

e-ISSN 3060-5059

DOI: 10.67227



IJTIMOIIY-GUMANITAR SOHADA ILMIY-INNOVATSION TADQIQOTLAR

ILMIY METODIK JURNAL

Scientific and Innovative Research in
Social and Humanitarian Studies

Vol. 3 • Issue 10

2026



Founded in 2024



publishscience.uz



publish_science_journal@mail.ru



PEER REVIEWED • OPEN ACCESS

RAQAMLI EGIZAK TEXNOLOGIYASINING “AVTOMATIK BOSHQARISH NAZARIYASI” FANIDAN LABORATORIYA MASHG‘ULOTLARIDAGI DIDAKTIK IMKONIYATLARI

Yangiboyeva Raxbaroy Mashrabboy qizi

Andijon davlat texnika instituti, tayanch doktorant.

e-mail: yrakhbaroyaziza@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8421-0706>

Annotatsiya.

Maqolada raqamli egizak texnologiyasining “Avtomatik boshqarish nazariyasi” fanidan laboratoriya mashg‘ulotlarida virtual va real tajribalarni integratsiyalash vositasi sifatidagi imkoniyatlari tahlil qilingan. Raqamli egizak tushunchasining rivojlanishi, uning raqamli model va raqamli soyadan farqlari hamda ta’limdagi funksiyalari umumlashtirilgan. Laboratoriya ta’limidagi didaktik imkoniyatlar tasniflanib, fan bo’limlari, o’quv maketlari va ularning raqamli modellari o’rtasidagi muvofiqlik belgilangan. O’zgarmas tok dvigateli tezligini rostdlash misolida “model – real tajriba – taqqoslash – aniqlashtirish” sikliga asoslangan namunaviy laboratoriya ishining tuzilmasi taklif etilgan.

Kalit so’zlar: raqamli egizak; avtomatik boshqarish nazariyasi; laboratoriya mashg‘uloti; raqamli soya; o’quv maketi; identifikatsiya; PID rostdlagich.

ДИДАКТИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА НА ЛАБОРАТОРНЫХ ЗАНЯТИЯХ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ»

Янгибоева Рахбарой Машраббой кизи

Андижанский государственный технический институт, докторант.

Аннотация.

В статье проанализированы возможности технологии цифрового двойника как средства интеграции виртуальных и реальных экспериментов на лабораторных занятиях по дисциплине «Теория автоматического управления». Обобщены развитие понятия цифрового двойника, его отличия от цифровой модели и цифровой тени, а также функции в образовательном процессе. Классифицированы дидактические возможности применения данной технологии в лабораторном обучении, установлено соответствие между разделами дисциплины, учебными стендами и их цифровыми моделями. На примере регулирования скорости двигателя постоянного тока предложена структура типовой лабораторной работы, основанной на цикле «модель – реальный эксперимент – сравнение – уточнение».

Ключевые слова: цифровой двойник; теория автоматического управления; лабораторное занятие; цифровая тень; учебный стенд; идентификация; ПИД-регулятор.

DIDACTIC POTENTIAL OF DIGITAL TWIN TECHNOLOGY IN LABORATORY CLASSES ON AUTOMATIC CONTROL THEORY

Yangiboyeva Raxbaroy Mashrabboy qizi

Andijan State Technical Institute, Doctoral Student.

Abstract.

The article analyzes the potential of digital twin technology as a means of integrating virtual and real experiments in laboratory classes on Automatic Control Theory. It reviews the development of the digital twin concept, its differences from a digital model and a digital shadow, and its functions in education. The didactic opportunities offered by this technology in laboratory instruction are classified, and the correspondence between course sections, educational training setups, and their digital models is established. Using the example of DC motor speed control, the article proposes a structure for a model laboratory exercise based on the cycle “model – real experiment – comparison – refinement.”

Keywords: digital twin; automatic control theory; laboratory class; digital shadow; educational training setup; identification; PID controller.

Kirish. Oldingi tadqiqotimizda muhandislik ta’limida virtual va real laboratoriyalarni integratsiyalashning ta’limiy imkoniyatlari hamda tajriba orqali o’qitish, modelga asoslangan o’qitish va kognitiv yuklama nazariyalari bilan bog’liqligi tahlil qilingan. Xalqaro tadqiqotlarda ham bunday integratsiyaning o’quv natijalarini yaxshilash imkoniyatlari ko’rsatilgan [1; 2]. Biroq virtual model va real qurilmani bitta mashg‘ulot doirasida bir vaqtda hamda o’zaro bog’langan

holda qo'llash masalasi qo'shimcha metodik yechimlarni talab etadi. Mavjud integratsiya shakllarida virtual va real tajribalar ko'pincha alohida mashg'ulotlarda yoki ketma-ket o'tkaziladi [3; 4]. Bunday sharoitda ular o'rtasidagi bog'liqlikni aniqlash vazifasi asosan talabning mustaqil faoliyatiga yuklanadi.

Mazkur masala "Avtomatik boshqarish nazariyasi" fani uchun ayniqsa dolzarbdir. Uzatish funksiyasi, chastotaviy tavsifnoma, turg'unlik zaxirasi va rostlagich sintezi kabi tushunchalarning matematik ifodasi ularning real obyektidagi mazmunini anglashda qiyinchilik tug'dirishi mumkin. N. Xeyr, K. Ostryom va hammualliflar 1996-yilda boshqarish ta'limidagi asosiy muammolar sifatida nazariy va amaliy tayyorgarlik o'rtasidagi nomutanosiblik hamda laboratoriya tajribasining yetishmasligini qayd etgan [5]. P. Antsaklis va hammualliflar ushbu ta'lim yo'nalishini modernizatsiya qilishda amaliy tajribani zamonaviy hisoblash vositalari bilan integratsiyalashni tavsiya qilgan [6]. Keyingi tadqiqotlarda J. Rossiter va hammualliflar ham mazkur muammolar o'z dolzarbligini saqlab qolayotganini ta'kidlagan [7]. Boshqarish tizimlarining energetika, transport va ishlab chiqarishdagi ahamiyatining ortishi bu vazifalarni yanada dolzarblashtiradi.

Sanoatda qo'llaniladigan raqamli egizak texnologiyasi fizik obyektning uning modeli bilan ma'lumot almashinuvi orqali bog'laydi [8; 9]. Ushbu texnologiyani ta'limga tatbiq etish virtual va real tajribalar integratsiyasining texnik yechimi sifatida qoralishi mumkin. Obyekt modelini tuzish, uni o'lchash ma'lumotlari asosida aniqlashtirish va modelga tayangan holda boshqarish yechimini ishlab chiqish raqamli egizakning nazariy asoslari bilan uzviy bog'liq. Shu sababli mazkur fanda raqamli egizak ham o'qitish vositasi, ham o'rganilayotgan jarayonlarni ifodalovchi tizim sifatida namoyon bo'ladi.

Maqolaning maqsadi — raqamli egizak texnologiyasining "Avtomatik boshqarish nazariyasi" fanidan laboratoriya mashg'ulotlaridagi didaktik imkoniyatlarini aniqlash va ularni fan mazmuni bilan muvofiqlashtirish. Buning uchun raqamli egizakning mazmuni va uning raqamli model hamda raqamli soyadan farqlarini aniqlash; uning ta'limdagi funksiyalari va didaktik imkoniyatlarini tasniflash; fan bo'limlari, o'quv maketlari va raqamli modellar o'rtasidagi muvofiqlikni belgilash; namunaviy laboratoriya ishi tuzilmasini ishlab chiqish vazifalari qo'yildi.

Adabiyotlar tahlili va metodologiya. Raqamli egizak konsepsiyasining shakllanishi M. Grivnsning ishlari bilan bog'liq. U J. Vikers bilan birgalikda raqamli egizakni fizik obyekt, uning virtual modeli va ular o'rtasidagi ma'lumot almashinuvi kanalidan iborat tizim sifatida tavsiflagan [8]. Keyinchalik mazkur konsepsiya aviatsiya va kosmik sanoatda qo'llanila boshlagan. Raqamli egizakning alohida simulyatsiyadan asosiy farqi uning muayyan fizik obyekt bilan uzviy bog'liqligi hamda obyektning hayotiy sikli davomida olingan ma'lumotlar asosida yangilanib borishida namoyon bo'ladi.

F. Tao va hammualliflar raqamli egizakning sanoatda qo'llanilishini tizimlashtirib, mahsulotni loyihalash, ishlab chiqarish va unga xizmat ko'rsatishdagi imkoniyatlarini yoritgan [9]. Atama talqinlarining xilma-xilligi uni oddiy modeldan farqlash mezonlarini aniqlashtirish zaruratini yuzaga keltirgan. L. Rayt va S. Davidson bunday mezonlar sifatida muayyan fizik obyektga tegishlilik, obyekt ma'lumotlari asosida yangilanib borish va qaror qabul qilishni qo'llab-quvvatlashni ajratgan [10]. A. Rashid va hammualliflar fizik qonunlarga asoslangan, ma'lumotlarga asoslangan va gibril modellarning o'rnini tahlil qilgan [11]. V. Kritsinger va hammualliflar esa ma'lumot almashinuvining avtomatlashtirilganlik darajasiga ko'ra raqamli model, raqamli soya va raqamli egizakni farqlagan [12].

Raqamli egizakning ta'limda qo'llanilishiga oid tadqiqotlar doirasi cheklangan. A. Lilyaniemi va H. Paavilaynen muhandislik ta'limi uchun kurs konsepsiyasini ishlab chiqib, texnologiyaning afzalliklari — real obyektning xavfsiz o'rganish, tajribalarni takrorlash va motivatsiyani oshirish imkoniyatlarini, shuningdek, dasturiy ta'minot murakkabligi hamda o'qituvchilar tayyorgarligi bilan bog'liq cheklavlarni aniqlagan [13]. Ko'rib chiqilgan ishlarda yirik sanoat obyektlari uchun yaratilgan raqamli egizaklardan ta'limda asosan namoyish vositasi sifatida foydalanish yondashuvi kuzatiladi.

Boshqarish nazariyasini o'qitishga oid N. Xeyr va hammualliflar [5] hamda J. Rossiter va hammualliflarning [7] ishlari tahlil qilindi. R. Rek mutaxassislar so'rovi asosida boshqarish laboratoriyalarining muhim o'quv maqsadlari sifatida modellashtirish, identifikatsiya, rostlagichni loyihalash va nazariy natijalarni tajribada tekshirishni ajratgan [14]. R. Rek va R. Srinivas arzon portativ laboratoriya to'plamini [15], J. Sanches va hammualliflar esa teskari mayatnik uchun virtual va masofaviy laboratoriyani ishlab chiqqan [16]. Model identifikatsiyasining nazariy asoslari L. Lyung asarida bayon etilgan [17]. Fan mazmuni K. Ogata [18], G. Franklin va hammualliflar [19] hamda K. Ostryom va R. Myurrey [20] darsliklari asosida tahlil qilindi. O'quv maketlarini kam xarajat bilan tayyorlash imkoniyatlari I. Gibson va hammualliflarning additiv texnologiyalarga oid monografiyasi [21], S. Ford va T. Minshallning ta'limda 3D bosmadan foydalanish bo'yicha sharhi [22] hamda J. Pirsning ochiq apparat ta'minotiga oid ishi [23] asosida baholandi.

Tadqiqot tahliliy xususiyatga ega bo'lib, uch bosqichda amalga oshirildi. Birinchi bosqichda raqamli egizak tushunchasining sanoat va ta'limdagi talqinlari qiyoslandi. Ikkinchi bosqichda oldingi tadqiqotimizda belgilangan integratsiya shartlari asosida uning laboratoriya ta'limidagi funksiyalari va didaktik imkoniyatlari tasniflandi. Uchinchi bosqichda pedagogik modellashtirish orqali fan bo'limlari va o'quv maketlari o'rtasidagi muvofiqlik hamda namunaviy laboratoriya ishi tuzilmasi ishlab chiqildi.

Tadqiqot natijalari. V. Kritsinger va hammualliflar tasnifiga ko'ra, raqamli modelda fizik obyekt va model o'rtasida avtomatik ma'lumot almashinuvi mavjud emas; raqamli soyada ma'lumotlar obyektidan modelga, raqamli egizakda esa har ikki yo'nalishda avtomatik uzatiladi [12]. Mazkur uch darajani laboratoriya ishining ketma-ket bosqichlari bilan muvofiqlashtirish taklif etildi (1-jadval).

1-jadval. Raqamli egizak darajalarining laboratoriya mashg'ulotidagi o'rni

Daraja	Ma'lumot oqimi	Talaba faoliyati	Asosiy didaktik maqsad
--------	----------------	------------------	------------------------

Raqamli model	Har ikki yo'nalishda qo'lda	Modelni tuzish va virtual tajriba o'tkazish	Nazariy tushunchalarni o'zlashtirish
Raqamli soya	Maketdan modelga avtomatik	Model va tajriba natijalarini bitta grafikda taqqoslash, parametrlarni aniqlash	Model va real jarayon o'rtasidagi farqni anglash
Raqamli egizak	Har ikki yo'nalishda avtomatik	Modelda sozlangan rostlagichni maketga joriy etish va natijalarni taqqoslash	Model asosida qaror qabul qilish

Taklif etilgan ketma-ketlik texnik murakkablik bilan birga talabaning mustaqillik darajasini ham bosqichma-bosqich oshirishga yo'naltirilgan. Raqamli model bosqichida talaba keyinchalik tajriba o'tkaziladigan muayyan maketning kompyuter modeli bilan ishlaydi. Raqamli soya bosqichida modelning real jarayonga muvofiqligi bevosita o'lchash ma'lumotlari asosida tekshiriladi. Raqamli egizak bosqichida esa muhandislik faoliyatining soddalashtirilgan ketma-ketligi amalga oshiriladi: yechim avval modelda ishlab chiqiladi, so'ngra real obyektida sinovdan o'tkaziladi.

O'quv raqamli egizagining tuzilishi. Sanoat raqamli egizaklari bulutli hisoblash, katta ma'lumotlar va sun'iy intellekt vositalarini qamrab olishi mumkin [9]. O'quv maqsadlari uchun to'rt qatlamli soddalashtirilgan arxitektura taklif etiladi: fizik qatlam — maketning mexanik qismi va yuritmasi; o'lchash va boshqarish qatlami — datchiklar, drayver va mikrokontroller; aloqa qatlami — ketma-ket port orqali ma'lumot almashinuvi; model qatlami — matematik model va vizuallashtirish dasturi. Bunda diskretlash davri va aloqa kechikishi alohida didaktik ahamiyatga ega. Diskretlash davrining obyekt vaqt doimiysiga nisbatan ortishi raqamli rostlash sifatini pasaytirishi mumkin; ushbu bog'liqlik diskret tizimlarni o'rganishda qo'llaniladi [19]. Aloqa kechikishi esa model va tajriba grafiklarining vaqt bo'yicha siljishi orqali real tizimlardagi kechikish ta'sirini tahlil qilish imkonini beradi.

Raqamli egizakning ta'limdagi funksiyalari. Adabiyotlar tahlili asosida raqamli egizakning ta'lim jarayonidagi beshta funksional o'rni ajratildi (2-jadval).

2-jadval. Raqamli egizakning ta'lim jarayonidagi funksiyalari

Funksional o'rni	Talaba faoliyati	Afzalligi	Cheklovi
Namoyish vositasi	O'qituvchi namoyish etgan jarayonni kuzatish	Murakkab obyekttni ko'rgazmali ifodalash	Faol ishtirokning cheklanishi
Virtual trenajyor	Model bilan mustaqil mashq bajarish	Xavfsiz va takroriy mashq imkoniyati	Real obyekt bilan bevosita aloqaning yo'qligi
Tajriba natijalarini qiyoslash vositasi	Model va real obyekt natijalarini taqqoslash	Nazariya va amaliyotning o'zaro bog'lanishi	Maket va aloqa tizimiga ehtiyoj
Tadqiqot objekti	Modelni aniqlashtirish va rostlagichni loyihalash	Modellashtirish kompetentligini rivojlantirish	Yuqori tayyorgarlik darajasiga ehtiyoj
Loyihalash objekti	Raqamli egizakni mustaqil yaratish	Kasbiy faoliyatga yaqin amaliy tajriba	Vaqt sarfining ko'pligi

Sanoatda raqamli egizakning ahamiyati monitoring, bashoratlash va optimallashtirish vazifalarida namoyon bo'ladi [9]. Ta'limda esa undan tajriba natijalarini qiyoslash vositasi va tadqiqot objekti sifatida foydalanish model va real jarayon o'rtasidagi bog'liqlikni faol o'rganishga xizmat qiladi. Ko'rib chiqilgan ta'limiy tadqiqotlarda namoyish va virtual mashq funksiyalariga ko'proq e'tibor qaratilgani [13] mazkur texnologiyaning boshqa didaktik imkoniyatlarini ham o'rganish zarurligini ko'rsatadi.

Didaktik imkoniyatlar tasnifi. Raqamli egizakning laboratoriya ta'limidagi didaktik imkoniyatlari ularning mazmuni va nazariy asoslari bo'yicha tasniflandi (3-jadval).

3-jadval. Raqamli egizakning laboratoriya ta'limidagi didaktik imkoniyatlari

Imkoniyat	Mazmuni	Nazariy asosi
Model va real obyekttni taqqoslash	Model va tajriba natijalarini bitta grafikda qiyoslash	Virtual va real tajribalarni integratsiyalash [1]
Ichki o'zgaruvchilarni vizuallashtirish	Maketda bevosita o'lchanmaydigan o'zgaruvchilarni model orqali ifodalash	Virtual laboratoriyalarga oid tadqiqotlar [1]
Xavfsiz izlanish	Gipotezalarini dastlab modelda tekshirish	Izlanishga yo'naltirilgan o'qitishni qo'llab-quvvatlash [24]
Tezkor qayta aloqa	Tajriba natijalarini model bilan bevosita taqqoslash	Qayta aloqa samaradorligi [25]
Modelni tuzish va takomillashtirish	Aniqlangan farqlar asosida modelni aniqlashtirish	Model identifikatsiyasi nazariyasi [17]
Tajribaviy o'rganish siklini amalga oshirish	Kolb sikli bosqichlarini bitta mashg'ulot doirasida bog'lash	Laboratoriya ta'limida tajriba sikli [3]
Mustaqillikni bosqichma-bosqich oshirish	Raqamli model, soya va egizak bosqichlarida vazifalarni murakkablashtirish	Kognitiv yuklama nazariyasi [24]

Iqtisodiy samaradorlik	Arzon maketlar va bepul dasturlar yordamida guruhlarini alohida jihozlash imkoniyati	Ochiq apparat ta'minoti [23]
------------------------	--	------------------------------

Ushbu imkoniyatlarning asosini model va real obyekt natijalarini taqqoslash tashkil etadi. Taqqoslash jarayonida talaba nazariy tushunchalarning real jarayondagi ifodasini aniqlaydi, nomuvofiqlik sabablarini tahlil qiladi va modelni takomillashtiradi. Natijada modellashirish alohida hisoblash amali sifatida emas, balki real obyektning o'rganish va izohlash faoliyati sifatida o'zlashtiriladi.

Fan bo'limlari va o'quv maketlari muvofiqligi. Raqamli egizakning fizik qismi sifatida boshqarish ta'limida qo'llaniladigan klassik obyektlar tanlandi [16; 19; 20]. Tanlashda obyektning fan bo'limini ko'rgazmali ifodalashi, modelning tushunarligi, arzon materiallar va standart elektron komponentlardan tayyorlash imkoniyati hamda jarayonni bevosita kuzatish imkoniyati hisobga olindi. FDM 3D bosma va mikrokontrollerlardan foydalanish maketlarni tayyorlash xarajatlarini sanoat stendlariga nisbatan kamaytirish imkonini beradi [21; 22; 23]. Bunday maketlarning konstruksiyasini o'zgartirish orqali fizik parametrlarning ta'sirini o'rganish mumkin. Masalan, inersiya diskini turli to'ldirish zichligida chop etish vaqt doimiysidagi o'zgarishlarni kuzatish imkonini yaratadi (4-jadval).

4-jadval. Fan bo'limlari, raqamli modellari va o'quv maketlari muvofiqligi

Fan bo'limi	Raqamli model	O'quv maketi	Laboratoriya ishinining natijasi
Teskari aloqa, chiziqlashtirish	Suv sathi dinamikasi modeli	Suv sathini rostlash idishi	Ochiq va yopiq tizim javoblarini taqqoslash
Matematik modellar, identifikatsiya	O'zgaras tok dvigatelining birinchi tartibli modeli	Inersiya diskli o'zgaras tok dvigateli moduli	Identifikatsiyalangan model
Chastotaviy tavsifnomalar	Bode va Naykvist diagrammalari	Servoyuritma	Eksperimental chastotaviy tavsifnoma
Turg'unlik va korreksiya	Ikki karra integrallovchi obyekt modeli	"Shar - tarnov" tizimi	Turg'unlik chegarasini aniqlash
PID sintezi, diskretlash	Uzluksiz va raqamli PID modeli	O'zgaras tok dvigateli va mikrokontrollerli maket	Sozlangan rostlagich va sifat ko'rsatkichlari
Holat fazosi, modal rostlash	Chiziqlashtirilgan holat modeli	Teskari mayatnik	Holat bo'yicha rostlagich

Maketlarni qo'llashda murakkablikning bosqichma-bosqich ortishi nazarda tutildi: suv sathini rostlash idishi — jarayoni sekin kechadigan va bevosita kuzatiladigan boshlang'ich daraja; o'zgaras tok dvigateli — o'rta daraja; "shar - tarnov" tizimi — ochiq konturda turg'un bo'lmagan o'rta-yuqori daraja; teskari mayatnik — noxiziq va ko'p o'lchamli yuqori daraja. Ushbu ketma-ketlik yangi vazifalarni talabning avval egallagan bilimlari asosida bosqichma-bosqich murakkablashtirishga xizmat qiladi.

Namunaviy laboratoriya ishinining tuzilmasi. O'zgaras tok dvigateli tezligini rostlash misolida "model - real tajriba - taqqoslash - aniqlashtirish" sikliga asoslangan laboratoriya ishi ishlab chiqildi. Mustaqil qo'zg'atishli dvigatel dinamikasi yakor zanjiri va mexanik qism tenglamalari orqali ifodalanadi. Elektr vaqt doimiysi mexanik vaqt doimiysidan ancha kichik bo'lganda, induktivlik ta'siri hisobga olinmaydi va obyekt birinchi tartibli bo'g'in bilan tavsiflanadi [18; 19]:

$$W(s) = \frac{\Omega(s)}{U(s)} = \frac{K}{T \cdot s + 1}$$

Bu yerda K — kuchaytirish koeffitsiyenti; T — mexanik vaqt doimiysi. Laboratoriya ishinining asosiy vazifasi yuklama o'zgarganda dvigatel tezligini berilgan qiymatda saqlash, o'ta rostlashni bartaraf etish va rostlash vaqtini minimallashtirishni ta'minlaydigan rostlagich parametrlarini aniqlashdan iborat.

Raqamli model bosqichida talaba Simulink yoki Python muhitida modelni tuzadi va pog'onasimon kirish ta'siriga javobni aniqlaydi. Raqamli soya bosqichida maketga pog'onasimon kuchlanish berilib, enkoder ma'lumotlari kompyuterga uzatiladi va real o'tish jarayoni model natijasi bilan bitta grafikda taqqoslanadi. K va T parametrlari turg'unlashgan qiymat hamda uning 63,2 % darajasiga erishish vaqti asosida aniqlanadi [17]. Raqamli egizak bosqichida aniqlashtirilgan model uchun PI rostlagich Zigler-Nikols usuli [26] va modelda optimallashtirish orqali sozlanadi [27]. Olingan parametrlar maketga joriy etilib, real natijalar model natijalari bilan qiyoslanadi.

Taqqoslashda quyidagi nomuvofiqliklar tahlil qilinadi: past tezlikda quruq ishqalanish sababli dvigatelning aylanmasligi; kuchlanish cheklovi tufayli rostlagich chiqishining to'yinishi va integral ta'sirning o'ta rostlashni kuchaytirishi; enkoder shovqinining differensial tashkil etuvchini qo'llashga ta'siri; diskretlash davrining tizim dinamikasiga ta'siri. Ushbu holatlar noxiziqli tizimlar, cheklovlar, filtrlash va diskret tizimlar mavzularini o'rganish uchun asos bo'lib xizmat qiladi. Ish yakunida talaba modelga quruq ishqalanish va to'yinish bloklarini kiritib, uning real obyektga muvofiqligini yaxshilaydi hamda natijalarni qisqa og'zaki himoya davomida asoslaydi.

Muhokama. Tahlil raqamli egizak texnologiyasi oldingi tadqiqotda belgilangan integratsiya shartlarini amalga oshirish uchun texnik imkoniyat yaratishini ko'rsatadi. Modelning tushunarligi fizik qonunlarga asoslangan sodda modelni bosqichma-bosqich murakkablashtirish orqali ta'minlanadi. Bu fizik modelni ma'lumotlar asosida aniqlashtirishga yo'naltirilgan gibrid yondashuv bilan bog'liq [11]. Raqamli soya rejimida model va tajriba natijalarini bitta grafikda aks ettirish majburiy taqqoslashni tashkil etishga xizmat qiladi hamda R. Mayerning fazoviy va vaqt

bo'yicha yaqinlik tamoyillariga mos keladi [28]. Metodik ko'makni bosqichma-bosqich kamaytirish raqamli model, raqamli soya va raqamli egizak darajalari hamda maketlar murakkabligining ortishi bilan muvofiqlashtiriladi. Bunday tashkil etish kognitiv yuklamani boshqarishga qaratilgan [24].

R. Rek belgilagan modellashirish, identifikatsiya, rostlagichni loyihalash va nazariy natijalarni tajribada tekshirish maqsadlari [14] taklif etilgan laboratoriya ishining bosqichlari bilan muvofiqlashadi. Raqamli model bosqichi modellashirishga, raqamli soya bosqichi identifikatsiyaga, raqamli egizak bosqichi esa rostlagichni loyihalash va tekshirishga xizmat qiladi. Ushbu muvofiqlik yondashuvning boshqarish laboratoriyalari uchun belgilangan o'quv maqsadlariga yo'naltirilganini ko'rsatadi.

Xorijiy tajriba bilan qiyoslash taklif etilgan yondashuvning o'ziga xos jihatlarini aniqlash imkonini beradi. Masofaviy laboratoriyada talaba real qurilmani internet orqali boshqaradi, biroq u bilan bevosita jismoniy ishlash imkoniyati cheklanadi [16]. Ko'p rejimli laboratoriyalarda real, virtual va masofaviy rejimlar mavjud bo'lsa-da, ular alohida mashg'ulotlarda qo'llanishi mumkin [4]. Arzon portativ to'plamlar talabaning o'z qurilmasi bilan ishlashini ta'minlaydi [15], ammo model va tajriba natijalarini tizimli taqqoslash har doim ham nazarda tutilmaydi. Taklif etilgan laboratoriyada esa model va real obyekt bitta mashg'ulot doirasida ma'lumot almashinuvi orqali bog'lanib, taqqoslash asosiy o'quv faoliyati sifatida tashkil etiladi.

Raqamli egizakdan ta'limda foydalanishga oid yondashuvlar o'rtasida ham farq mavjud. A. Lilyaniemi va H. Paavilaynen tavsiflagan kursda yirik obyektning tayyor raqamli egizagidan foydalanishga e'tibor qaratilgan [13]. Taklif etilgan yondashuvda esa talaba kichik o'quv obyektining raqamli egizagini bosqichma-bosqich yaratadi va aniqlashtiradi. Bunda L. Rayt va S. Davidson ajratgan muayyan obyektga tegishlilik, ma'lumotlar asosida yangilanish va qaror qabul qilishni qo'llab-quvvatlash mezonlarini [10] amalga oshirish nazarda tutiladi.

Yondashuv muayyan cheklovlarga ega. Model va maket o'rtasida ishonchli aloqa o'rnatish texnik tayyorgarlikni talab qiladi; 3D bosma maketlarning aniqligi va mustahkamligi sanoat stendlarinikidan past bo'lishi mumkin; o'qituvchidan boshqarish nazariyasi, laboratoriya ta'limi metodikasi va raqamli texnologiyalarni uyg'unlashtirish talab etiladi [13]. Modelni haddan tashqari soddalashtirish real tizim haqida noto'g'ri tasavvur shakllanishiga olib kelishi mumkin. Aloqa dasturlari uchun tayyor shablonlarni taqdim etish, maket konstruksiyasini standartlashtirish, model va tajriba o'rtasidagi farqlardan o'quv material sifatida foydalanish hamda o'qituvchilar uchun qisqa malaka oshirish modulini tashkil etish ushbu cheklovlarni kamaytirishga xizmat qiladi.

Tadqiqot tahliliy xususiyatga ega bo'lgani sababli taklif etilgan yondashuvning o'quv natijalariga ta'siri empirik jihatdan tekshirilmagan. Keyingi bosqichda tajriba va nazorat guruhlarini ishtirokida pedagogik tajriba-sinov o'tkazish, talabalarining modellashirish va tajriba o'tkazish kompetentligini baholash mezonlarini ishlab chiqish hamda natijalarni matematik-statistik usullar bilan tahlil qilish rejalashtirilgan.

Xulosa. Raqamli egizak texnologiyasi virtual va real laboratoriyalarni bitta mashg'ulot doirasida integratsiyalashning texnik asosi sifatida tavsiflandi. Raqamli model, raqamli soya va raqamli egizak darajalarini laboratoriya ishining izchil bosqichlari sifatida tashkil etish talabaning mustaqilligini bosqichma-bosqich oshirishga xizmat qiladi. O'quv maqsadlari uchun fizik, o'lchash-boshqarish, aloqa va model qatlamlaridan iborat soddalashtirilgan arxitektura taklif etilib, diskretlash davri hamda aloqa kechikishidan tegishli fan mavzularini tajriba asosida o'rganish vositasi sifatida foydalanish imkoniyati ko'rsatildi. Raqamli egizakning ta'limdagi beshta funksional o'rni va sakkizta didaktik imkoniyati tasniflandi. Ularning asosini model va real obyekt natijalarini taqqoslash tashkil etadi; tajriba natijalarini qiyoslash vositasi hamda tadqiqot objekti sifatidagi funksiyalari esa talabaning faol izlanishiga yo'naltirilgan.

"Avtomatik boshqarish nazariyasi" fanining oltita mavzu yo'nalishi, tegishli o'quv maketlari va raqamli modellari o'rtasidagi muvofiqlik belgilandi. Maketlardan murakkablikni bosqichma-bosqich oshirish tamoyili asosida foydalanish hamda ularni additiv texnologiyalar yordamida kam xarajat bilan tayyorlash imkoniyati ko'rsatildi. O'zgarma tok dvigateli tezligini rostlash misolida "model – real tajriba – taqqoslash – aniqlashtirish" sikliga asoslangan laboratoriya ishi tuzilmasi taklif etildi. Mazkur tuzilmada model va tajriba natijalari o'rtasidagi farqlar fan mavzularini izchil o'zlashtirishga xizmat qiluvchi didaktik material sifatida talqin qilindi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Jong T. de, Linn M. C., Zacharia Z. C. Physical and Virtual Laboratories in Science and Engineering Education // Science. – 2013. – Vol. 340, № 6130. – P. 305–308. – DOI: 10.1126/science.1230579.
2. Olympiou G., Zacharia Z. C. Blending Physical and Virtual Manipulatives: An Effort to Improve Students' Conceptual Understanding through Science Laboratory Experimentation // Science Education. – 2012. – Vol. 96, № 1. – P. 21–47. – DOI: 10.1002/sce.20463.
3. Abdulwahed M., Nagy Z. K. Applying Kolb's Experiential Learning Cycle for Laboratory Education // Journal of Engineering Education. – 2009. – Vol. 98, № 3. – P. 283–294.
4. Lindsay E. D., Good M. C. Effects of Laboratory Access Modes upon Learning Outcomes // IEEE Transactions on Education. – 2005. – Vol. 48, № 4. – P. 619–631. – DOI: 10.1109/TE.2005.852591.
5. Kheir N. A., Åström K. J., Auslander D. et al. Control Systems Engineering Education // Automatica. – 1996. – Vol. 32, № 2. – P. 147–166.
6. Antsaklis P., Basar T., DeCarlo R. et al. Report on the NSF/CSS Workshop on New Directions in Control Engineering Education // IEEE Control Systems Magazine. – 1999. – Vol. 19, № 5. – P. 53–58. – DOI: 10.1109/MCS.1999.793442.
7. Rossiter J. A., Pasik-Duncan B., Dormido S. et al. A Survey of Good Practice in Control Education // European

Journal of Engineering Education. – 2018. – Vol. 43, № 6. – P. 801–823. – DOI: 10.1080/03043797.2018.1428530.

8. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems / ed. by F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, A. Alves. – Cham: Springer, 2017. – P. 85–113. – DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4.

9. Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A. Y. C. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2019. – Vol. 15, № 4. – P. 2405–2415. – DOI: 10.1109/TII.2018.2873186.

10. Wright L., Davidson S. How to Tell the Difference between a Model and a Digital Twin // Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences. – 2020. – Vol. 7. – DOI: 10.1186/s40323-020-00147-4.

11. Rasheed A., San O., Kvamsdal T. Digital Twin: Values, Challenges and Enablers from a Modeling Perspective // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 21980–22012. – DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2970143.

12. Kritzinger W., Karner M., Traar G. et al. Digital Twin in Manufacturing: A Categorical Literature Review and Classification // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – Vol. 51, № 11. – P. 1016–1022. – DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.

13. Liljaniemi A., Paavilainen H. Using Digital Twin Technology in Engineering Education – Course Concept to Explore Benefits and Barriers // Open Engineering. – 2020. – Vol. 10, № 1. – P. 377–385. – DOI: 10.1515/eng-2020-0040.

14. Reck R. M. Common Learning Objectives for Undergraduate Control Systems Laboratories // IEEE Transactions on Education. – 2017. – Vol. 60, № 4. – P. 257–264. – DOI: 10.1109/TE.2017.2681624.

15. Reck R. M., Sreenivas R. S. Developing an Affordable and Portable Control Systems Laboratory Kit with a Raspberry Pi // Electronics. – 2016. – Vol. 5, № 3. – Art. 36. – DOI: 10.3390/electronics5030036.

16. Sánchez J., Dormido S., Pastor R., Morilla F. A Java/Matlab-Based Environment for Remote Control System Laboratories: Illustrated with an Inverted Pendulum // IEEE Transactions on Education. – 2004. – Vol. 47, № 3. – P. 321–329. – DOI: 10.1109/TE.2004.825525.

17. Ljung L. System Identification: Theory for the User. – 2nd ed. – Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 1999. – 609 p.

18. Ogata K. Modern Control Engineering. – 5th ed. – Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010. – 894 p.

19. Franklin G. F., Powell J. D., Emami-Naeini A. Feedback Control of Dynamic Systems. – 8th ed. – New York: Pearson, 2019.

20. Åström K. J., Murray R. M. Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers. – Princeton, NJ: Princeton University Press, 2008.

21. Gibson I., Rosen D., Stucker B., Khorasani M. Additive Manufacturing Technologies. – 3rd ed. – Cham: Springer, 2021. – 675 p. – DOI: 10.1007/978-3-030-56127-7.

22. Ford S., Minshall T. Invited Review Article: Where and How 3D Printing Is Used in Teaching and Education // Additive Manufacturing. – 2019. – Vol. 25. – P. 131–150. – DOI: 10.1016/j.addma.2018.10.028.

23. Pearce J. M. Building Research Equipment with Free, Open-Source Hardware // Science. – 2012. – Vol. 337, № 6100. – P. 1303–1304. – DOI: 10.1126/science.1228183.

24. Kirschner P. A., Sweller J., Clark R. E. Why Minimal Guidance During Instruction Does Not Work: An Analysis of the Failure of Constructivist, Discovery, Problem-Based, Experiential, and Inquiry-Based Teaching // Educational Psychologist. – 2006. – Vol. 41, № 2. – P. 75–86. – DOI: 10.1207/s15326985ep4102_1.

25. Hattie J. Visible Learning: A Synthesis of over 800 Meta-Analyses Relating to Achievement. – London: Routledge, 2009. – 378 p.

26. Ziegler J. G., Nichols N. B. Optimum Settings for Automatic Controllers // Transactions of the ASME. – 1942. – Vol. 64, № 8. – P. 759–765. – DOI: 10.1115/1.4019264.

27. Åström K. J., Hägglund T. Advanced PID Control. – Research Triangle Park, NC: ISA, 2006.

28. Mayer R. E. Multimedia Learning. – 2nd ed. – New York: Cambridge University Press, 2009.