydalanish xarajatlarini kamaytiradi.

Fizik obyekt uchun raqamli egizakning asosiy proyeksiyalarini modellashtirish va yaratishning asosiy mexanizmlaridan biri - bu dinamik modellashtirishdir. Muammo turli senariylarda murakkab yuqori texnologiyali jarayonlar oqimini simulyatsiya qiladigan universal matematik modellarni yaratish orqali hal qilinadi. Bunday modellashtirish xodimlarning harakatlari uchun aniq algoritmni va turli vaziyatlarda qo‘llaniladigan avtomatlashtirilgan tizimni ishlab chiqishga imkon beradi va shu bilan vaziyatni vaziyatni kutilayotgan, ya’ni bashorat qilinadigan holatga aylantiradi. Boshqa tomondan, har bir aniq texnologik jarayonning murakkabligi va o‘ziga xosligi har bir litsenziyalangan texnologik jarayon

uchun alohida modellarni va katta quvvatli sanoat qurilmalarini o‘z ichiga olgan murakkab texnologik jarayonning to‘liq huquqli egizagini yaratish matematik model va unga qo‘shilgan dasturiy ta’minot tarmog‘ini yaratishni o‘z ichiga olgan aql bovar qilmaydigan murakkablik darajasidagi «bulut»ni infratuzilma ishlab chiqishni talab qildi.

Raqamli egizaklarni yaratish nazariyasi va amaliyotining hozirgi holatini tahlil qilishning yuqoridagi natijalari sun’iy intellekt texnologiyalaridan foydalangan holda qurilgan sanoat obyektlari uchun birlashtirilgan integratsiyalashgan raqamli egizaklarni ishlab chiqish va tadqiq qilishga bag‘ishlangan ushbu dissertatsiya ishining maqsadini shakllantirishga olib keldi.

Dissertatsiyaning **“Boshqarish qarorlarini qabul qilish uchun raqamli egizakni takomillashtirish”** deb nomlangan ikkinchi bob raqamli egizakni takomillashtirish strategiyasiga bag‘ishlangan bo‘lib, u yirik ishlab chiqarish obyektlari uchun yaxlit ko‘p proyeksiyali raqamli egizakni yaratish uchun yagona kompleks yondashuvni ishlab chiqishdan iborat. Ushbu vazifani bajarish uchun raqamli egizak ishlab chiqarish ob‘yektining texnologik jarayonlarini simulyatsiya qilish va optimallashtirish proyeksiyasiga, aktivlarning ishlashini boshqarish proyeksiyasiga, jarayonlarni boshqarish tizimining onlayn klonining proyeksiyasiga, ilg‘or jarayonlarni boshqarish proyeksiyasiga va umuman ishlab chiqarishni ajratib olingan. Sanoat obyektining raqamli egizaklarining turli proyeksiyalari o‘rtasidagi munosabatlarning tuzilishi ko‘rib chiqillagan va bir nechta modellarni birlashgan yuqori darajadagi raqamli egizak tizimga integratsiyalash uchun barcha interfeyslar aniqlangan.

Ushbu dissertatsiya natijalarini joriy qilish uchun asos bo‘lgan ishlab chiqarish obyektining texnologik jarayonlarini simulyatsiya qilish va optimallashtirishning raqamli egizaklarining proyeksiyasi yanada kontekstualizatsiya va sozlashning aniqligi, yangilangan daromad koeffitsiyentini doimiy ravishda almashtirish orqali joriy va sozlangan model o‘rtasidagi farqni tekislash orqali yaxshilandi va chiziqli dasturlash vektori, turli xil foydalanish holatlari uchun turli xil rejimlarni diversifikatsiya qilish, ma’lumotlarni tozalash protseduralarini takomillashtirish, moslashtirish, statsionar holat va qo‘pol xatolarni aniqlash, sun’iy intellekt va mashinali o‘qitishning takomillashtirilgan usullari va algoritmlarini ulash va joylashtirish (BYOAL, BYOML). Ushbu loyihani ishlab chiqishda sun’iy intellektning quyidagi usullari tadqiq qilingan va qisman qo‘llanilgan:

1) Genetik algoritmlar (Genetic Algorithms). Genetik algoritmlar parametrler fazosida optimal yechimlarni topish uchun tabiiy tanlanish va genetika tushunchalaridan foydalanadi. Dissertatsiya ishida ulardan modellashtirilayotgan ishlab chiqarish uskunalari parametrlerini va texnologik jarayon grafigini optimallashtirishda foydalanilgan;

2) Chumolilar algoritmi (Ant Colony Optimization). Chumolilar algoritmlari optimal yo‘lni izlashda chumolilarning xatti-harakatlarini modellashtiradi va marshrutlash hamda optimallashtirish masalalarini

yechishda qo'llaniladi. Bizning ishimizda texnologik jarayonlar oqimini optimallashtirishda qo'llanilgan;

3) Qizdirish simulyatsiyasi (Simulated Annealing) algoritmlari asosida optimallashtirish usullari. Qizdirish simulyatsiyasi murakkab parametrlar fazosida global optimumni topish uchun ishlataladi. Ishda ishlab chiqarish jarayonlari parametrlarini optimallashtirish va ishlab chiqarishni rejalahtirish bilan aloqalarni qurish uchun ham foydalanilgan;

4) Zarralar algoritmi asosida optimallashtirish usuli (Particle Swarm Optimization, PSO). PSO optimal yechimni topish maqsadida parametrlar fazosida zarrachalar to'dasining harakatini modellashtiradi. Ishda ishlab chiqarish jarayonlarida resurslar taqsimotini optimallashtirish uchun foydalanilgan;

5) Mashinali o'qitish va mustahkamlash bilan o'qitish usullari. Ishlab chiqarish tizimlarida boshqarish parametrlarini optimallashtirish uchun Q-o'qitish va mustahkamlash bilan o'qitish kabi mashinali o'qitish usullaridan foydalanish mumkin. Raqamli egizak simulyatorini takomillashtirishning asosiy usullaridan biri, ishda uning unumdorligini maksimal darajada oshirish uchun uskunani adaptiv boshqarishni simulyatsiya qilish uchun ishlataligan;

6) Genetik dasturlash (Genetic Programming). Bu evolyutsion optimallashtirish usuli bo'lib, murakkab masalalar fazolarida optimal yechimlarni ifodalovchi dasturiy tuzilmalarni izlash uchun qo'llaniladi. Ishda ishlab chiqarish tizimi uchun optimal nazorat algoritmlarini avtomatik ravishda yaratishda foydalanilgan;

7) Klaster tahlili. Klaster tahlil algoritmlari ma'lumotlarni o'xhash xususiyatlar bo'yicha guruhash imkonini beradi, bu esa ishlab chiqarish jarayonlarida qonuniyatlarni aniqlash uchun foydali bo'lishi mumkin. Ishda turlarni ajratish va optimal parametrlarini aniqlash uchun ishlab chiqarish sikllari to'g'risidagi ma'lumotlarni guruhash uchun foydalanildi;

8) Neyron tarmoqlari. Ma'lumotlardagi murakkab bog'lanishlarni modellashtirish va ishlab chiqarish jarayonlari parametrlarini optimallashtirish uchun chuqur neyron tarmoqlaridan foydalanish mumkin. Ishda texnologik siklning o'tish vaqtini bashorat qilish va texnologik jarayonni bajarish davomida energiya sarfini boshqarish uchun qisman foydalanilgan;

9) Gradiyent pasayishi (Gradient Descent). Gradiyent pasayishi funksiyalarni minimallashtirish uchun ishlataladi. U ixtiyoriy qiymatdan boshlanadi va lokal minimumga erishish uchun funksiya gradiyentiga qarama-qarshi yo'nalishda iterativ harakatlanadi. Tadqiqotda texnologik jarayonlarda parametrlarni sozlash, texnologik jarayonning sarflanishi va vaqtini minimallashtirish uchun qo'llanilgan;

10) Chiziqli dasturlash (Linear Programming, LP). LP chiziqli cheklolvar bilan optimallashtirish masalalarini yechadi. Algoritm chiziqli cheklolvar tizimiga rioya qilgan holda bir nechta o'zgaruvchilarning chiziqli funksiyasini maksimallashtirishga yoki minimallashtirishga intiladi;

11) Kvadratik dasturlash (Quadratic Programming, QP). QP chiziqli dasturlashning kengaytmasi bo‘lib, kvadratik atamalarni maqsadli funksiyaga kiritadi. QP masalalar chiziqli chegaralangan kvadratik funksiyani minimallashtirish (yoki maksimallashtirish) uchun yechiladi;

12) Butun sonli dasturlash (Integer Programming, IP). IP butun sonli o‘zgaruvchilarga cheklovlar bilan optimallashtirish masalalarini hal qiladi. Bu o‘zgaruvchilar diskret yechimlarni ifodalaganda qo‘llaniladi.

Aktivlar samaradorligini boshqarishning raqamli egizaklining proyeksiyasi ishlab chiqarish aktivlari kutubxonasiga asoslangan bo‘lib, u aktivlarni modellashtirishning uchta muhim toifasini ma’lum aktivlar uchun shablonlarga birlashtiradi – ishlash modellar, analitik modellar va ishlash va nosozlik modellar (sog‘liqni saqlash modellar). Ushbu proyeksiyani takomillashtirish mashinali o‘qitishning asosiy usullaridan biri bo‘lgan ilg‘or naqshni aniqlash (RRO yoki APR) texnikasi yordamida amalga oshiriladi, uning asosida ma’lumotlardagi murakkab patternlarni tahlil qilish va tanib olish yotadi. Ushbu usul texnologik jarayonlar va uskunalarini optimallashtirish uchun ishlatilishi mumkin bo‘lgan ichki bog‘liqliklar va tendensiyalarni aniqlash imkonini beradi.

APM raqamli egizagini loyihalashni takomillashtirishda qo‘llaniladigan Advanced Pattern Recognition usulining afzalliklari:

- Yuqori moslashuvchanlik: Advanced Pattern Recognition ma’lumotlar va ishlab chiqarish sharoitlaridagi o‘zgarishlarga moslashadi, bu esa uni dinamik muhitlar uchun samarali vositaga aylantiradi;

- Yashirin bog‘liqlikni aniqlash: Patternlarni aniqlash algoritmlari ma’lumotlarni oddiy tahlil qilishda har doim ham aniq bo‘lmagan turli o‘zgaruvchilar o‘rtasidagi murakkab bog‘liqlikni aniqlashi mumkin;

- Ishlab chiqarishni optimallashtirish: Patternlarni aniqlash ishlab chiqarish jarayonlariga ta’sir qiluvchi asosiy omillarni ajratib olish va ushbu ma’lumotlardan ishlab chiqarishni optimallashtirish uchun foydalanish imkonini beradi;

- Qaror qabul qilishni avtomatlashtirish: Advanced Pattern Recognition natijalari ishlab chiqarishni boshqarish tizimlarida real vaqt rejimida boshqarish qarorlarini qabul qilishni avtomatlashtirish uchun bevosita asos bo‘lib xizmat qiladi.

Texnologik jarayonlarni avtomatlashtirish boshqaruv tizimi (TJABT) onlayn klonining proyeksiyasi virtualizatsiya texnologiyalari sohasidagi zamonaviy ishlanmalar va yutuqlar asosida yaratilgan va raqamli egizakning haqiqiy bosh tizimidan to‘liq mustaqilligini ta’minlaydi. Uning funksiyalari anomaliyalarni aniqlash, o‘zgarishlarni avtomatlashtirilgan boshqarish, konfiguratsiyaga muvofiqligini tekshirishni o‘z ichiga oladi. Loyihalashtirish sohasida bu joyida takomillashtirishga bo‘lgan ehtiyojni bartaraf etishga, ishlash sifatini ta’minlashga, tizim hujjatlarini yangilashni soddalashtirishga va boshqa tizimdagи o‘zgarishlarning tarixiy ko‘rinishini taqdim etishga yordam beradi. Loyihani amalga oshirish va sinovga kelsak, u resurslarni rejalashtirish va taqsimlashni markazlashtiradi va loyihaning ko‘rinishini

ta'minlaydi, hamkorlikni yaxshilaydi, sayohat xarajatlari va vaqtini kamaytirishga yordam beradi, xavflarni kamaytiradi va batafsil loyiha spetsifikatsiyalariga muvofiqligini ta'minlaydi.

Bundan tashqari, u an'anaviy laboratoriya tizimlarining ikkita asosiy kamchiligini joyida bartaraf etadi: ularning joriy tizim sozlamalaridan chetga chiqishga moyilligi va ularning kichik tizimlar uchun amaliy emasligi. Ammo bu bunday tizimlarda mavjud bo'lgan kirish va xavfsizlik bo'yicha asosiy ziddiyatni ham bartaraf etadi.

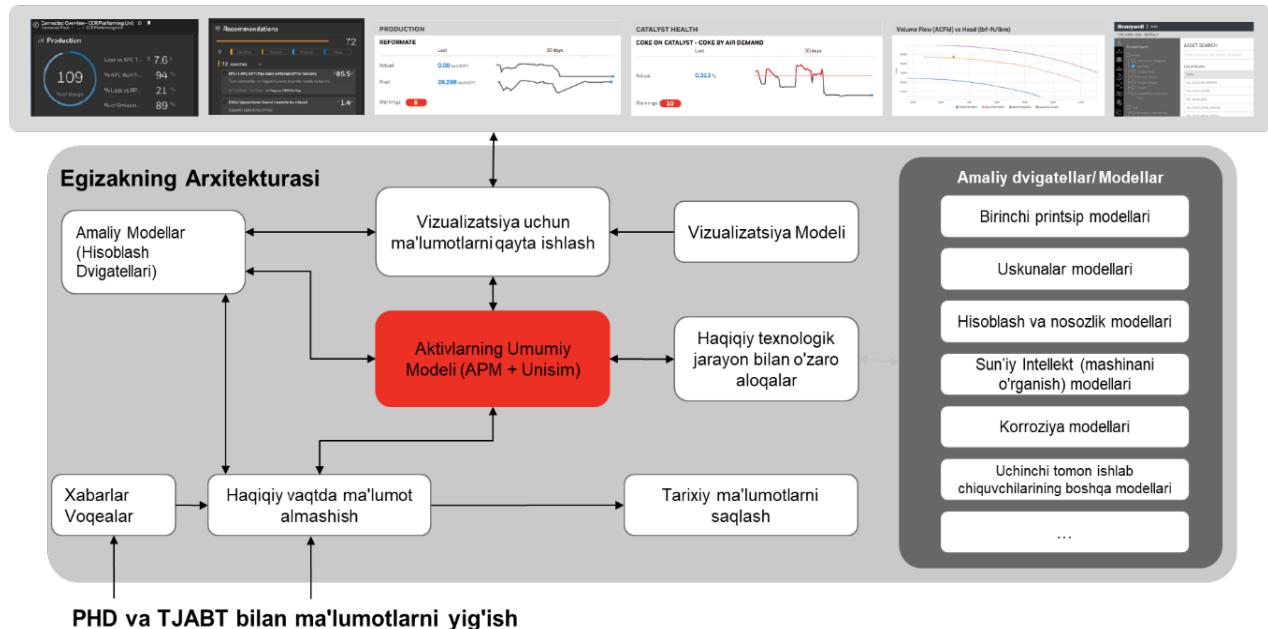
TJABTning onlayn kloni dastlab qo'yilgan vazifalar va maqsadli ko'rsatkichlarga javob beradi, ularni ishlab turgan sanoat TJBTLari uchun raqamlı egizaklar texnologiyasini joriy etishning xulosalari va qo'shimcha afzalliklari sifatida umumlashtirish mumkin.

Takomillashgan jarayonlarni boshqarish (TJB) va umuman ishlab chiqarishni optimallashtirish proyeksiyasi yuqori darajadagi optimallashtirishni ta'minlaydi, bu rentabellik modellarini hisobga olgan holda sanoat korxonasini kengroq qamrab olishni o'z ichiga oladi va rejalashtirish va boshqarish o'rtasidagi farqni yo'qotadi. Muvofiglashtiruvchi optimallashtiruvchi barqaror foydalarning dastlabki matriksasini olish uchun oldindan mavjud bo'lgan rentabellikni rejalashtirish modelidan foydalanadi va ob'yeqtning tarixiy operatsion ma'lumotlari asosida modelning tegishli dinamikasini belgilaydi. U mahsulot zaxiralarini, ishlab chiqarish faoliyatini va mahsulot sifatini nazorat qiladi. Xuddi shu rejalashtirish modeli tuzilishi va iqtisodiyotiga ega o'rnatilgan iqtisodiy optimallashtiruvchi oflays rejalashtirishni optimallashtirishni onlayn va real vaqtida takrorlaydi.

Dissertatsiyaning "**Ishlab chiqarish obyektining raqamlı egizak proyeksiyalarini ishlab chiqish va tadqiq qilish**" deb nomlangan uchinchi bobida ma'lum bir ishlab chiqarish obyekti - UzGTL sintetik suyuq yoqilg'i ishlab chiqarish majmuasi (O'zbekiston Respublikasi, Qashqadaryo viloyati, Sho'rtan sh.) uchun birlashtirilgan integratsiyalashgan raqamlı egizak proyeksiyalarini ishlab chiqish va tadqiq qilish natijalari keltirilgan.

UzGTL (Uzbekistan Gas-to-Liquid) ishlab chiqarish majmuasi murakkab texnologik ishlab chiqarish sxemasiga ega bo'lib, unga ko'ra tabiiy gaz ketma-ket kimyoviy reaksiyalar natijasida uglevodorodlarning sintetik suyuq aralashmasiga aylanadi va undan yuqori toza yoqilg'i mahsulotlari olinadi. Jarayonning texnologik sxemasiga avtotermik islohot, Fisher-Tropsh sintezi va uglevodorodlarning suyuq aralashmasini gidrokreking / gidrotozalash kiradi. Suyultirilgan uglevodorod gazini (SUG) qo'shimcha qazib olish ham texnologik siklga kiritilgan.

## Shaxsiylashtirilgan raqamli egizak vizualizatsiya ekranlari



1-rasm. UzGTL ishlab chiqarish majmuasining raqamli egizaklarining konseptual arxitekturasi.

Bugungi kunda zamonaviy sanoatda ma'lum bo'lgan eng keng ishlab chiqarish aktivlaridan tashkil topgan UzGTL ishlab chiqarish majmuasining murakkab texnologik sxemasi muallifni ushbu ishlab chiqarish obyektini dissertatsiya tadqiqotlari va raqamli egizak konsepsiyasini ishlab chiqish obyekti sifatida tanlashiga olib keldi, keyinchalik uni ushbu sohadagi deyarli har qanday ishlab chiqarish obyektiga neft va gaz va kimyo sanoatiga qo'llash mumkin.

Dissertatsiya tadqiqotlari doirasida ishlab chiqilgan UzGTL ishlab chiqarish kompleksining raqamli egizaklarining konseptual arxitekturasi 1-rasmda ko'rsatilgan.

RVBT PHD tizimidan qayta ishlangan va tozalangan ma'lumotlar to'g'ridan to'g'ri ushbu dissertatsiya tadqiqotining mavzusi bo'lgan raqamli egizak proyekcion tizimiga uzatiladi.

Tadqiqot doirasida ishlab chiqilgan raqamli egizak proyekcion tizim texnologik uskunalar modellarini (APM apparat va dasturiy platformasi asosida aktivlar samaradorligini boshqarish proyeksiyasi) va jarayonlarni simulyatsiya qilish (simulyatsiya proyeksiyasi va optimallashtirish) uchun RVBT PHD tizimining tozalangan ma'lumotlaridan UNISIM apparat va dasturiy platformasi orqali foydalanadi.

Ushbu dissertatsiya tadqiqoti davomida ishlab chiqilgan uslubiyat raqamli egizakni fizik egizak-obyekt bilan sinxronlashtirish konsepsiyasining birinchi amaliy qo'llanilishi bo'lib, raqamli egizak ko'rsatmalarini UzGTL real ishlab chiqarish majmuasiga joriy etishdan aniq va isbotlangan texnik-iqtisodiy samaraga ega.

Dissertatsiya tadqiqotlari doirasida UzGTL ishlab chiqarish majmuasining texnologik sxemasi texnologik bloklarga, so‘ngra keyingi modellashtirish uchun texnologik va yordamchi uskunalarning (ishlab chiqarish aktivlari) asosiy toifalariga bo‘linadi:

1) Aylanadigan uskunalar:

- Markazdan qochma nasoslar;
- Pistonli nasoslar;
- Markazdan qochma kompressorlar;
- Pistonli kompressorlar;
- Bug‘ turbinalari;

2) Issiqlik almashinish qurilmalari;

3) Pechlar va isitkichlar;

4) Havo sovitish tizimlari;

5) Kolonnalar;

6) Separatorlar va skrubberlar;

7) Reaktorlar, shu jumladan GTL texnologiyasining asosiy reaktorlari:

- Fisher-Tropsh reaktori;
- Gidrokreking reaktori (izokreking);
- Bug‘ reformer;

8) O‘chirish va boshqarish klapanlari va filtrlari;

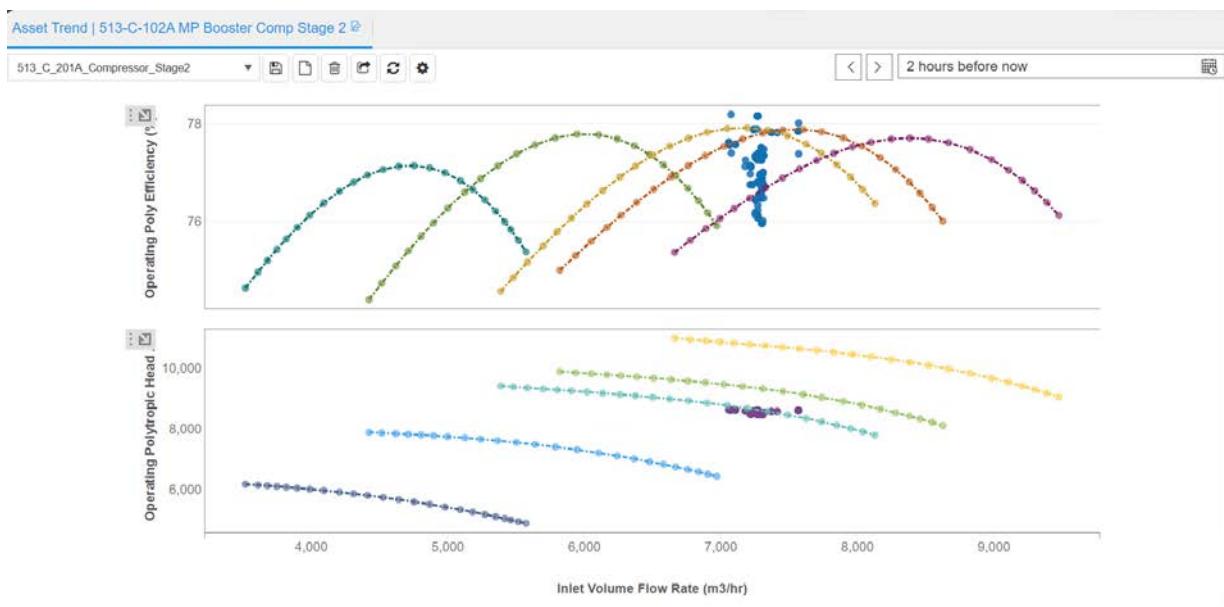
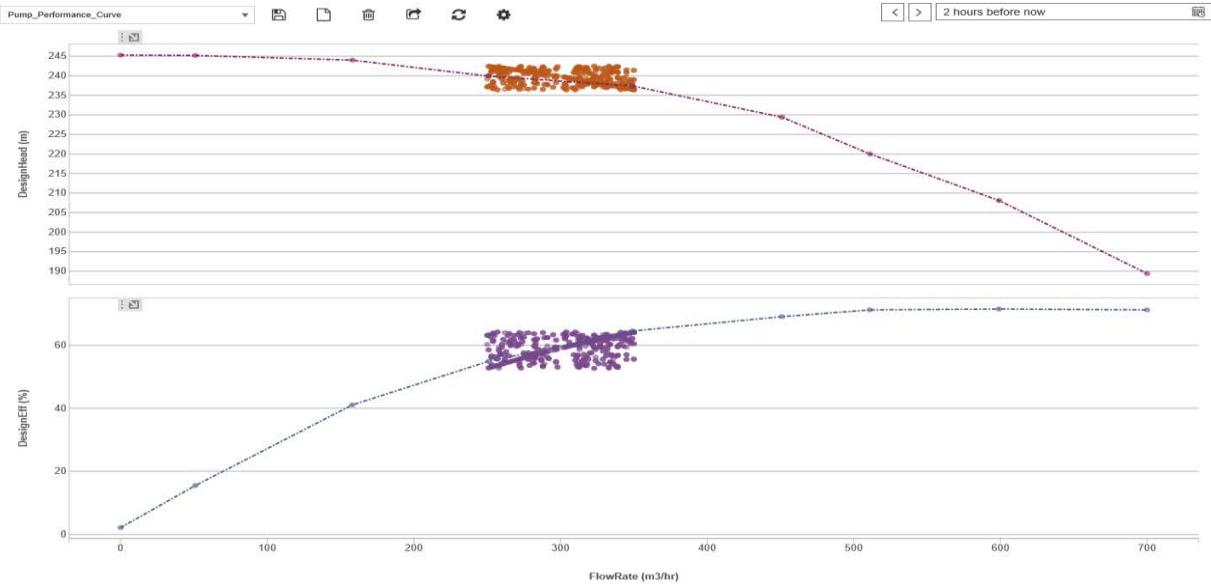
9) Kollektorlar va manifoldlar;

10) Molekulyar elak adsorberlari va quritkichlar.

Simulyatsiya qilingan uskunalar va texnologik kichik jarayonlar toifalarining har biri uchun har bir uskunaning ishlashi va ishlashiga ta’sir qiluvchi o‘lchanadigan parametrlar aniqlandi, agar ishlaydigan uskunalar ish doirasidan tashqariga chiqsa, signal bilan ushbu toifadagi raqamli egizak bilan boshqariladi.

Simulyatsiya qilingan uskunalarning har bir toifasi uchun raqamli egizak modelida energiya sarfini optimallashtirish uchun kuzatiladigan asosiy samaradorlik ko‘rsatkichlari (ASK) aniqlanadi va dasturlashtiriladi. Raqamli egizakning ishlashi paytida ushbu ishlab chiqarish aktivining umumiyligi ishlashini kuzatishga yordam beradigan ko‘rsatkichlar ham aniqlandi.

Aylanadigan uskunalar uchun boshqarish hisoblangan ishlash egri chiziqlari asosida raqamli egizak tomonidan ta’minlanadi (2-rasm).



2-rasm. Raqamli egizakda modellashtirilgan aylanma uskunalarining ishlash egri chiziqlari.

Quyidagi formulalar bo'yicha hisoblangan ishchi hajmiy samaradorlik  $VE$  va val quvvati  $W_{Shaft}$  ning asosiy samaradorlik ko'rsatkichlari (ASK) kuzatadigan modelning tarkibiy qismlari alohida qiziqish uyg'otadi:

$$VE = \eta_{Vol} = \left[ (100 - L) - \left( \frac{P_d}{P_s} \right) - C \left[ \frac{Z_s}{Z_d} \left( \frac{P_d}{P_s} \right)^{\frac{1}{k}} - 1 \right] \right] \quad (1)$$

Bu yerda  $P_d$  – chiqarish bosimi, Pa;

$P_s$  - so'rish bosimi, Pa;

$L$  - ichki sizish, gazning ishqalanishi, klapanlar orqali bosimning pasayishi va kirishdagi gazning dastlabki qizishi kabi o'zgaruvchan omillarning ta'siri.

Moylash kompressorlari uchun 0,03 dan 0,05 gacha va moylashsiz kompressorlar uchun 0,07 dan 0,1 gacha deb qabul qilinadi;  
 K - gazning issiqlik sig‘imi koeffitsiyenti, Cp/Cv;  
 $Z_d$  - chiqarishdagi siqilish koeffitsiyenti;  
 $Z_s$  - so‘rishdagi siqilish koeffitsiyenti;  
 C - porshen hajmidagi tirkish (bo‘shliq) foizi.

$$W_{Shaft} = \frac{2,78 \cdot 10^{-4}}{\eta} * \left( \frac{K}{K-1} \right) * Q_V * P_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right] \quad (2)$$

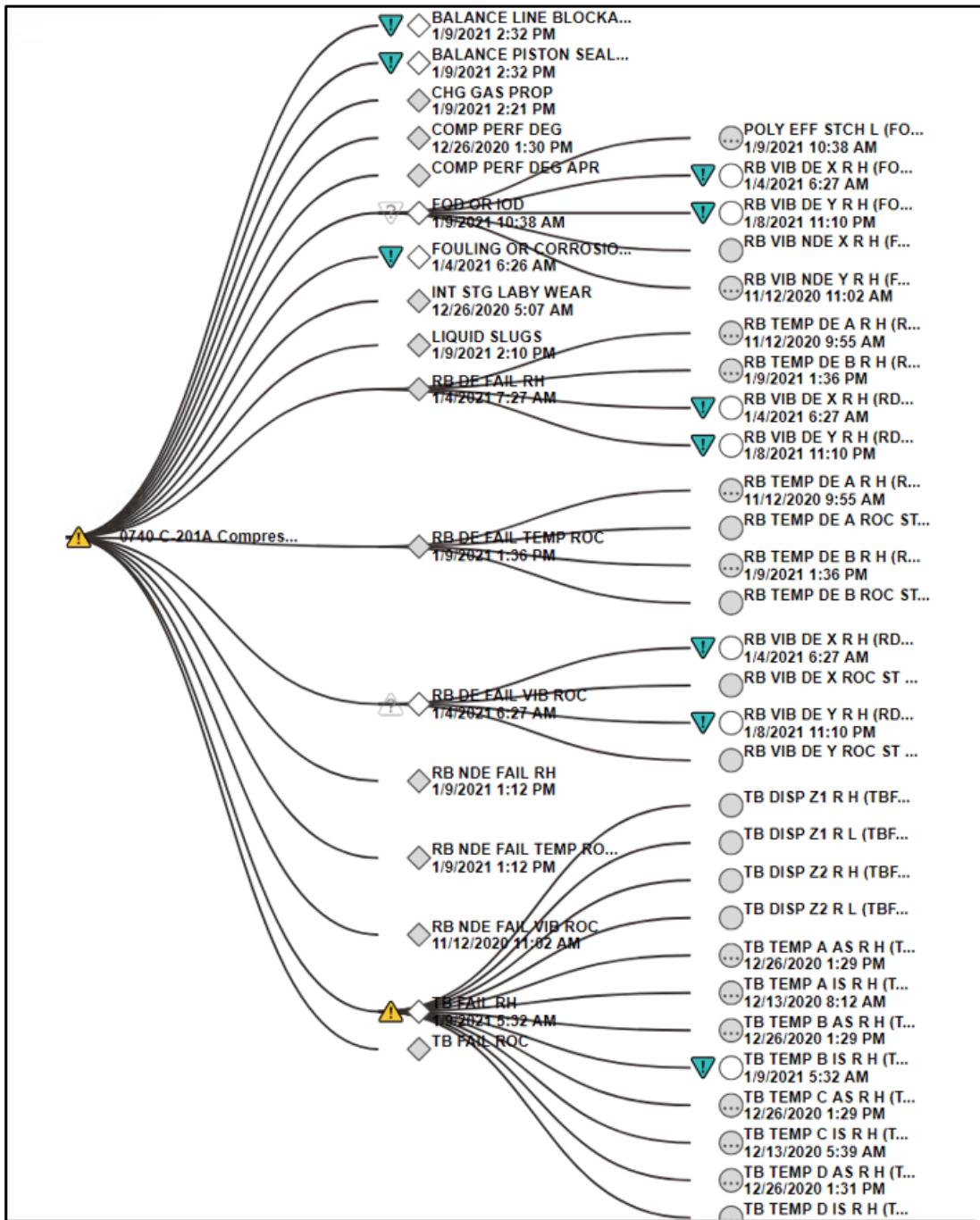
Bu yerda  $P_1, P_2$  - mutlaq kirish bosimlari, kPa;  
 $Q_V$  - kirish sharoitida hajmdagi gaz oqimi tezligi,  $\text{m}^3/\text{c}$ ;  
 $\eta$  - kutilayotgan samaradorlik (%).

Raqamli egizak proyeksiyalarni ishlab chiqish va tadqiq qilish doirasida aktivlarning ishlashi va nosozliklarini bartaraf etishni monitoring qilish modellari ham yaratildi va egizak proyeksiyalar tarkibiga qo‘shildi. Tadqiqot natijalari aktivning ishlashi yoki xizmat ko‘rsatishga ta’sir qilishi mumkin bo‘lgan anomaliyalarni aniqlash uchun aktiv uchun modellashtirilgan nosozliklar va alomatlar ro‘yxatini o‘z ichiga oladi.

Hisoblash modellari to‘g‘ri ishlashi uchun bu modelga ba’zi dastlabki ma’lumotlarni kiritishni anglatadi. Aktiv/jarayon modelining kirish ma’lumotlari o‘lchangan ma’lumotlar va statik ma’lumotlardan iborat. O‘lchangan kirish ma’lumotlari modelga avtomatlashtirilgan boshqaruv tizimi/RVBT PHD tomonidan teglarni moslashtirish orqali uzatiladi. Simulyatsiya qilingan uskunalar va texnologik kichik jarayonlar toifalarining har biri uchun raqamli egizak modelga kiritilgan kirish va chiqish parametrlari (atributlari) va ularning xususiyatlari aniqlanadi va dissertatsiya tadqiqotlari natijalariga kiritiladi. Natijada, raqamli egizak alomatlar va nosozliklar “daraxti”ni modellashtiradi (3-rasm).

Ishlab chiqarish aktivlarini kuzatish uchun proyeksion modellar entalpiya, entropiya, zichlik va o‘ziga xos issiqlik quvvati kabi termodinamik xususiyatlarni hisoblashni talab qiladi. Ushbu xususiyatlar texnologik jarayonlarni simulyatsiya qilishning termodinamik proyeksion modeli bilan hisoblanadi va almashtiriladi. Shunday qilib, ushbu dissertatsiya tadqiqotining assosiy maqsadlaridan biri – birlashgan raqamli egizakning turli proyeksiyalarining real vaqt rejimida organik avtonom o‘zaro ta’sirini birlashtirish va ta’minlash ta’milanadi.

Dissertatsiya tadqiqoti doirasida UzGTL ishlab chiqarish majmuasi tarkibiga kiruvchi reaktorlarni modellashtirish alohida qiyinchilik tug‘irdi.



3-rasm. Markazdan qochma kompressorlar uchun modellashtirilgan alomatlar va nosozliklar “daraxti”.

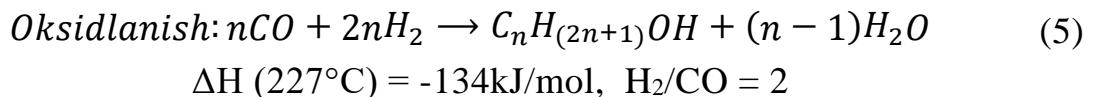
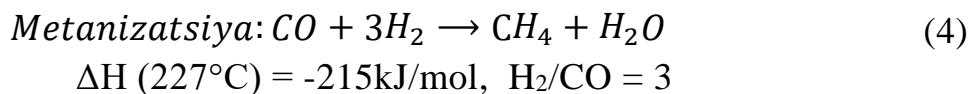
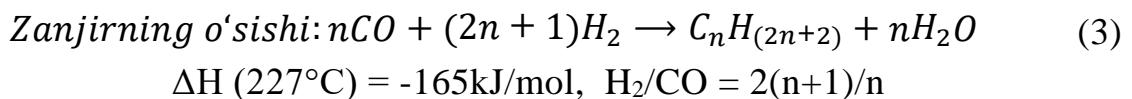
UzGTL ishlab chiqarish majmuasining texnologik sxemasida tegishli texnologik jarayonlarning borishini ta'minlaydigan uchta reaktor mavjud:

- Sintez-gaz ishlab chiqarish texnologik blokidagi bug'li riforming reaktori (Steam Reformer) (Unit 20 Texnologik qurilmasi);
- Fisher-Tropsh reaksiyasi bo'yicha suyuq uglevodorodlar sintezi texnologik blokidagi Fisher-Tropsh jarayoni reaktori (Fischer-Tropsch (yoki LTFT) Reactor) (Unit 30 Texnologik qurilmasi);
- Suyuq uglevodorodlarning sintetik aralashmasini qayta ishlash texnologik blokidagi gidrokreking reaktori (Hydrocracker) (Unit 50 Texnologik qurilmasi).

Har xil turdag'i reaktorlar uchun raqamli egizaklarni yaratish, bir tomonidan, ushbu apparatlar ichida fizik-kimyoviy va kimyoviy jarayonlar sodir bo'lganligi sababli, maxsus murakkablik va o'ziga xoslikning ilmiy-muhandislik jarayonidir, ammo boshqa tomonidan, ushbu jarayonlar ishlab chiqarish aktivlarining ushbu funksional toifasini to'liq belgilaydi va dissertatsiya tadqiqotining obyekti bo'lgan kolonnalar va separatorlarni tadqiq qilish va modellashtirish natijalariga asoslanib, reaktorlarning raqamli egizaklarini texnologik jarayonlarni simulyatsiya qilish va ishlab chiqarishni optimallashtirish loyihasida yetarli darajada aniqlik bilan qayta tiklash mumkin.

Shu bilan birga, albatta, fizik-kimyoviy va kimyoviy jarayonlarning kinetikasi, katalizatorni tanlash, uning joylashishi va xususiyatlari reaktorning konstruksiyasi va ishlashiga hal qiluvchi ta'sir ko'rsatadi. Shuning uchun raqamli egizakni ishlab chiqish va tadqiq qilish ham ma'lum bir texnologik jarayon uchun individual hisoblanadi.

Shu munosabat bilan, reaktorning raqamli egizaklarining modellari va Fisher-Tropsh usulidan foydalangan holda tegishli texnologik sintez jarayoni yetarlicha noyob bo'lib, quyidagi bir vaqtning o'zida sodir bo'ladigan kimyoviy reaksiyalarning murakkab kinetikasi bilan ajralib turadi:



Ishlab chiqarish majmuasining butun quvur liniyasi infratuzilmasi texnologik jarayonlarni simulyatsiya qilishda UNISIM dasturiy ta'minot kutubxonasining standart vositalaridan foydalangan holda modellashtirilgan. UNISIM dasturiy ta'minot kutubxonasi issiqlik uzatishni to'liq baholash bilan bir fazali yoki ko'p fazali oqimlardan tortib yopiq yuqori quvvatli quvur liniyasi bo'lgan uchastkalarga qadar keng ko'lamli quvur liniyalari uchun barcha kerakli modellashtirish vositalarini o'z ichiga oladi. Kutubxonada dissertatsiya tadqiqotlari doirasida ishlatiladigan quvur liniyasi infratuzilmasi elementidagi bosimning pasayishini hisobga olish uchun bir nechta hisoblash uslubiyatlar mavjud:

- Aziz, Goviyer va Fogarasi uslubiyati;
- Baxendel va Tomas uslubiyati;
- Beggs va Brill uslubiyati;
- Dans va Ros uslubiyati;
- Gregori, Aziz va Mandan uslubiyati;
- Xagedorn va Braun uslubiyati;
- Ixtisoslashgan OLGAS asosida OLGAS\_2P uslubiyati;

- Ixtisoslashgan OLGAS asosida OLGAS\_3P uslubiyati;
- Orkizhevskiy uslubiyati;
- Poetman va Karpenter uslubiyati;
- Loy aralashmalari uchun korrelyatsiya usuli;
- Tulsa universitetidan Tulsa 99 uslubiyati;
- Standart bir xil oqim uslubiyati;
- Suyuqlikni siljитish uslubiyati.

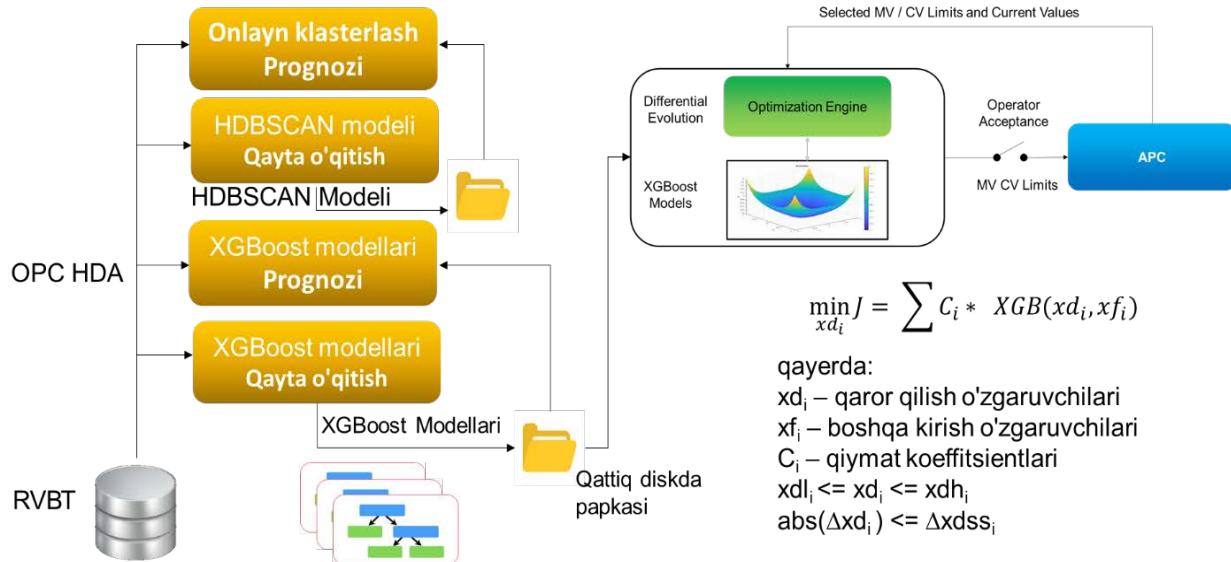
Dissertatsiyaning “**Ishlab chiqarishning murakkab texnologik sxemasi bilan ishlab chiqarish obyektlarining raqamli egizaklari nazariyasini ishlab chiqish**” deb nomlangan to’rtinchi bobi raqamli egizak proyeksiyalar va raqamli egizak proyeksiyalarni yanada takomillashtirish usullari o’rtasidagi munosabatlarni rivojlantirishning eng istiqbolli yo‘nalishlarini o’rganish va aniqlashga bag‘ishlangan.

Jarayonni boshqarish tizimining onlayn klonining proyeksiyasini texnologik jarayonlarni simulyatsiya qilish va aktivlarni boshqarish proyeksiyalarining kombinatsiyasi va o‘zaro ta’siriga asoslangan birlashtirilgan integratsiyalashgan raqamli egizakning konseptual arxitekturasiga integratsiya yo‘nalishi ko‘rsatilgan (1-rasm). Bunday integratsiya RVBTdan birlashgan raqamli egizagiga uzatiladigan ma’lumotlarning ishonchsizligi yoki noaniqligi bilan bog‘liq barcha xatolarning mutlaq yumshatilishini ta’minlaydi.

Ilg‘or jarayonlarni boshqarish va umuman ishlab chiqarishni optimallashtirish proyeksiyasining birlashtirilgan integratsiyalashgan raqamli egizaklining konseptual arxitekturasiga integratsiya yo‘nalishi ko‘rsatilgan. Ishlab chiqarishni rejalahtirish modeli bilan integratsiya raqamli egizakning bozor sharoitidagi kundalik o‘zgarishlarga eng sezgir munosabatini va har bir aniq ishlab chiqarish sharoitida eng samarali boshqaruva qarorini qabul qilishni ta’minlaydi.

Umuman olganda raqamli egizaklar va ayniqa ishlab chiqarishning murakkab texnologik sxemasiga ega bo‘lgan ishlab chiqarish obyektlarining raqamli egizaklari nazariyasining rivojlanishi, shuningdek, obyektning raqamli egizaklarining har bir proyeksiyasini ishlab chiqish va takomillashtirish bilan chambarchas bog‘liqdir. Ushbu vektor raqamlashtirish va sun’iy intellekt sohasida yangi texnologiyalar va texnikalarni joriy etish bilan bog‘liq.

Bobda XGBoost ekstremal gradiyentni kuchaytirish algoritmlari, differensial evolyutsiya (DE) va HDBSCAN klasterlariga asoslangan sun’iy intellekt usullari o‘rganilib, raqamli egizakning ilg‘or jarayonlarini boshqarish proyeksiyasini takomillashtirish uchun istiqbolli deb topildi. Uni takomillashtirish uchun sun’iy intellekt algoritmlarini ilg‘or jarayonlarni boshqarishning raqamli egizaklariga birlashtirish uchun yangilangan arxitektura ishlab chiqilgan (4-rasm).



4-rasm. Ilg'or jarayonlarni boshqarishning raqamli egizaklarini yanada takomillashtirish uchun sun'iy intellekt algoritmlari arxitekturasini qo'llash.

Ushbu bobda sun'iy intellekt va mashinali o'qitish (BYOAI, BYOML) ning ishlab chiqilgan texnikasi va algoritmlarini ularash va joylashtirishdan iborat bo'lган texnologik jarayonlarni (TJ) simulyatsiya qilish proyeksiyasini takomillashtirishning istiqbolli yo'nalishi o'rganiladi va aniqlanadi. Bu TJ simulyatsiyasining raqamli egizaklarining gibrild modellarini yaratish, birinchi tamoyil modellari asosida yaratilgan klassik raqamli egizaklarni sun'iy intellekt tomonidan yaratilgan modellar bilan birlashtirishdan iborat.

Sun'iy intellekt usullari va algoritmlarini tadqiq qilish, ishlab chiqish va qo'llash raqamli egizaklarga birlashtirish mumkin bo'lган pasaytirilgan tartib modellarini (Reduced Order Models, ROM) ni yaratish imkonini beradi. ROM modellarini murakkabroq model uchun zarur bo'lган qaror qabul qilish vaqtini yoki xotira sig'imini qisqartirish uchun muhim xatti-harakatlarni va dominant ta'sirlarni saqlab qoladigan yuqori aniqlikdagi dinamik modelni soddallashtirishdir.

ROM usuli texnologik jarayonni simulyatsiya qilishning ko'plab senariylarini nafaqat ushbu raqamli egizak fizik obyektdan, balki shunga o'xshash obyektlardan olingan statistik ma'lumotlarning butun to'plamini, hamda uskuna ishlab chiqaruvchilari va fizik obyektlarning boshqarish xodimlarini ekspertizadan o'tkazishni hisobga olgan holda empirik modellarni qurishga imkon beradi.

Ushbu bo'limda ishlab chiqarish va ta'minotni rejorashtirish tizimini takomillashtirish uchun sun'iy intellekt algoritmlarining istiqbolli to'plami ko'rib chiqildi va belgilandi. Ishlab chiqarish va ta'minotni rejorashtirish tizimini takomillashtirish uchun sun'iy intellekt algoritmlaridan foydalanish ushbu dissertatsiya tadqiqotlari bilan bog'liq ilmiy fanlarni nazarda tutadi, bunda sun'iy intellektni qo'llashda sezilarli yutuqlarga erishilgan, turli xil ilmiy tajribalar to'plangan va juda ko'p ilmiy ishlar nashr etilgan.

Ushbu ilmiy tadqiqotlar va muhandislik ishlanmalari murakkab texnologik sxemaga ega bo‘lgan ishlab chiqarish obyektining raqamli egizaklarining samaradorligini oshirish nuqtayi nazaridan aniq ilmiy natijani bermasa ham, ulardan ushbu dissertatsiya tadqiqotlari doirasida olingan natijalar bilan birgalikda foydalanish, albatta, bu ishlab chiqarish obyektini to‘liq raqamlashtirishning aniq va majburiy elementi va ishlab chiqarishning murakkab texnologik sxemasiga ega ishlab chiqarish obyektlarining raqamli egizaklari nazariyasini yanada rivojlantirish yo‘nalishi, shu jumladan UzGTL ishlab chiqarish majmuasining o‘rganilayotgan obyektiga nisbatan ishlab chiqarish obyektlarining raqamli egizaklari nazariyasini yanada rivojlantirish yo‘nalishi hisoblanadi.

Dissertatsiyasining beshinchi “**UzGTL ishlab chiqarish majmuasida raqamli egizakni joriy etish natijalari**” bobida UzGTL ishlab chiqarish qo‘rxonasida dissertatsiya tadqiqotlari mavzusini joriy etishning aniq natijalari keltirilgan.

UzGTL ishlab chiqarish majmuasining ishlab chiqilgan raqamli egizakni joriy etish natijasida:

- texnologik jarayon to‘g‘risidagi ma’lumotlarni tezkor tahlil qilishga sarflanadigan vaqt qisqaradi (va funksiyani avtomatlashtirish tufayli texnologik jarayonning ba’zi bosqichlarida butunlay yo‘q qilinadi);

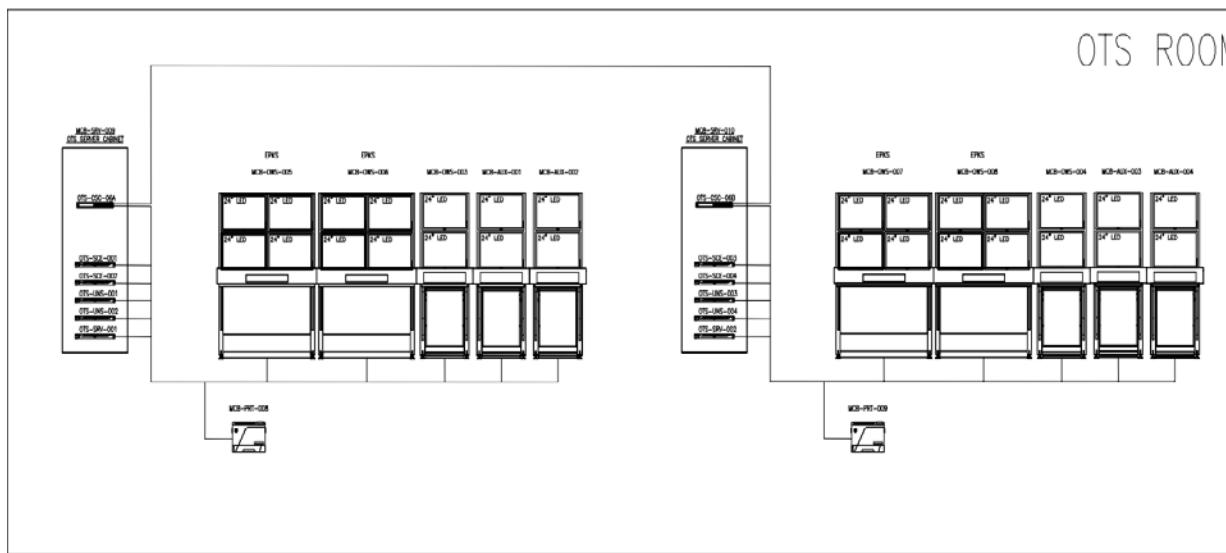
- texnologik tizim to‘g‘risidagi ma’lumotlarni tezkor tahlil qilish asosida, texnologik jarayonning yanada maqbul oqimi uchun turli xil gipotetik ssenariylarni simulyatsiya qilish jarayoni va natijalarini tahlil qilish kompleksning texnologik rejimiga (yoki texnologik sxemasining o‘ziga) o‘zgartirishlar kiritish bo‘yicha boshqarish qarorini qabul qilishga sarflanadigan vaqt qisqaradi (texnologik jarayonning ayrim bosqichlarida esa funksiyani avtomatlashtirish hisobiga butunlay yo‘q qilinadi);

- kompleksning texnologik rejimidagi (yoki texnologik sxemaning o‘zida) o‘zgarishlarni optimallashtirish asosida kerakli talab qilinadigan maqsadli mahsulot ishlab chiqarish ko‘payadi;

- texnologik jarayon to‘g‘risidagi ma’lumotlarni tezkor tahlil qilish, TJning turli gipotetik senariylarini simulyatsiya qilish natijalarini tahlil qilish va texnologik uskunalarning samaradorligini tahlil qilish asosida nosozliklarning oldini olish hisobiga kompleksning rejadan tashqari ishlamay qolish vaqt qisqaradi.

UzGTL ishlab chiqarish majmuasining raqamli egizagi amalga oshiriladigan DTK OTS arxitekturasi 5-rasmda ko‘rsatilgan.

UzGTL ishlab chiqarish majmuasi uchun raqamli egizakni joriy etishning iqtisodiy samarasи dissertationa ishining tasdiqlangan xulosasi hisoblanadi. Dissertationa ishiga UzGTL ishlab chiqarish majmuasida raqamli egizak konsepsiyasining ayrim elementlarini joriy qilishdan erishiladigan iqtisodiy samaradorlik hisobi ilova qilingan.



5-rasm. UzGTL ishlab chiqarish majmuasining raqamli egizagi amalga oshiriladigan DTK OTS arxitekturasi.

## XULOSA

Dissertatsiyada raqamli egizaklarni yaratish nazariyasi, tizimli yondashuv, obyektni avtomatlashtirish va raqamlashtirish uchun standart yechimlarni tahlil qilish va tasniflash, matematik modelllashtirish, avtomatik boshqarish nazariyasi usullari, hisoblash tajribalari va tizimli dasturlash usullari, texnologik sxemaga ega bo‘lgan ishlab chiqarish obyektining birlashtirilgan integratsiyalashgan raqamli egizaklari yuqori murakkablik ishlab chiqilgan.

Natijada quyidagi ilmiy natijalarga erishilgan:

1. To‘liq adabiy sharh o‘tkazilgan va sanoat avtomatlashtirish tizimlarida raqamli egizaklarni yaratish nazariyasi va amaliyotining hozirgi holati bat afsil tahlil qilingan.

2. Ishlab chiqarish obyekti uchun raqamli egizakning tuzilishi turli jihatlarda o‘rganilgan, struktura proyeksiyalarga ajratildi, murakkab texnologik ishlab chiqarish sxemasiga ega ishlab chiqarish obyektlari uchun birlashtirilgan raqamli egizakning yakuniy konsepsiyasining samaradorligiga individual bashoratlarning ahamiyati va ta’siri tahlil qilingan.

3. Raqamli egizaklarning ishslash samaradorligini oshirish maqsadida ishlab chiqarish obyektlari uchun raqamli egizaklar tuzilishiga integratsiya shaklida keyingi tadqiqotlar va foydalanish uchun ishlatiladigan va taklif qilingan sun’iy intellekt usullari va algoritmlariga sharhlangan.

4. Raqamli egizakning konsepsiysi va konseptual arxitekturasi UzGTL ishlab chiqarish majmuasi (O‘zbekiston Respublikasi, Qashqadaryo viloyati) uchun ishlab chiqilgan bo‘lib, u tadqiqot obyektini ongli ravishda dastlabki tanlash tufayli bugungi kunda zamonaviy sanoatda ma’lum bo‘lgan ishlab chiqarish aktivlarining eng keng to‘plami va ayniqsa murakkab va o‘ziga xos xususiyati bilan ajralib turadi, texnologik ishlab chiqarish sxemasi universal

uslubiy deb hisoblanishi mumkin va ular neft-gaz, neft-kimyo va kimyo sanoatining har qanday ishlab chiqarish ob'yeqtlarida qo'llaniladi.

5. UzGTL ishlab chiqarish majmuasi uchun raqamli egizakning ishlab chiqilgan konseptual arxitekturasi doirasida raqamli egizak proyeksiyalar ishlab chiqilgan va o'rganilgan, turli xil raqamli egizak proyeksiyalarning ma'lumotlar bazasini boshqarish tizimlari o'rtafigi dasturiy interfeyslar va interfeyslar ishlab chiqilgan va joriy etilgan, raqamli egizak proyeksiyalar o'rtafiga onlayn ma'lumot almashish mexanizmlari va interfeyslari, PHD dasturiy-apparat platformasi, shuningdek bevosita UzGTL kompleksining avtomatlashtirilgan boshqarish tizimi asosida joriy etilgan ma'lumotlar bazasini vaqt bo'yicha boshqarish tizimi ishlab chiqilgan va joriy qilingan (MBBT RVBT).

6. UzGTL ishlab chiqarish majmuasi uchun raqamli egizak proyeksiyalarni yaratish jarayonida ishlab chiqarish aktivlarining barcha asosiy toifalari va UzGTL ishlab chiqarish majmuasining barcha asosiy texnologik jarayonlarining modellari ishlab chiqilgan va ishga tushirilgan, sun'iy intellektning alohida raqamli egizak usullari va algoritmlari (APR ilg'or naqshni aniqlash algoritmi) qo'llanilgan va loyiha bashoratlariga birlashtirilgan.

7. Barcha ishlab chiqilgan raqamli egizaklar sinovdan o'tkazilgan va UzGTL kompleksining ishlab chiqarish jarayonlarini o'zgartirishni talab qiladigan bir nechta optimallashtirish senariylari ishlab chiqilgan, bu o'zgarishlardan kafolatlangan yakuniy iqtisodiy samara bilan, tegishli hisob-kitoblar bilan tasdiqlangan.

8. Raqamli egizakni yanada takomillashtirish yo'naliishlari UzGTL ishlab chiqarish kompleksi uchun ham, umuman olganda, murakkab texnologik ishlab chiqarish sxemasiga ega bo'lgan ishlab chiqarish obyektlarining raqamli egizaklari nazariyasini ishlab chiqish nuqtayi nazaridan o'rganilgan.

9. Murakkab texnologik ishlab chiqarish sxemasiga ega bo'lgan ishlab chiqarish obyektining raqamli egizaklarining proyeksiyalarini yanada takomillashtirish uchun talabnomalarini beruvchining nuqtayi nazaridan istiqbolli sun'iy intellekt usullari va algoritmlari to'plami taklif etilgan.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.03/30.12.2019.Т.03.02  
ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ  
ТАШКЕНТСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ  
УНИВЕРСИТЕТЕ**

---

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

**ИВАНЬЯН АРСЕН ИГНАТЬЕВИЧ**

**РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ  
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

**05.01.08 - Автоматизация и управление технологическими процессами и  
производствами**

**АВТОРЕФЕРАТ ДОКТОРСКОЙ (DSc)  
ДИССЕРТАЦИИ ПО ТЕХНИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Тема докторской (DSc) диссертации зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за № B2024.2.DSc/T790.

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном техническом университете.

Автореферат диссертации на трёх языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице ([www.tdtu.uz](http://www.tdtu.uz)) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)).

**Научный консультант:**

**Адилов Фарух Тулкунович**

доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:**

**Игамбердиев Хусан Закирович**

доктор технических наук, профессор, академик АН РУз

**Марахимов Авазжон Рахимович**

доктор технических наук, профессор

**Мусаев Мухаммаджон Махмудович**

доктор технических наук, профессор

**Ведущая организация:**

**АО "O'ZLITINEFTGAZ"**

Зщита диссертации состоится «9» 11 2024 года в 10<sup>00</sup> часов на заседании Научного совета DSc.03/30.12.2019.T.03.02 при Ташкентском государственном техническом университете (Адрес: 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел: (99871) 246-46-00; факс: (99871) 227-10-32; e-mail: [tstu\\_info@tdtu.uz](mailto:tstu_info@tdtu.uz)).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского государственного технического университета (зарегистрировано № 401) (Адрес: 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел.: 207-14-70).

Автореферат диссертации разослан «21» 10 2024 года.  
(реестр протокола рассылки № 17 от «17» 09 2024 года)



**Н.Р. Юсупбеков**

Председатель научного совета  
по присуждению учёных степеней,  
д.т.н., профессор, академик АН РУз

**У.Ф. Мамиров**

Ученый секретарь научного совета  
по присуждению учёных степеней,  
д.т.н., профессор

**Х.З. Игамбердиев**

Председатель научного семинара  
при научном совете по присуждению учёных степеней,  
д.т.н., профессор, академик АН РУз

## **ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора наук (DSc))**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В мире особое внимание уделяется расширению и углублению изучения вопросов цифровизации во всех сферах жизнедеятельности. Это обуславливается различными факторами и трендами - глобализация человечества, постоянный поиск путей повышения эффективности бизнеса, социологические сдвиги в обществе, поиск безопасности и комфорта – но все они однозначно связано со стремительным и необратимым развитием научно-технического прогресса в направлении тотальной цифровизации и информатизации.

В этой связи развитие теории цифровых двойников производственных объектов в приложениях промышленной автоматизации не выглядит особым вектором исследований, но при этом является крайне сложной научно-технической и инженерной задачей ввиду выдающейся высокотехнологичности современной промышленности. В этой области особое внимание уделяется усовершенствованию техник и методик моделирования физических прототипов, виртуализации производственной инфраструктуры, быстродействию автоматических и автоматизированных функций в режиме реального времени, а также исследованию и применению методов и алгоритмов искусственного интеллекта.

В мире ведутся научно-исследовательские работы как по оптимизации самих технологических процессов на производстве, так и по оптимизации систем управления данными процессами, включая техники и методики моделирования, исследования в сфере повышения быстродействия систем и повышения надежных и безопасных интерфейсов в системах, работающих с базами данных в реальном времени. Отдельным научным направлением, уже фактически созданной научной дисциплиной являются исследования в области методик и алгоритмов искусственного интеллекта, в том числе в промышленном применении. В этой связи проведение исследований в области теории цифровых двойников в промышленности является важной задачей.

В республике большое внимание уделяется направлениям автоматизации управления и комплексной цифровизации. В Стратегии развития нового Узбекистана на 2022–2026 гг. отмечены задачи, в том числе по "... увеличению до конца 2026 года уровня цифровизации производственных и операционных процессов в реальном секторе экономики ... до 70 процентов", "... увеличению объема индустрии программных продуктов в пять раз, их экспорта — в десять раз с доведением до 500 миллионов долларов США."<sup>1</sup>. Для достижения поставленных задач существенно важным вопросом является цифровизация инфраструктуры производств и внедрение в нее цифровых двойников производственных

---

<sup>1</sup> Указ Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 г. №УП-60 «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы».

активов, в том числе с активным использованием технологий искусственного интеллекта.

Диссертационное исследование в полной мере служит выполнению задач, предусмотренных Постановлением Президента Республики Узбекистан “Об утверждении Концепции национальной стратегии “Цифровой Узбекистан 2030”, Указом Президента Республики Узбекистан № УП-60 от 28 января 2022 года “О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022 - 2026 годы”, Постановлением Президента Республики Узбекистан от 3 июля 2018 года № ПП-3832 «О мерах по развитию цифровой экономики и сферы оборота крипто-активов в Республике Узбекистан», Постановлением Президента Республики Узбекистан от 21 ноября 2018 года № ПП-4022 «О мерах по дальнейшей модернизации цифровой инфраструктуры в целях развития цифровой экономики», Постановлением Президента Республики Узбекистан от 18 апреля 2018 года № ПП-3673 «Об организационных мерах по ускоренной интеграции ведомственных информационных систем и реализации инновационных проектов», Указом Президента Республики Узбекистан от 24 июля 2017 года № УП-5120 «О мерах по внедрению проектного управления в Республике Узбекистан», Постановлением Президента Республики Узбекистан от 17 февраля 2021 года № ПП-4996 “О мерах по созданию условий для ускоренного внедрения технологий искусственного интеллекта” и ряду других законодательных актов и нормативно-правовых документов, принятых в данной сфере.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики.** Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий согласно Концепции развития науки до 2030 года, в частности в соответствии с пунктом Концепции о разработке Стратегии поэтапного развития искусственного интеллекта.

**Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации**<sup>2</sup>. В ведущих научных центрах и высших образовательных учреждениях мира проводятся научные исследования, направленные на развитие теории цифровых двойников производственных объектов, в том числе, в Honeywell (США), General Electric (США), Siemens (Германия), Schneider Electric, Schlumberger (Франция), Massachusetts Institute of Technology (США), Tilburg University (Нидерланды), Eindhoven University of Technology (Нидерланды), ANSYS (США), Institute of Science and Technology in Beihang University (Китай), National University of Singapore (Сингапур), Jiangsu University of Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology (Китай), Technical University Munich, Karlsruhe Institute of Technology, Technical University Darmstadt (Германия), Imperial College

<sup>2</sup> Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации составлен на основании <https://www.honeywell.com/us/en>, <https://www.siemens.com/global/en.html>, <https://www.ge.com/>, <https://www.se.com/ww/en/>, <https://www.slb.com/>, <https://web.mit.edu/>, <https://www.tilburguniversity.edu/>, <https://www.tue.nl/en/>, <https://www.ansys.com/>, <https://ev.buaa.edu.cn/>, <https://nus.edu.sg/>, <https://en.just.edu.cn/>, <https://english.hust.edu.cn/>, <https://www.tum.de/en/>, <https://www.kit.edu/english/>, <https://www.tu-darmstadt.de/index.en.jsp>, <https://www.imperial.ac.uk/>, <https://www.ed.ac.uk/>, <https://www.u-tokyo.ac.jp/en/>, <https://www.titech.ac.jp/english>, <https://en.snu.ac.kr/>, <https://www.kaist.ac.kr/en/>, <https://bmstu.ru/>, <http://www.spiiras.nw.ru/>, <http://www.mipt.ru/>, <https://msu.ru/>, <https://www.polito.it/en/>, и других источников.

London, The University of Edinburgh (Великобритания), The University of Tokyo, Tokyo Institute of Technology (Япония), Seoul National University, Korea Advanced Institute of Science and Technology (Южная Корея), Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана, Санкт-Петербургском институте информатики и автоматизации, Московском Государственном Университете им. Ломоносова, Московском Физико-техническом институте (Россия), Туринском политехническом институте, Ташкентском государственном техническом университете.

В результате исследований, проведенных в мире по развитию теории цифровых двойников для производственных объектов, получен ряд результатов, в том числе определены основополагающие понятия концепции цифровых двойников (Флоридский технологический институт (США)), разработаны методы динамического моделирования (Московский Физико-технический институт, Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого (Россия), Massachusetts Institute of Technology (США), Tilburg University (Нидерланды), National University of Singapore (Сингапур), Jiangsu University of Science and Technology, Huazhong University of Science and Technology (Китай)), существенно усовершенствованы научно-технические решения по виртуализации и платформам интернета вещей (компании Cisco, Microsoft (США), Huawei (Китай)), созданы рабочие программно-алгоритмические комплексы цифровых двойников для отдельных промышленных агрегатов и технологических установок (компании Honeywell (США), General Electric (США), ANSYS (США), Siemens (Германия), Schneider Electric, Schlumberger (Франция)), разработаны алгоритмы искусственного интеллекта, применимые для усовершенствования цифровых двойников для производственных объектов (Google (США), IBM (США), University of Washington (США), Bosch (Германия)).

**Степень изученности проблемы.** Вопросам исследования теории цифровых двойников для производственных объектов посвящены работы ряда зарубежных учёных и инженеров: M. Grieves<sup>3</sup>, B.M. Дозорцева<sup>4</sup>, Э. Негри<sup>5</sup>, B.B. Тарасова<sup>6</sup>, A.I. Боровкова<sup>7</sup>, P. McLaughlin<sup>8</sup>, A. Rasheed<sup>9</sup>, D.

---

<sup>3</sup> Grieves M., Vickers J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems//Transdisciplinary perspectives on complex systems, 2017. Pp. 85-113.

<sup>4</sup> Дозорцев, В.М. Цифровые двойники в промышленности: генезис, состав, терминология, технологии, платформы, перспективы. Автоматизация в промышленности, 2020. DOI: 10.25728/avtprom.2020.09.01.

<sup>5</sup> Negri E. et al. A review of the roles of digital twin in cpsbased production systems // Procedia Manufacturing, 2017. 11:939-948.

<sup>6</sup> Тарасов В. Б. Стратегический инжиниринг предприятий будущего: массовое сотрудничество, интернет вещей, инициатива "Индустрия 4. 0", что дальше? / Тарасов В. Б. // Инжиниринг предприятий и управление знаниями (ИП&УЗ-2016) : сборник научных трудов XIX научно-практ. конф., 26-27 апреля 2016 г. / Рос. экономический ун-т им. Г. В. Плеханова ; науч. ред. Тельнов Ю. Ф. - М., 2016. - С. 57-68.

<sup>7</sup> Боровков А.И., Незамаева О., Болсуновская М., Бурлуцкая Ж. Поддержка принятия решений в социальной сфере на базе цифровой модели. December 2023, The Journal of Social Policy Studies, 21(4):677-692. DOI: 10.17323/727-0634-2023-21-4-677-692.

<sup>8</sup> McLaughlin, P., McAdam, R. The Undiscovered Country: The Future of Industrial Automation. Honeywell International Inc., 2016. – 14 p.

<sup>9</sup> Rasheed A. et al. Digital Twin: Values, Challenges and Enablers from a Modeling Perspective // IEEE Access. 2016. No.4:1-33.

Jones<sup>10</sup>, B.R. Barricelli<sup>11</sup>, J. Vickers<sup>3</sup>, J. Trauer<sup>12</sup>, M. Mortl<sup>12</sup>, S. Schweigert-Recksieck<sup>12</sup>, D. Evans<sup>13</sup>, K. Jones<sup>14</sup>, C. Romatier<sup>14</sup>, S. Sukaridhoto<sup>15</sup>, H. Wicaksono<sup>15</sup>, A. Gadigi<sup>16</sup>, I.H. Roldan<sup>16</sup>, S. Kerimani<sup>16</sup>, Z. Song<sup>17</sup>, B. Huang<sup>17</sup>, Z. Ge<sup>17</sup> и других, а также отечественных ученых Н.Р. Юсупбекова<sup>18</sup>, Ф.Т. Адилова<sup>18</sup>, работающих напрямую в сфере разработки и исследования цифровых двойников, Х.З. Игамбердиева<sup>19</sup>, Т.Ф. Бекмуратова<sup>20</sup>, Ш.М. Гулямова<sup>21</sup>, М.А. Исмаилова<sup>22</sup>, У.Ф. Мамирова<sup>19</sup> и др., работающих в области моделирования, заложенного в основу создания цифровых двойников.

Со стороны вышеупомянутых учёных велись исследования, посвященные методологии моделирования и разработки фундаментальных основ для создания и внедрения цифровых двойников, а также по применению алгоритмов искусственного интеллекта в промышленных приложениях.

Уровень цифровизации промышленных предприятий в целом и в нефтегазовом секторе, в частности, в Республике Узбекистан еще недостаточно высок и поэтому использование ряда методик и концепций, разработанных в ходе зарубежных научных исследований, уже дает и дало бы еще больший результат в случае дальнейшего активного применения.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационное исследование выполнено в рамках научно-исследовательских проектов Ташкентского

---

<sup>10</sup> Jones D. et al. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 9.03.2020.

<sup>11</sup> Barricelli B.R. et al. A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications // IEEE Access. 2019. 7:167653-167671

<sup>12</sup> Trauer, J., Schweigert-Recksieck, S., Gövert, K., Mörtl, M. and Lindemann, U. (2020) “Combining agile approaches and risk management for mechatronic product development – a case study,” Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference. Cambridge University, Press, 1, pp. 767–776. doi: <https://doi.org/10.1017/dsd.2020.16>

<sup>13</sup> Evans, D. The Internet of Things. How the Next Evolution of the Internet Is Changing everything, Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG), 2011, 11 p.

<sup>14</sup> Jones, K., Romatier, C. Leveraging the Cloud to Drive Complex-wide Profitability. Honeywell UOP, 25 East Algonquin Rd, Des Plaines, IL 60016 (2017).

<sup>15</sup> Falah, M., Sukaridhoto, S., Rasyid, M., Wicaksono, H.: Design of Virtual Engineering and Digital Twin Platform as Implementation of Cyber-Physical Systems. In: Procedia Manufacturing 52, 5th International Conference on System-Integrated Intelligence, pp. 331-336. Published by Elsevier B.V. (2020). DOI: 10.1016/j.promfg.2020.11.055

<sup>16</sup> Gadigi, A., Roldan, I.H., Kerimani, S. Brain of the Digital Twin - Reduced Order Modelling (ROM) Landscape and Potential Applications. Honeywell Technology Solutions, 2023.

<sup>17</sup> Zhiqiang Ge, Zhihuan Song, Steven X. Ding, and Biao Huang. Обработка больших объемов данных и аналитика в промышленности: Роль машинного обучения” IEEE Access 2017.

<sup>18</sup> Юсупбеков, Н.Р., Адилов Ф.Т., Дозорцев В.М. Квалифицированное компьютерное обучение имитационному моделированию и управлению типовыми технологическими объектами. Учебник для практических занятий по теме «Технологические процессы и автоматизация производства», 2016.

<sup>19</sup> Igamberdiev H.Z., Mamirov U.F. Formalization of the procedure for choosing the optimality criterion and setting the problem of ammonium nitrate production control // Chemical Technology, Control and Management: Vol. 2021: Iss. 4(100). -PP. 40-49.

<sup>20</sup> Бекмуратов, Т.Ф., Маликов М.Н., Эшмуратов У.А. Метод принятия решения с помощью нечетких множеств в технических экспертных системах // Тезис докладов международной конференции «Интеллектуализация систем управления и обработка информации». Ташкент, 1994.

<sup>21</sup> Yusupbekov, N., Gulyamov, Sh., Usmanova, N. The Challenge of Adaptation in Future Networking Environment: Engineering Methodology. In book: 14th International Conference on Theory and Application of Fuzzy Systems and Soft Computing – ICAFS-2020. DOI: 10.1007/978-3-030-64058-3\_101.

<sup>22</sup> Ismailov, M., Kasimov, F. “Model for calculating the static characteristics of hydraulic systems of hydro technical buildings / Abstracts of the International scientific and practical conference “Actual problems of mathematical modelling and information technology”, Vol. 2, May 2-3, pp. 242-244.

государственного технического университета: А-5-42 – «Программно-инструментальные средства интеллектуализации автоматизированного мониторинга и управления технологическими объектами в условиях априорной неопределенности» (2015-2017); Ф-4-56 “Разработка теоретических основ и методов структурно-параметрического синтеза интеллектуальных систем управления сложными технологическими объектами на основе нечетко-множественных отношений” (2016-2020 г.).

**Цель исследования** состоит в разработке и исследовании концептуальной архитектуры единого интегрированного цифрового двойника, которые являлись бы в достаточной степени универсальными для применения на любом объекте нефтегазохимической промышленности со сложной технологической схемой производства, при этом обеспечивая гарантированный ежегодный технико-экономический эффект от внедрения.

**Задачи исследования:**

изучение структуры цифрового двойника для производственного объекта со сложной технологической схемой, разложение структуры на проекции, проведение анализа значимости и влияния отдельных проекций на эффективность итоговой концепции единого цифрового двойника;

приведение обзора методов и алгоритмов искусственного интеллекта, использованных и предлагаемых в дальнейшем к исследованию и использованию в виде интеграции в структуру цифровых двойников для производственных объектов с целью повышения эффективности работы цифровых двойников;

разработка типовой концептуальной архитектуры единого интегрированного цифрового двойника для производственного объекта со сложной технологической схемой;

разработка и исследование отдельных проекций создаваемого согласно концептуальной архитектуре цифрового двойника;

разработка и внедрение программных интерфейсов и интерфейсов между системами управления базами данных (СУБД) различных проекций цифровых двойников, разработка и внедрение интерфейсов обмена данными в онлайн-режиме между проекциями цифровых двойников и системой управления базами данных в режиме реального времени (СУБД БДРВ);

разработка и тестирование моделей всех основных категорий производственных активов и всех основных технологических процессов выбранного в качестве физического прототипа производственного объекта со сложной технологической схемой;

разработка, исследование и тестирование интегрированных в единый цифровой двойник отдельных методов и алгоритмов искусственного интеллекта.

**Объектом исследования** принят симбиоз физического прототипа производственного объекта со сложной технологической схемой производства и разработанного для него единого интегрированного виртуального цифрового двойника.

**Предмет исследования** составляют концепции, методы и решения по созданию и оптимизации моделей и интерфейсов (соединений) между моделями, составляющими проекции единого цифрового двойника, а также концепции, методы и решения по созданию и оптимизации механизмов взаимодействия единого интегрированного цифрового двойника с физическим объектом-прототипом.

**Методы исследования.** В диссертационной работе использованы методы системного подхода, анализ и классификация типовых решений по автоматизации и цифровизации объекта, математическое моделирование, методы теории автоматического управления, вычислительные эксперименты, методы систематического программирования.

**Научная новизна диссертационного исследования** заключается в следующем:

разработана типовая концептуальная архитектура единого интегрированного цифрового двойника для производственного объекта со сложной технологической схемой производства;

разработана полная библиотека моделей всех основных категорий производственных активов и технологических процессов выбранного производственного комплекса, на основе которых создан многофункциональный единый интегрированный цифровой двойник, обеспечивающий повышение эффективности;

разработана структура взаимосвязей между ключевыми проекциями единого цифрового двойника: проекцией симуляции и оптимизации технологических процессов производственного объекта, проекцией управления производительностью активов, проекцией онлайн клона системы управления технологическими процессами и проекцией усовершенствованного управления технологическими процессами и оптимизации производства, обеспечивающая целостность интегрированного цифрового двойника и его эффективное функционирование в режиме реального времени;

на базе нескольких механизмов системы архивирования и обмена данными в режиме реального времени разработана специальная функция поддержки управления технологическим процессом, указывающая наиболее надежный источник данных;

впервые разработана полноценная модель цифрового двойника реактора синтеза Фишера-Тропша и соответствующая ей модель цифрового двойника симуляции процесса производства синтетического жидкого топлива по методу Фишера-Тропша;

определен набор перспективных методов и алгоритмов искусственного интеллекта для дальнейшего совершенствования проекций цифрового двойника.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

в рамках разработанной концептуальной архитектуры цифрового двойника для выбранного производственного объекта со сложной технологической схемой (производственный комплекс UzGTL)

разработаны и внедрены отдельные проекции цифрового двойника, разработаны и внедрены программные интерфейсы и интерфейсы между системами управления базами данных различных проекций цифровых двойников, разработаны и внедрены механизмы и интерфейсы обмена данными в онлайн-режиме между проекциями цифровых двойников и системой управления базами данных в режиме реального времени (СУБД БДРВ), а также системой АСУТП комплекса UzGTL напрямую;

применены и интегрированы в проекции цифрового двойника отдельные методы и алгоритмы искусственного интеллекта (в частности, алгоритм расширенного распознавания образов APR);

проведено тестирование разработанного и внедренного цифрового двойника и проработано несколько оптимизирующих сценариев, требующих внесения изменений в производственные процессы комплекса UzGTL, с гарантированным итоговым экономическим эффектом от данных изменений, доказанным соответствующими расчетами.

**Достоверность результатов исследования** обосновывается применением разработанного цифрового двойника на конкретном производственном объекте, достоверность результатов обосновывается согласованностью итогов теоретических и экспериментальных исследований, выполненных с использованием современных методов и средств, а также положительными результатами опытно-промышленных испытаний.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Научная значимость результатов исследования заключается в том, что оно представляет готовую к применению концептуальную архитектуру единого интегрированного цифрового двойника для производственного объекта со сложной технологической схемой производства, при этом обладающего способностью постоянного самосовершенствования и в достаточной степени открытого для совершенствования путем применения новых научных методик и алгоритмов искусственного интеллекта.

Практическая значимость результатов работы представляет собой разработанное, внедренное и протестированное программно-аппаратное решение единого интегрированного цифрового двойника, обеспечивающее экономический эффект в виде уменьшения количества дней незапланированных простоев предприятия и увеличения выхода требуемого целевого продукта.

**Внедрение результатов исследования.** Полученные научные результаты по развитию теории цифровых двойников производственных объектов внедрены в следующих формах:

структура единого интегрированного цифрового двойника, механизмы и интерфейсы обмена данными в онлайн-режиме между проекциями цифровых двойников и системой управления базами данных в режиме реального времени (СУБД БДРВ), реализованной на основе программно-аппаратной платформы РНД внедрены на ООО “UzGTL” (Справка АО “Узбекнефтегаз” №03-18-8-714 от 13 августа 2024г). В результате это

позволило сократить время, затрачиваемое на анализ информации о технологическом процессе;

разработаны модели с применением интегрируемых алгоритмов искусственного интеллекта и на их основе проекции цифровых двойников симуляции технологических процессов и управления производительностью активов внедрены на ООО «UzGTL» (Справка АО “Узбекнефтегаз” №03-18-8-714 от 13 августа 2024г). В результате это позволило сократить время принятия управленческого решения об изменении технологического режима;

проведено тестирование всех разработанных цифровых двойников и проработано несколько оптимизирующих сценариев, требующих внесения изменений в производственные процессы комплекса UzGTL (Справка АО “Узбекнефтегаз” №03-18-8-714 от 13 августа 2024г). В результате увеличился выход целевых продуктов на 2-3% и снизилось время незапланированных простоев завода.

**Апробация результатов исследования.** Результаты данного исследования были обсуждены на 4 международных и 2 республиканских научно-практических конференциях.

**Опубликованность результатов исследования.** По теме диссертации опубликовано 23 научные работы, в том числе 14 статей в журнальных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан к публикациям основных научных результатов докторских диссертаций (в 11 зарубежных и 3 республиканских журналах), также получено 3 свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 200 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснована актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы цель и задачи, выявлены объект и предмет исследования, определено соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан, изложены научная новизна и практические результаты исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыты научная и практическая значимость полученных результатов, приведены перечень внедрений в практику результатов исследования, список аprobаций результатов работы, сведения по опубликованным работам и структуре диссертации.

В первой главе «**Анализ современного состояния теории и практики создания цифровых двойников в системах индустриальной автоматизации**» представлен экскурс в понятия промышленного интернета вещей и Индустрии 4.0, закладывающих фундаментальные основы

инфраструктуры для построения цифровых двойников, далее приведен сравнительный анализ классической и современной архитектур систем промышленной автоматизации с упором на модель Пердью, открывающую новый спектр возможностей для цифровизации, даны общие понятия теории цифровых двойников, приведен непосредственно обзорный анализ различных программно-алгоритмических комплексов цифровых двойников, а также платформ для их интеграции, дано общее представление о современном состоянии теории и практики создания цифровых двойников в системах промышленной автоматизации.

В зависимости от поставленных задач и исходя из имеющейся на данном этапе производственной и организационной инфраструктуры предприятия цифровой двойник может представлять собой как простую математическую модель завода, симулирующую протекание отдельных технологических процессов, например, с целью безопасного тестирования новых технологических режимов, так и комплекс математических моделей, описывающих функционирование производственного объекта в различных ракурсах и проекциях, взаимодействующий в непрерывном режиме реального времени с самим производственным объектом и с облачными сервисами прогнозирующей аналитики с целью последующей мгновенной корреляции рекомендуемых управляющих действий на реальном производственном объекте.

Аналитическое облако – это интеграция в международное информационное пространство с возможностью мгновенного сравнения опыта функционирования своего объекта с аналогичным опытом функционирования других подобных объектов в мире. Это уникальная возможность постоянного доступа к экспертному мнению разработчиков и поставщиков, позволяющая решать любые проблемы на производстве в кратчайшие сроки. Наконец, это громадный аналитический аппарат, который в режиме реального времени собирает и анализирует данные множества производственных объектов на планете и вырабатывает оптимальное решение по улучшению ключевых показателей эффективности (КРП) бизнес-процессов предприятия.

Таким образом, аналитическое облако предоставляет возможность постоянного доступа к рекомендациям со стороны:

- экспертов-разработчиков и лицензиаров технологических процессов предприятия;

- экспертов-аналитиков, отслеживающих функционирование всех бизнес-процессов предприятия. Это позволяет пользователям извлечь больше ценности из своих данных, не ввязываясь в дорогие и длительные проекты анализа больших данных, а экспертам легко обнаружить аномальные шаблоны и установить их автоматическое отслеживание;

- поставщиков-производителей технологического оборудования, получающих таким образом информацию о конкретных единицах данного оборудования, эксплуатируемых в конкретных условиях того или иного производства и имеющих возможность сравнивать работу оборудования на

различных объектах, выдавать рекомендации пользователям по более эффективной эксплуатации оборудования, повышать производительность и срок службы оборудования. В результате руководство производственным объектом получает больше рабочих часов оборудования и меньше простоев, сокращение эксплуатационных расходов, сокращение стоимости замены элементов оборудования и использования запасных частей.

Одним из ключевых механизмов моделирования и создания фундаментальных проекций цифрового двойника для физического объекта является динамическое моделирование. Задача решается путем построения универсальных математических моделей, имитирующих протекание сложных высокотехнологичных процессов по различным сценариям. Такое моделирование позволяет выработать четкий алгоритм действий персонала и автоматизированной системы, применимый к различным ситуациям и, таким образом, априори превратить ситуацию в предвидимую, т. е. прогнозируемую. С другой стороны, сложность и специфика каждого конкретного технологического процесса обуславливают необходимость разработки отдельных моделей под каждый лицензируемый технологический процесс, а создание полноценного двойника сложного технологического процесса, в котором задействованы крупнотоннажные промышленные установки, сопряжено с созданием математической модели и сопутствующей программно-сетевой “облачной” инфраструктуры невероятного уровня сложности.

Вышеизложенные результаты анализа современного состояния теории и практики создания цифровых двойников обусловили постановку цели настоящей диссертационной работы, посвященной разработке и исследованию единых интегрированных цифровых двойников для промышленных объектов, построенных с использованием технологий искусственного интеллекта в качестве инновационных решений для последующего развития теории цифровых двойников.

Вторая глава диссертации «**Совершенствование цифрового двойника для принятия управлеченческих решений**» посвящена стратегии совершенствования цифрового двойника, заключающейся в разработке единого комплексного подхода для создания целостного мультипроекционного цифрового двойника для крупных производственных объектов. Для выполнения этой задачи цифровой двойник разложен на проекцию симуляции и оптимизации технологических процессов производственного объекта, проекцию управления производительностью активов, проекцию онлайн клона системы управления технологическими процессами, проекцию усовершенствованного управления технологическими процессами и оптимизации производства в целом. Рассмотрена структура взаимосвязей между различными проекциями цифровых двойников промышленного объекта и определены все интерфейсы интеграции множества моделей в единую систему цифрового двойника верхнего уровня.

Проекция цифрового двойника симуляции и оптимизации технологических процессов производственного объекта, являющаяся основой внедрения результатов настоящей диссертационной работы, усовершенствована за счет дальнейшей контекстуализации и точности настройки, нивелирования разницы между текущей и подстроенной моделью путем перманентного подставления обновленного коэффициента усиления и вектора линейного программирования, диверсификации различных режимов для различных вариантов использования, усовершенствования процедур очистки данных, согласования, обнаружения стационарного состояния и грубых ошибок, подключения и встраивания разрабатываемых методик и алгоритмов искусственного интеллекта и машинного обучения (BYOAI, BYOML). При разработке данной проекции были исследованы и частично применены следующие методики искусственного интеллекта:

- 1) Генетические алгоритмы (Genetic Algorithms). Генетические алгоритмы используют понятия естественного отбора и генетики для поиска оптимальных решений в пространстве параметров. В диссертационной работе они были использованы для оптимизации параметров моделируемого производственного оборудования и графика технологического процесса;
- 2) Муравьиные алгоритмы (Ant Colony Optimization). Муравьиные алгоритмы моделируют поведение муравьев при поиске оптимального пути и применяются для решения задач маршрутизации и оптимизации. В нашей работе были использованы для оптимизации потоков технологических процессов;
- 3) Методы оптимизации на основе алгоритмов симуляции отжига (Simulated Annealing). Симуляция отжига используется для поиска глобального оптимума в сложных пространствах параметров. В работе также были использованы для оптимизации параметров производственных процессов и построения связей с планированием производства;
- 4) Метод оптимизации на основе алгоритма частиц (Particle Swarm Optimization, PSO). PSO моделирует движение стаи частиц в пространстве параметров с целью нахождения оптимального решения. В работе был использован для оптимизации распределения ресурсов в производственных процессах;
- 5) Методы машинного обучения и обучения с подкреплением. Методы машинного обучения, такие как Q-обучение и обучение с подкреплением, могут применяться для оптимизации параметров управления в производственных системах. Один из основополагающих методов для совершенствования симулятора цифрового двойника, в работе был использован для симуляции адаптивного управления оборудованием для максимизации его производительности;
- 6) Генетическое программирование (Genetic Programming). Это метод эволюционной оптимизации, который применяется для поиска программных структур, представляющих оптимальные решения в

пространствах сложных задач. В работе был использован для автоматического создания оптимальных контрольных алгоритмов для производственной системы;

7) Кластерный анализ. Алгоритмы кластерного анализа позволяют группировать данные по схожим характеристикам, что может быть полезно для выявления закономерностей в производственных процессах. В работе были использованы для группировки данных о производственных циклах для выделения типов и определения оптимальных параметров;

8) Нейронные сети. Глубокие нейронные сети могут использоваться для моделирования сложных зависимостей в данных и оптимизации параметров производственных процессов. В работе были частично использованы для прогнозирования времени протекания технологического цикла и управление энергопотреблением в ходе выполнения технологического процесса;

9) Градиентный спуск (Gradient Descent). Градиентный спуск используется для минимизации функций. Он начинает с произвольного значения и итеративно двигается в направлении, противоположном градиенту функции с тем, чтобы достичь локального минимума. В исследовании был применен для настройки параметров в технологических процессах, минимизации затрат и времени технологического процесса;

10) Линейное программирование (Linear Programming, LP). LP решает задачи оптимизации с линейными ограничениями. Алгоритм стремится максимизировать или минимизировать линейную функцию от нескольких переменных при соблюдении системы линейных ограничений;

11) Квадратичное программирование (Quadratic Programming, QP). QP является расширением линейного программирования, включая квадратичные термины в целевую функцию. Задачи QP решаются для минимизации (или максимизации) квадратичной функции с линейными ограничениями;

12) Целочисленное программирование (Integer Programming, IP). IP решает задачи оптимизации с ограничениями на целочисленные переменные. Это используется, когда переменные представляют дискретные решения.

Проекция цифрового двойника управления производительностью активов (Asset Performance Management или APM) построена на библиотеке производственных активов, объединяющей три важнейших категории моделирования активов в шаблоны для конкретных активов – модели производительности, аналитические модели и модели работоспособности и неисправности (модели здоровья). Совершенствование данной проекции осуществляется при помощи использования методики расширенного распознавания образов (РРО или APR), представляющей собой один из основных методов машинного обучения, в основе которого лежит анализ и распознавание сложных паттернов в данных. Этот метод позволяет выявить

внутренние зависимости и тренды, которые могут быть использованы для оптимизации технологических процессов и оборудования.

Преимущества применяемого метода Advanced Pattern Recognition при совершенствовании проекции цифрового двойника АРМ:

- Высокая адаптивность: Advanced Pattern Recognition адаптируется к изменениям в данных и условиях производства, что делает его эффективным инструментом для динамичных сред;

- Выявление скрытых зависимостей: Алгоритмы распознавания паттернов могут выявлять сложные зависимости между различными переменными, которые не всегда очевидны при обычном анализе данных;

- Оптимизация производства: Распознавание паттернов позволяет выделить ключевые факторы, влияющие на производственные процессы, и использовать эту информацию для оптимизации производства;

- Автоматизация принятия решений: Результаты Advanced Pattern Recognition служат непосредственной основой для автоматизации принятия управленческих решений в реальном времени в системах управления производством.

Проекция онлайн клона автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУТП) создается на базе современных разработок и достижений в сфере технологий виртуализации и обеспечивает полную независимость цифрового двойника от реальной системы управления. Его функции включают обнаружение аномалий, автоматизированное управление изменениями, проверку соответствия конфигурации. В области проектирования это помогает устранить необходимость в доработках на месте, обеспечить качество исполнения, упростить обновление системной документации и предоставить исторический обзор изменений в системе управления. Что касается выполнения проекта и тестирования, то это централизует планирование и распределение ресурсов и обеспечивает наглядность проекта, улучшая совместную работу, помогая сократить командировочные расходы и время, снижая риски и обеспечивая соответствие детальным проектным спецификациям.

Помимо всего этого, в нем устраняются два фундаментальных недостатка традиционных лабораторных систем на месте: их склонность отклоняться от текущей настройки системы и их непрактичность для небольших систем. Но это также устраниет главный конфликт, который присутствует в таких системах в отношении доступа и безопасности.

Онлайн клон АСУТП отвечает на первоначально поставленные задачи и целевые показатели, которые можно обобщить как выводы и дополнительные преимущества внедрения технологии цифровых двойников для работающих промышленных СУТП.

Проекция усовершенствованного управления технологическими процессами (СУУТП) и оптимизации производства в целом обеспечивает оптимизацию более высокого уровня, которая включает в себя более широкий охват промышленного предприятия с учетом моделей доходности

и устраняет разрыв между планированием и контролем. Координирующий оптимизатор использует ранее существовавшую модель планирования доходности, чтобы получить исходную матрицу устойчивой выгоды, а соответствующую динамику модели конкретизирует на основе исторических операционных данных объекта. Он контролирует запасы продукции, производственную деятельность и качество продукции. Встроенный экономический оптимизатор с той же структурой модели планирования и экономикой воспроизводит автономную оптимизацию планирования в режиме онлайн и в реальном времени.

В третьей главе диссертации «**Разработка и исследование проекций цифровых двойников производственного объекта**» приводятся результаты разработки и исследования проекций единого интегрированного цифрового двойника для конкретного производственного объекта - комплекса по производству синтетических жидкых топлив UzGTL (г. Шуртан, Кашкадарьяинская область, Республика Узбекистан).

Производственный комплекс UzGTL (Uzbekistan Gas-to-Liquid) имеет сложную технологическую схему производства, согласно которой природный газ путем последовательных химических реакций превращается в синтетическую жидкую смесь углеводородов, из которой далее получаются топливные продукты высокой чистоты. Технологическая схема процесса включает автотермический реформинг, синтез Фишера-Тропша и гидрокрекинг / гидроочистку жидкое смеси углеводородов. В технологический цикл включено также некоторое дополнительное извлечение сжиженного углеводородного газа (СУГ).

Сложная технологическая схема производственного комплекса UzGTL, состоящая из максимально широкого набора производственных активов, известных на сегодняшний в день в современной промышленности, обусловила выбор автором именно этого производственного объекта в качестве объекта диссертационного исследования и разработки концепции цифрового двойника, которая в дальнейшем может быть применена практически на любом производственном объекте нефтегазовой и химической промышленности.

Концептуальная архитектура цифрового двойника производственного комплекса UzGTL, разработанная в рамках диссертационного исследования, приведена на рис. 1.

Обработанные и очищенные данные из системы БДРВ РНД передаются непосредственно в систему проекций цифрового двойника, являющуюся предметом настоящего диссертационного исследования.

Разработанная в рамках исследования система проекций цифрового двойника использует очищенные данные из системы БДРВ РНД для осуществления работы моделей технологического оборудования (проекция управления производительностью активов на базе программно-аппаратной платформы АРМ) и симуляции технологического процесса (проекция симуляции и оптимизации технологических процессов производственного объекта на базе программно-аппаратной платформы UNISIM).

## Персонализированные Экраны визуализации Цифрового Двойника

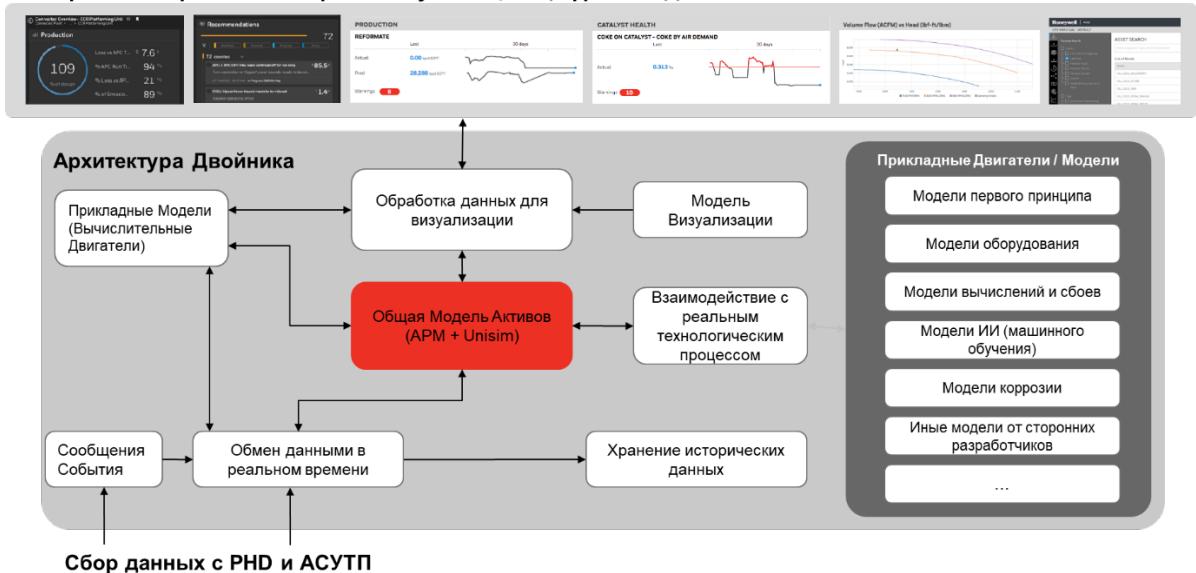


Рисунок 1. Концептуальная архитектура цифрового двойника производственного комплекса UzGTL.

Данная методика, разработанная в ходе настоящего диссертационного исследования, является первым прикладным применением концепции синхронизации цифрового двойника с физическим объектом-двойником с конкретным очевидным и доказанным технико-экономическим эффектом от внедрения предписаний цифрового двойника на реальном производственном комплексе UzGTL.

В рамках диссертационного исследования технологическая схема производственного комплекса UzGTL разбита на технологические блоки и далее на ключевые категории технологического и вспомогательного оборудования (производственные активы) для последующего моделирования:

- 1) Ротационное оборудование
  - Центробежные насосы
  - Поршневые насосы
  - Центробежные компрессоры
  - Поршневые компрессоры
  - Паровые турбины
- 2) Теплообменное оборудование
- 3) Печи и подогреватели
- 4) Воздухоохладительные системы
- 5) Колонны
- 6) Сепараторы и Скрубы
- 7) Реакторы, включая ключевые реакторы технологии GTL:
  - Реактор Фишера-Тропша
  - Реактор гидрокрекинга (изокрекинга)
  - Паровой реформер
- 8) Запорно-регулирующая арматура и фильтры
- 9) Коллекторы и манифольды

10) Адсорбера с молекулярными ситами и осушители.

Для каждой из категорий моделируемого оборудования и технологических подпроцессов определены измеряемые параметры, оказывающие влияние на производительность и работоспособность каждой единицы оборудования, контролируемые цифровым двойником для данной категории с сигнализацией в случае выхода работающего оборудования за пределы рабочего диапазона.

Для каждой из категорий моделируемого оборудования определены и запрограммированы ключевые показатели эффективности (КП), которые отслеживаются для оптимизации энергопотребления в модели цифрового двойника. Также определены показатели, помогающие отслеживать общую производительность данного производственного актива в ходе работы цифрового двойника.

Для ротационного оборудования предусмотрен контроль со стороны цифрового двойника на основании расчетных кривых производительности (см. рисунок 2).

При этом особый интерес представляют компоненты модели, отслеживающие ключевые параметры эффективности (КПЭ) рабочей объемной эффективности  $VE$  и мощности на валу  $W_{Shaft}$ , которые рассчитываются согласно следующим формулам:

$$VE = \eta_{Vol} = \left[ (100 - L) - \left( \frac{P_d}{P_s} \right) - C \left[ \frac{Z_s}{Z_d} \left( \frac{P_d}{P_s} \right)^{\frac{1}{k}} - 1 \right] \right] \quad (1)$$

Где  $P_d$  – давление на нагнетании, Па

$P_s$  – давление на всасе, Па

$L$  - влияние переменных факторов, таких как внутренняя утечка, трение газа, перепад давления через клапаны и предварительный нагрев газа на входе. Принимается 0,03 до 0,05 для компрессоров со смазкой и от 0,07 до 0,1 для компрессоров без смазки

$K$  - коэффициент теплоемкости газа,  $C_p/C_v$

$Z_d$  – фактор сжимаемости на нагнетании

$Z_s$  - фактор сжимаемости на всасе

$C$  - Процент зазора от объема поршня.

$$W_{Shaft} = \frac{2,78 \cdot 10^{-4}}{\eta} * \left( \frac{K}{K-1} \right) * Q_V * P_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right] \quad (2)$$

Где  $P_1, P_2$  – абсолютные давления на входе, кПа

$Q_V$  – объемный расход газа при условиях на входе, м<sup>3</sup>/ч

$\eta$  - ожидаемая эффективность (%).

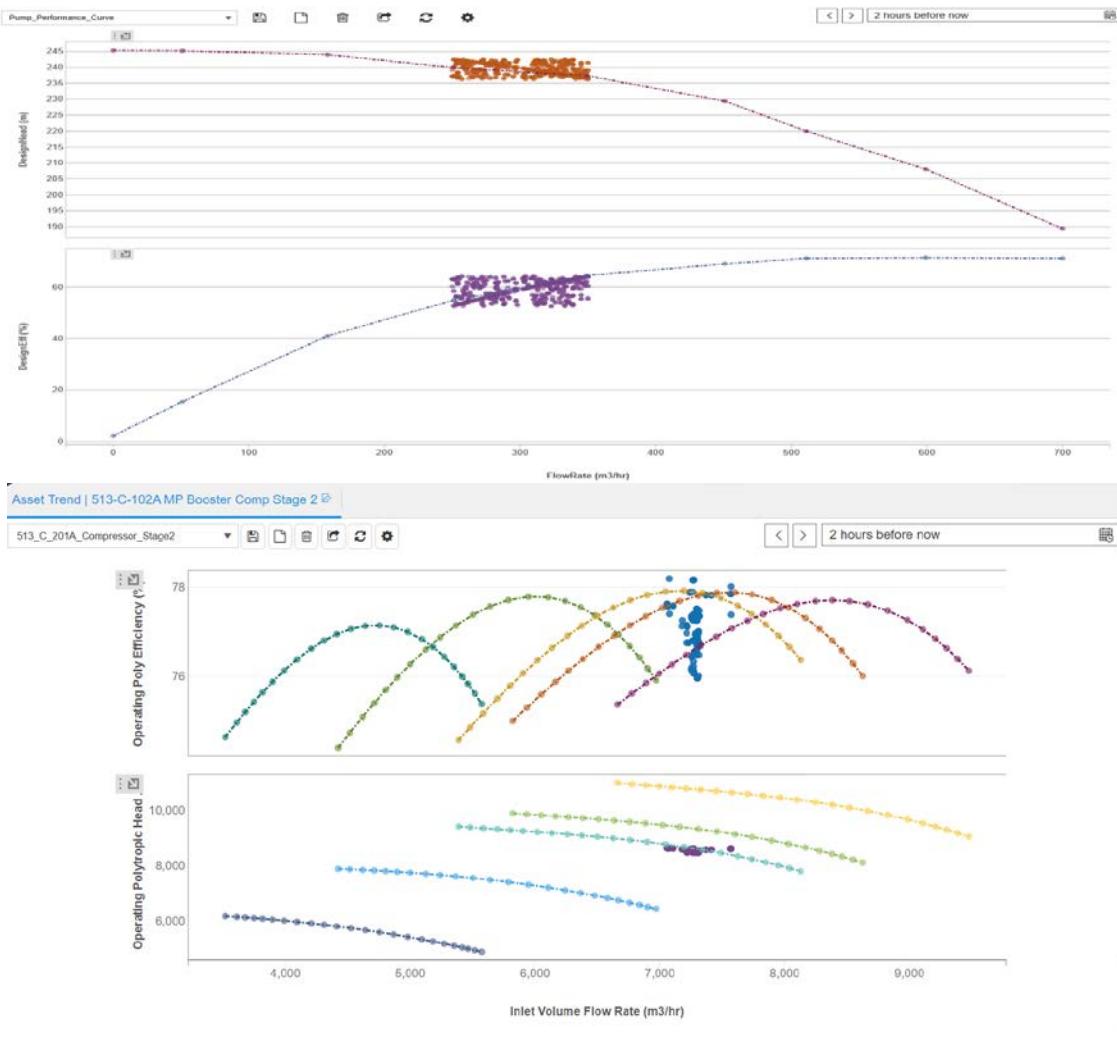


Рисунок 2. Смоделированные в цифровом двойнике кривые производительности ротационного оборудования.

В рамках разработки и исследования проекций цифрового двойника также созданы и встроены в структуру проекций двойника модели контроля работоспособности и выявления неисправностей активов. Результаты исследования включают в себя списки неисправностей и симптомов, смоделированных для актива с целью выявления возможных аномалий, влияющих на производительность или исправность актива.

Чтобы расчетные модели работали должным образом, подразумевается ввод некоторых исходных данных в модель. Входные данные модели актива/процесса состоят из измеренных данных и статических данных. Измеренные входные данные передаются в модель из АСУТП/БДРВ PHD путем сопоставления тегов. Для каждой из категорий моделируемого оборудования и технологических подпроцессов определены и включены в результаты диссертационного исследования входные и выходные параметры (атрибуты), заложенные в модель цифрового двойника, и их свойства. В результате цифровой двойник моделирует “дерево” симптомов и неисправностей (см. рисунок 3).

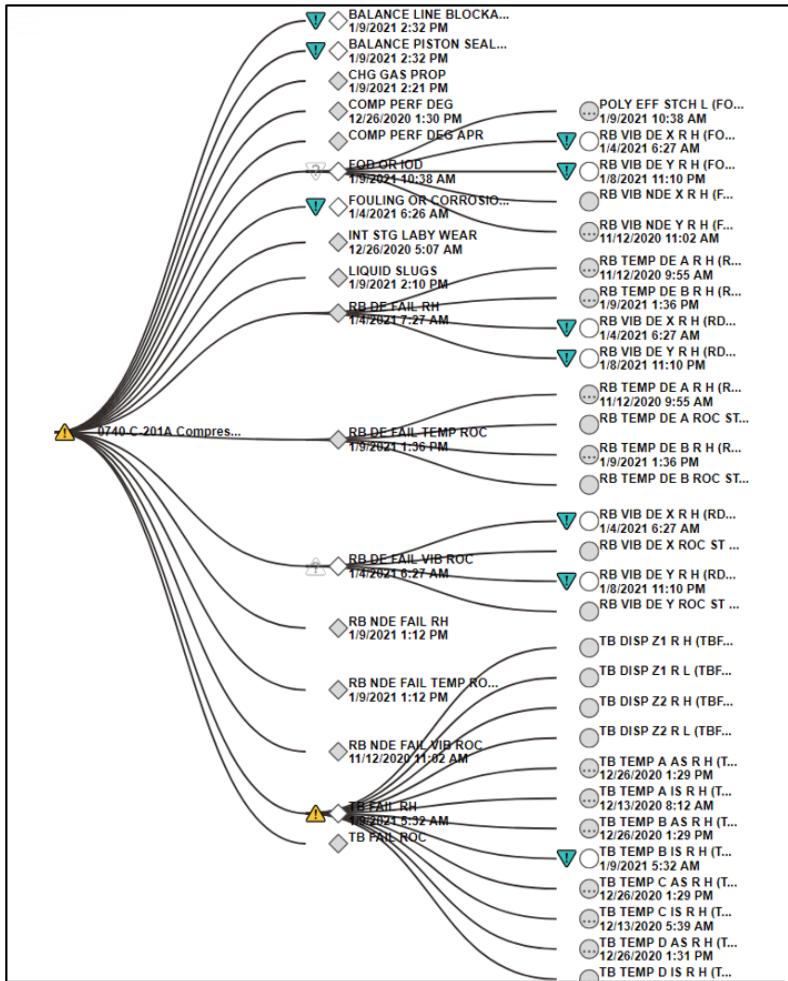


Рисунок 3. “Дерево” смоделированных симптомов и неисправностей для центробежных компрессоров.

Модели проекции мониторинга производственных активов требуют расчета термодинамических свойств, таких как энталпия, энтропия, плотность и удельная теплоемкость. Эти свойства рассчитываются и подставляются термодинамической моделью проекции симуляции технологических процессов. Таким образом обеспечивается одна из основных целей настоящего диссертационного исследования – комбинирование и обеспечение органичного автономного взаимодействия в режиме реального времени различных проекций единого цифрового двойника.

Особую сложность в рамках диссертационного исследования составило моделирование реакторов, входящих в состав производственного комплекса UzGTL.

В технологической схеме производственного комплекса UzGTL находятся три реактора, обеспечивающих течение соответствующих технологических процессов:

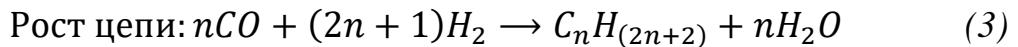
- Реактор парового реформинга (Steam Reformer) в технологическом блоке производства синтез-газа (Технологическая Установка Unit 20);
- Реактор процесса Фишера-Тропша (Fischer-Tropsch (или LTFT) Reactor) в технологическом блоке синтеза жидких углеводородов по реакции Фишера-Тропша (Технологическая Установка Unit 30);

- Реактор гидрокрекинга (Hydrocracker) в технологическом блоке переработки синтетической смеси жидких углеводородов (Технологическая Установка Unit 50).

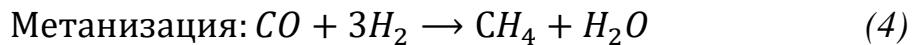
Создание цифровых двойников для реакторов различного типа является, с одной стороны, научно-инженерным процессом особой сложности и специфики, ввиду протекающих внутри данных аппаратов физико-химических и химических процессов, но, с другой стороны, данные процессы в полной мере определяют функционал данной категории производственных активов и, опираясь на результаты исследований и моделирования колонн и сепараторов, также являющихся объектом диссертационного исследования, цифровые двойники реакторов могут быть с достаточной степенью точности воссозданы в проекции симуляции технологических процессов и оптимизации производства.

При этом, конечно же, кинетика физико-химических и химических процессов, выбор катализатора, его размещение и свойства, оказывают определяющее влияние на конструкцию и режим работы реактора. Поэтому разработка и исследование цифрового двойника также индивидуальны для конкретного технологического процесса.

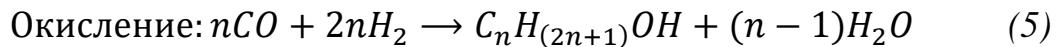
В этой связи в достаточной степени уникальны модели цифрового двойника реактора и соответствующего технологического процесса синтеза по методу Фишера Тропша, характеризующегося сложной кинетикой следующих одновременно протекающих химических реакций:



$$\Delta H (227^\circ\text{C}) = -165 \text{ кДж/моль, } \text{H}_2/\text{CO} = 2(n+1)/n$$



$$\Delta H (227^\circ\text{C}) = -215 \text{ кДж/моль, } \text{H}_2/\text{CO} = 3$$



$$\Delta H (227^\circ\text{C}) = -134 \text{ кДж/моль, } \text{H}_2/\text{CO} = 2$$

Вся трубопроводная инфраструктура производственного комплекса смоделированы стандартными средствами библиотеки программного обеспечения Unisim в проекции симуляции технологических процессов. Библиотека программного обеспечения Unisim включает в себя все необходимые инструменты моделирования широкого спектра ситуаций с трубопроводами, начиная от однофазных или многофазных потоков с тщательной оценкой теплопередачи и заканчивая участками с замкнутым трубопроводом большой емкости. Библиотека включает несколько методик расчета для учета перепада давления в элементе трубопроводной инфраструктуры, использованных в рамках диссертационного исследования:

- Методика Азиза, Говье и Фогараси
- Методика Баксендела и Томаса

- Методика Беггса и Брилла
- Методика Данса и Роса
- Методика Грегори, Азиза и Мандэйна
- Методика Хагедорна и Брауна
- Методика OLGAS\_2P на базе специализированного ПО OLGA
- Методика OLGAS\_3P на базе специализированного ПО OLGA
- Методика Оркижевского
- Методика Поэтмана и Карпентера
- Методика корреляции на шламовые примеси
- Методика Tulsa 99 от университета Талсы
- Стандартные методики гомогенного потока
- Методика скольжения жидкости.

**Четвертая глава диссертации «Развитие теории цифровых двойников производственных объектов со сложной технологической схемой производства»** посвящена исследованию и определению наиболее перспективных направлений развития взаимосвязей между проекциями цифрового двойника и методов дальнейшего совершенствования проекций цифрового двойника.

Обозначено направление интеграции проекции онлайн клона системы управления технологическими процессами в концептуальную архитектуру единого интегрированного цифрового двойника, уже построенную на комбинировании и взаимодействии проекций симуляции технологических процессов и управления производительностью активов (рис.1). Такая интеграция обеспечит абсолютное нивелирование всех погрешностей, связанных с недостоверностью или неопределенностью входных данных из БДРВ, передаваемых в единый цифровой двойник.

Обозначено направление интеграции в концептуальную архитектуру единого интегрированного цифрового двойника проекции усовершенствованного управления технологическими процессами (УУТП) и оптимизации производства в целом. Интеграция с моделью планирования производства обеспечит максимально чувствительное реагирование цифрового двойника на ежедневные изменения конъюнктуры рынка и принятие максимально эффективного управленческого решения в каждой конкретной производственной ситуации.

Развитие теории цифровых двойников в целом и особенно цифровых двойников производственных объектов со сложной технологической схемой производства, также тесно связано с развитием и совершенствованием каждой из проекций цифрового двойника объекта. Данный вектор сопряжен с внедрением новых технологий и методик в области цифровизации и искусственного интеллекта.

В главе исследованы и определены перспективными для совершенствования проекции УУТП цифрового двойника методы искусственного интеллекта, основанные на алгоритмах Экстремального градиентного бустинга XGBoost, Дифференциальной Эволюции (DE) и Кластеризации HDBSCAN. Разработана обновленная архитектура интеграции

алгоритмов искусственного интеллекта в цифровой двойник УУТП для его совершенствования (см. рис. 4).

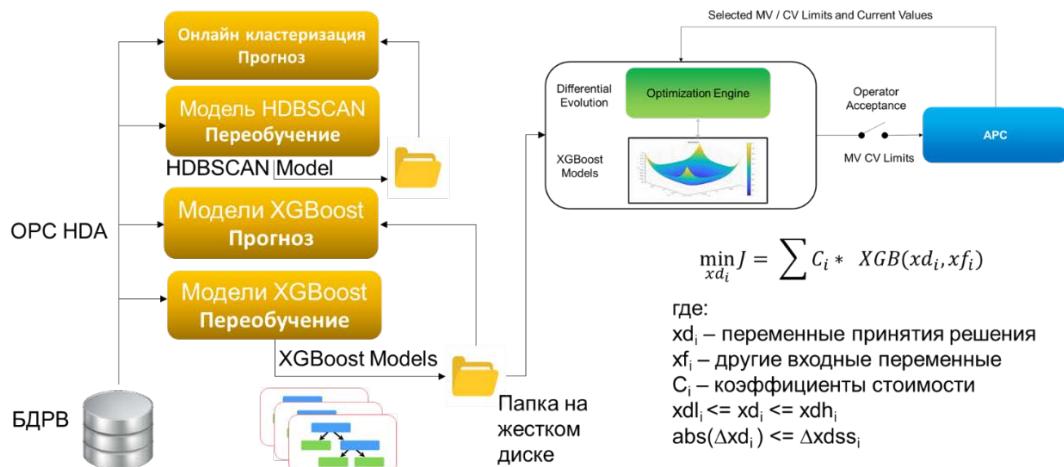


Рисунок 4. Применение архитектуры алгоритмов искусственного интеллекта для дальнейшего усовершенствования цифрового двойника УУТП.

В главе исследовано и определено перспективным направление совершенствования проекции симуляции технологических процессов (ТП), заключающееся в подключении и встраивании разрабатываемых методик и алгоритмов искусственного интеллекта и машинного обучения (BYOAI, BYOML). Оно заключается в создании гибридных моделей цифровых двойников симуляции технологического процесса (ТП), комбинирующих создаваемые классические цифровые двойники ТП, основанные на моделях первого принципа, с моделями, создаваемыми искусственным интеллектом.

Исследование, разработка и применение методов и алгоритмов искусственного интеллекта позволяет создавать так называемые модели пониженного порядка (Reduced Order Models, ROM), которые можно интегрировать в цифровые двойники. Модели ROM представляют собой упрощение высокоточной динамической модели, сохраняющее существенное поведение и доминирующие эффекты с целью сокращения времени решения или емкости памяти, необходимой для более сложной модели.

Метод ROM позволяет строить эмпирические модели, учитывающие множество сценариев симуляции технологического процесса, а также весь набор статистических данных не только от данного физического объекта цифрового двойника, но и от аналогичных объектов, а также экспертизу производителей оборудования и управляющего персонала физических объектов.

Также в главе исследован и определен перспективным набор алгоритмов искусственного интеллекта для совершенствования системы планирования производства и поставок продукции. Применение алгоритмов искусственного интеллекта для совершенствования системы планирования производства и поставок продукции относится скорее к смежным по отношению к настоящему диссертационному исследованию научным дисциплинам, в рамках которых на сегодняшний день уже достигнут заметный прогресс в

применении искусственного интеллекта, накоплен большой разносторонний научный опыт и опубликовано огромное количество научных трудов.

И хотя данные научные исследования и инженерные разработки не обеспечивают конкретного научного результата с точки зрения повышения эффективности самого цифрового двойника производственного объекта со сложной технологической схемой, их применение в комбинации с полученными в рамках настоящего диссертационного исследования результатами, безусловно является очевидным и обязательным элементом тотальной цифровизации производственного объекта и направлением дальнейшего развития теории цифровых двойников производственных объектов со сложной технологической схемой производства, в том числе применительно к исследованному объекту производственного комплекса UzGTL.

В пятой главе диссертации «**Результаты внедрения цифрового двойника на производственном комплексе UzGTL**» приведены конкретные результаты внедрения предмета диссертационного исследования на производственном объекте UzGTL.

В результате внедрения разработанного цифрового двойника производственного комплекса UzGTL:

- снижается (а в некоторых фазах технологического процесса и вовсе исключается за счет автоматизации функции) время, затраченное на оперативный анализ информации о технологическом процессе;

- снижается (а в некоторых фазах технологического процесса и вовсе исключается за счет автоматизации функции) время, затраченное на принятие управленческого решения о внесении изменений в технологический режим (или в саму технологическую схему) комплекса на основании оперативного анализа информации о технологическом процессе и анализа результатов симуляции различных гипотетических сценариев более оптимального протекания технологического процесса;

- увеличивается выход требуемого целевого продукта на основании оптимизирующих изменений в технологический режим (или в саму технологическую схему) комплекса;

- снижается время незапланированных простоев комплекса, что достигается путем предупреждения сбоев на основании оперативного анализа информации о технологическом процессе, анализа результатов симуляции различных гипотетических сценариев ТП и анализа эффективности работы технологического оборудования.

Архитектура ПТК OTS, на базе которого реализован цифровой двойник производственного комплекса UzGTL, приведена на рис. 5.

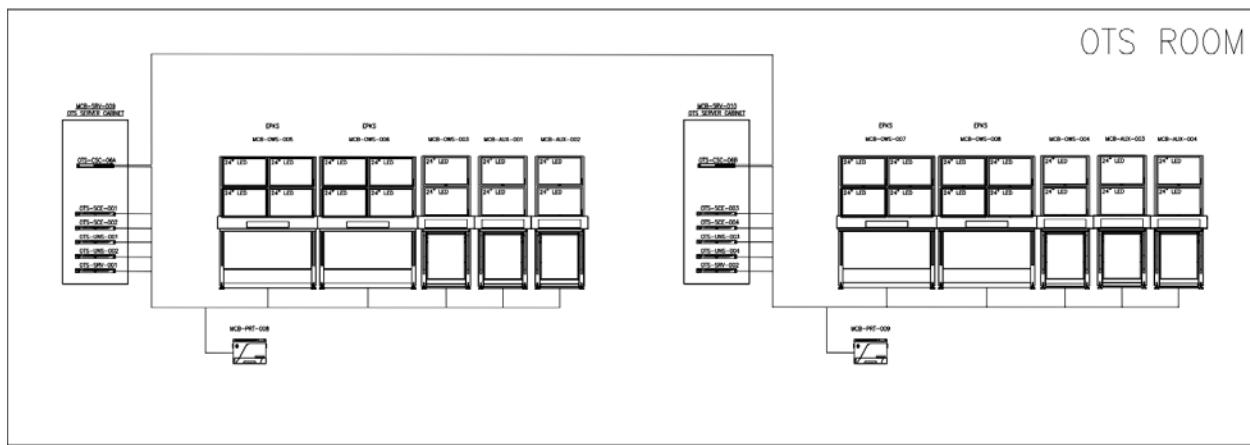


Рисунок 5. Архитектура ПТК OTS, на базе которого реализован цифровой двойник производственного комплекса UzGTL.

Экономический эффект от внедрения цифрового двойника для производственного комплекса UzGTL является доказанным заключением диссертационной работы. К диссертации прилагается расчет экономической эффективности от реализации некоторых элементов концепции цифрового двойника на производственном комплексе UzGTL.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации на основе теории создания цифровых двойников, системного подхода, анализа и классификация типовых решений по автоматизации и цифровизации объекта, математического моделирования, методов теории автоматического управления, вычислительных экспериментов и методов систематического программирования разработан единый интегрированный цифровой двойник производственного объекта с технологической схемой высокой сложности.

В итоге получены следующие научные результаты:

1. Произведен тщательный литературный обзор и проведен детальный анализ современного состояния теории и практики создания цифровых двойников в системах промышленной автоматизации.

2. В разных аспектах исследована структура цифрового двойника для производственного объекта, произведено разложение структуры на проекции, произведен анализ значимости и влияния отдельных проекций на эффективность итоговой концепции единого цифрового двойника для производственных объектов со сложной технологической схемой производства.

3. Приведен обзор методов и алгоритмов искусственного интеллекта, использованных и предлагаемых в дальнейшем к исследованию и использованию в виде интеграции в структуру цифровых двойников для производственных объектов с целью повышения эффективности работы цифровых двойников.

4. Разработаны концепция и концептуальная архитектура цифрового двойника для производственного комплекса UzGTL (Кашкадарьянская

область, Республика Узбекистан), которые ввиду сознательного изначального выбора объекта исследования, характеризующегося максимально широким набором производственных активов, известных на сегодняшний в день в современной промышленности, и особо сложной и специфической технологической схемой производства, могут считаться универсально методичными и быть применены на любом производственном объекте нефтегазовой, нефтегазохимической и химической промышленности.

5. В рамках разработанной концептуальной архитектуры цифрового двойника для производственного комплекса UzGTL разработаны и исследованы проекции цифрового двойника, разработаны и внедрены программные интерфейсы и интерфейсы между системами управления базами данных различных проекций цифровых двойников, разработаны и внедрены механизмы и интерфейсы обмена данными в онлайн-режиме между проекциями цифровых двойников и системой управления базами данных в режиме реального времени (СУБД БДРВ), реализованной на основе программно-аппаратной платформы РНД, а также системой АСУТП комплекса UzGTL напрямую.

6. В ходе создания проекций цифрового двойника для производственного комплекса UzGTL разработаны и запущены модели всех основных категорий производственных активов и всех основных технологических процессов производственного комплекса UzGTL, применены и интегрированы в проекции цифрового двойника отдельные методы и алгоритмы искусственного интеллекта (алгоритм расширенного распознавания образов APR).

7. Проведено тестирование всех разработанных цифровых двойников и проработано несколько оптимизирующих сценариев, требующих внесения изменений в производственные процессы комплекса UzGTL, с гарантированным итоговым экономическим эффектом от данных изменений, доказанным соответствующими расчетами.

8. Исследованы направления дальнейшего совершенствования цифрового двойника как в отдельности для производственного комплекса UzGTL, так и в целом с точки зрения развития теории цифровых двойников производственных объектов со сложной технологической схемой производства.

9. Предложен набор перспективных с точки зрения соискателя методов и алгоритмов искусственного интеллекта для дальнейшего совершенствования проекций цифрового двойника производственного объекта со сложной технологической схемой производства.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.03/30.12.2019.T.03.02**  
**ON THE ADMISSION OF SCIENTIFIC DEGREES AT THE**  
**TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY**  
**TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY**

---

**IVANYAN ARSEN IGNATEVICH**

**DEVELOPMENT OF THE THEORY OF DIGITAL TWINS OF  
PRODUCTION FACILITIES USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE  
TECHNOLOGIES**

**05.01.08 - Automation and control of technological processes and manufactures**

**ABSTRACT OF THE DISSERTATION OF  
DOCTOR OF SCIENCE (DSc) ON TECHNICAL SCIENCES**

**The theme of doctoral (DSc) dissertation is registered at the Supreme Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under number B2024.2.DSc/T790.**

The dissertation was completed at the Tashkent State Technical University.

The abstract of dissertation is posted in three languages (uzbek, russian, english (resume)) is placed on the web-page of Scientific Council ([www.tdtu.uz](http://www.tdtu.uz)) and Information and Educational Portal «Ziyonet» ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)).

**Scientific consultant:**

**Adilov Farukh Tulkunovich**

doctor of technical sciences, professor

**Official opponents:**

**Igamberdiyev Khusan Zakirovich**

doctor of technical sciences, professor, academician

**Marakhimov Avazjon Rakhimovich**

doctor of technical sciences, professor

**Musayev Muhammadjon Maxmudovich**

doctor of technical sciences, professor

**Leading organization:**

**JSC "O'ZLITINEFTGAZ"**

Defense of dissertation will take place in «9» 11 2024 at 10<sup>00</sup> o'clock at a meeting of the scientific council DSc.03/30.12.2019.T.03.02 at the Tashkent state technical university (Address: 100095, Tashkent, str. University-2, tel.: (99871) 246-46-00; fax: (99871) 227-10-32; e-mail: [tstu\\_info@tdtu.uz](mailto:tstu_info@tdtu.uz)).

The doctoral dissertation could be reviewed at the Information-resource center of Tashkent state technical university (registration number 401). (Address: 100095, Tashkent, str. University-2, tel.: (99871) 207-14-70).

Abstract of the dissertation distributed «21» 10 2024 year.  
(mailing report №17, on «17» 09 2024 year).



**N.R. Yusupbekov**

Chairman of Scientific Council  
on awarding scientific degrees,  
doctor of technical sciences, professor, academician

**U.F. Mamirov**

Scientific Secretary of Scientific Council,  
on awarding scientific degrees,  
doctor of technical sciences, professor

**Kh.Z. Igamberdiyev**

Chairman of the Academic Seminar under the  
Scientific Council on awarding scientific degrees,  
doctor of technical sciences, professor, academician

## INTRODUCTION (abstract of DSc thesis)

**The aim of the research** is to develop and study conceptual architecture of a holistic integrated digital twin, which would be sufficiently universal for use at any facility of the oil, gas and chemical industries with a complex technological production scheme, while ensuring a guaranteed annual technical and economic effect of implementation.

**The object of the research** is a symbiosis of a physical prototype of a production facility with a complex technological scheme of production and a holistic integrated virtual digital twin developed for it.

**The scientific novelty** of the dissertation research is as follows:

a typical conceptual architecture of a holistic integrated digital twin has been developed for a production facility with a complex technological production scheme;

a complete library of models of all the main categories of production assets and technological processes of the selected production complex has been developed, on the basis of which a multifunctional holistic integrated digital twin has been created, ensuring an increase in the efficiency;

a structure of relationships between key projections of a holistic digital twin has been developed: a projection of simulation and optimization of technological processes of a production facility, a projection of asset performance management, a projection of an online clone of a process control system and a projection of advanced process control and production optimization, ensuring the integrity of the integrated digital twin and its effective operation in real time mode;

based on several mechanisms of the archivation and real-time data exchange system, a special process control support function has been developed, indicating the most reliable data source;

for the first time, a full-fledged Fischer-Tropsch synthesis reactor model and a corresponding simulation model for the production process of synthetic liquid fuels using the Fischer-Tropsch method have been developed;

a set of promising artificial intelligence methods and algorithms for further improvement of digital twin projections has been identified.

**Implementation of the research results.** The obtained scientific results on the development of the theory of digital twins of production facilities are implemented in the following forms:

the structure of a single integrated digital twin, mechanisms and interfaces for online data exchange between digital twin projections and a real-time database management system (RTDB DBMS) implemented on the basis of the PHD software and hardware platform were implemented at “UzGTL” LLC (Reference of Uzbekneftegaz JSC No.03-18-8-714 dated August 13, 2024). As a result, this reduced the time spent on analyzing information about the technological process;

The developed models using integrable artificial intelligence algorithms and based on them the projection of digital twins of simulation of technological processes and asset performance management were implemented at “UzGTL” LLC (Reference of Uzbekneftegaz JSC No.03-18-8-714 dated August 13, 2024). As a

result, it allowed to reduce the time for making a management decision on changing the technological regime;

testing of all developed digital twins was carried out and several optimizing scenarios were worked out that require changes to the production processes of the UzGTL complex (Reference of Uzbekneftegaz JSC №03-18-8-714 dated August 13, 2024). As a result, the output of target products increased by 2-3% and the unplanned downtime of the plant decreased.

**The structure and scope of the dissertation.** The dissertation consists of an introduction, five chapters, conclusion, references, and appendices. The volume of the dissertation is 200 pages.

**ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**

**I бўлим (Часть I; Part I)**

1. Yusupbekov, N.R., Abdurasulov, F.R., Adilov, F.T., Ivanyan, A.I. Improving the Efficiency of Industrial Enterprise Management Based on the Forge Software-analytical Platform // Springer Nature Switzerland AG 2022 K. Arai (Ed.): Intelligent Computing, LNNS 283, pp. 1107–1113, 2022. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-80119-9\\_74](https://doi.org/10.1007/978-3-030-80119-9_74). (3, Scopus, IF 0,54)
2. Yusupbekov, N.R., Abdurasulov, F.R., Adilov, F.T., Ivanyan, A.I. Industrial Asset Optimization based on example of Digital Twin for Fired Heaters Asset Category // Springer Nature Switzerland AG 2022 C. Kahraman et al. (Eds.): INFUS 2021, LNNS 307, pp. 477–482, 2022. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-85626-7\\_56](https://doi.org/10.1007/978-3-030-85626-7_56). (3, Scopus, IF 0,6)
3. Yusupbekov, N.R., Adilov, F.T., Ivanyan, A.I. Application of Digital Twin theory for improvement of natural gas treatment unit // In: Aliev R.A., Kacprzyk J., Pedrycz W., Jamshidi M., Babanli M., Sadikoglu F.M. (eds) 11th International Conference on Theory and Application of Soft Computing, Computing with Words and Perceptions and Artificial Intelligence - ICSCCW-2021. ICSCCW 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 362. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-92127-9\\_68](https://doi.org/10.1007/978-3-030-92127-9_68). (3, Scopus, IF 0,9)
4. Yusupbekov, N.R., Adilov, F.T., Ivanyan, A.I. Development of Digital Twin for Centrifugal Rotating equipment Assets // C. Kahraman et al. (Eds.): INFUS 2022, LNNS 505, pp. 446–455, 2022. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-09176-6\\_51](https://doi.org/10.1007/978-3-031-09176-6_51). (3, Scopus, IF 0,6)
5. Yusupbekov, N.R., Adilov, F.T., Ivanyan, A.I., Astafurov M.F. Remote access and management of plants experience during pandemic time across the world // C. Kahraman et al. (Eds.): INFUS 2022, LNNS 505, pp. 308–316, 2022. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-09176-6\\_36](https://doi.org/10.1007/978-3-031-09176-6_36). (3, Scopus, IF 0,6)
6. Yusupbekov, N.R., Adilov, F.T., Ivanyan, A.I. Digitization of Centrifugal Compressor Asset as one of key elements of overall Digitized Industrial Plant // In: R. A. Aliev, J. Kacprzyk, W. Pedrycz, Mo. Jamshidi, M. B. Babanli, F. Sadikoglu. 15th International Conference on Applications of Fuzzy Systems, Soft Computing and Artificial Intelligence Tools - ICAFS 2022, LNNS 610, pp. 579–587, Springer Nature Switzerland AG 2023, 2023. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-25252-5\\_76](https://doi.org/10.1007/978-3-031-25252-5_76). (3, Scopus, IF 0,54)
7. Adilov, F.T., Juraev, T.T., Ivanyan, A.I., Aytbaev J. The Algorithm of logical control of processes in the distillation column of the Deethanizer // Chemical Technology, Control and Management: Vol. 2022, N4-5 (106-107, Special Issue), WCIS-2022, ISSN 1815-4840, E-ISSN 2181-1105, pp. 10-13. (05.00.00, №12, Scopus, OAK ning 30.09.22 yildagi 471-son Qarori)
8. Ivanyan, A.I. Building a digital twin using virtual prototyping // Chemical Technology, Control and Management: Vol. 2022, N3 (105), pp. 43-47. (05.00.00,

№12)

9. Yusupbekov, N.R., Adilov, F.T., Ivanyan, A.I. Application of Digital Twin technology for live Process Control System of industrial facility // Springer Nature Switzerland AG 2023 C. Kahraman et al. (Eds.): INFUS 2023, LNNS 759, pp. 37–44, 2023. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-39777-6\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-031-39777-6_5). (3, Scopus, IF 0,6)
10. Yusupbekov, N.R., Abdurasulov, F.R., Adilov, F.T., Ivanyan, A.I. Application of digital twin technologies in mining industrial branch // «International Conference on Geotechnology, Mining and Rational Use of Natural Resources – GeoTech-2023» (Навои, 16-17 июня 2023 г.). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341705016>. (3, Scopus, IF 0,4)
11. Yusupbekov, N.R., Adilov, F.T., Ivanyan, A.I., Astafurov M.F. Honeywell Experion Hive as breakthrough approach in control systems evolution // Springer Nature Switzerland AG 2023 C. Kahraman et al. (Eds.): INFUS 2023, LNNS 759, pp. 19–25, 2023. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-39777-6\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-39777-6_3). (3, Scopus, IF 0,6)
12. Yusupbekov, N.R., Adilov, F.T., Ivanyan, A.I., Astafurov M.F. Honeywell PROFIT® BLENDING AND MOVEMENT Commissioning Experience at Offshore Terminal // Springer Nature Switzerland AG 2024 R. A. Aliev et al. (Eds.): WCIS 2022, LNNS 912, pp. 240–248, 2024. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-53488-1\\_29](https://doi.org/10.1007/978-3-031-53488-1_29). (3, Scopus, IF 0,54)
13. Yusupbekov, N.R., Abdurasulov, F.R., Ivanyan, A.I., Aytbaev J. Development and Optimization of Digital Twin Model for the Deethanizer Distillation Unit // Springer Nature Switzerland AG 2024 R. A. Aliev et al. (Eds.): WCIS 2022, LNNS 912, pp. 118–124, 2024. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-53488-1\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-031-53488-1_14). (3, Scopus, IF 0,54)
14. Yusupbekov, N.R., Abdurasulov, F.R., Adilov, F.T., Ivanyan, A.I. Concepts and Methods of “Digital Twins” Models Creation in Industrial Asset Performance Management Systems // In: Kahraman C., Cevik Onar S., Oztaysi B., Sari I., Cebi S., Tolga A. (eds) Intelligent and Fuzzy Techniques: Smart and Innovative Solutions. INFUS 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1197. Springer, Cham, pp. 1589–1595 (2020). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-51156-2\\_185](https://doi.org/10.1007/978-3-030-51156-2_185). (3, Scopus, IF 0,6)

## II бўлим (Часть II; Part II)

15. Адилов, Ф.Т., Иваньян, А.И. Создание цифровой инфраструктуры промышленного предприятия на основе передовых информационно-коммуникационных технологий на примере Устюртского газо-химического комплекса / «Yangi O‘zbekistonda islohotlarni amalga oshirishda zamonaviy axborot-kommunikatsiya texnologiyalaridan foydalanish» mavzusida Xalqaro ilmiy-amaliy konferentsiya. Andijon, 27-29.10.2021, pp.337-342.

16. Adilov, F.T., Ivanyan, A.I. Mathematical Statistical Model-based Advanced Process Control Technology in application for Polymers Production Processes / Abstracts of the VII International Scientific Conference “Modern problems of applied mathematics and Information technologies Al-Khwarizmi

2021” dedicated to the 100th anniversary of the academician Vasil Kabulovich Kabulov, 15-17 November, 2021, Fergana, Uzbekistan, p.174.

17. Юсупбеков, Н.Р., Адилов, Ф.Т., Иваньян, А.И. Тенденции развития цифровых двойников / Proceedings of the international conference on Integrated innovative development of Zarafshan region: achievements, challenges, and prospects. 27-28 October 2022, Navoi, Uzbekistan. Volume II, pp.3-10.

18. Yusupbekov, N.R., Adilov, F.T., Ivanyan, A.I. Some aspects of implementation of Artificial Intelligence technology in industrial Digital Twin / Proceedings of the IV-international conference on Integrated innovative development of Zarafshan region: achievements, challenges, and prospects. 16-17 November 2023, Navoi, Uzbekistan. Volume II, pp.3-4.

19. Юсупбеков, Н.Р., Абдурасулов, Ф.Р., Адилов, Ф.Т., Иваньян, А.И. Повышение Эффективности Управления Промышленным Предприятием На Базе Программно-Аналитической Платформы Forge / Гибридные и синергетические интеллектуальные системы: материалы V Всероссийской Поспеловской конференции с международным участием / под ред. д-ра техн. наук, проф. А. В. Колесникова [Электронный ресурс]: научное электронное издание. — Калининград: Издательство БФУ им. И. Канта, 2020, ISBN 978-5-9971-0614-0, стр. 392–397.

20. Yusupbekov, N., Adilov, F., Astafurov, M., Ivanyan, A. Design of distributed Architecture of Refinery Complexes Control Systems by “Al Zour Refinery” Ehample // In: Arai, K. (eds) Advances in Information and Communication. Future of Information and Communication Conference (FICC 2022). Lecture Notes in Networks and Systems, vol 439. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-98015-3\\_41](https://doi.org/10.1007/978-3-030-98015-3_41).

21. Шокуров М.Е., Мирвалиев Р.М., Мартынов К.А., Иваньян А.И., Адилов Ф.Т., Абдурасулов Ф.Р. Программа автоматического управления системой первичной фильтрации парафинистой смеси синтетических углеводородов в реакторе на основе технологии Фишера-Тропша. // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № DGU 32672 от 20.01.2024 г.

22. Тиллахуджаев И., Низомов М.Р., Шокуров М.Е., Иваньян А.И., Адилов Ф.Т. Программа последовательного автоматического управления листовыми фильтрами и вспомогательным оборудованием для очистки парафинистой смеси синтетических углеводородов. // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № DGU 33088 от 05.02.2024 г.

23. Астафуров М.Ф., Адилов Ф.Т., Иваньян А.И. MAN Diesel Turbo-dan ikki pallali ultra yuqori bosimli turbinali kompressorni bog'langan gaz quyish moslamasida (GIC) avtomatik yoki yarim avtomatik ishga tushirish dasturi. // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № DGU 40832 от 27.06.2024 г.

Автореферат “Technical science and innovation” илмий журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилди ҳамда ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнларини мослиги текширилди.

Бичими: 84x60  $\frac{1}{16}$ . «Times New Roman» гарнитураси.

Рақамли босма усулда босилди.

Шартли босма табоғи: 4. Адади 100. Буюртма № 63/21.

Гувоҳнома № 851684.

«Tipograff» МЧЖ босмахонасида чоп этилган.

Босмахона манзили: 100011, Тошкент ш., Беруний кўчаси, 83-уй.