



KOGNITIV MODELLAR ASOSIDA ADAPTIV BOSHQARUV ALGORITMLARINI ISHLAB CHIQISH

¹Choriyev O‘rinjon Bayramali o‘g‘li, ²Boysariyev Yusuf Jo‘raqobilovich

¹Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti,

²Robototexnika akademiyasi

¹katta o‘qituvchi, ²o‘qituvchi

¹chorievu95@mail.ru

Annotatsiya: Ushbu maqolada kognitiv modellar asosida adaptiv boshqaruv algoritmlarini ishlab chiqish masalasi yoritilgan. Sun‘iy intellekt elementlari, jumladan, sun‘iy neyron tarmoqlar, noaniq mantiqiy tizimlar va fuzzy cognitive map yondashuvlari yordamida murakkab, noma‘lum va vaqt o‘tishi bilan o‘zgaruvchi tizimlarni samarali boshqarish imkoniyatlari tahlil qilingan. pH neytrallanish jarayoni misolida neyro-MPC (model-prediktiv boshqaruv) algoritmi klassik PID-regulyator bilan solishtirilib, kognitiv yondashuvning ustunliklari eksperimental natijalar asosida asoslab berilgan. Shuningdek, maqolada Lyapunov funksiyasi asosida adaptiv algoritmnining nazariy turg‘unligi isbotlangan. Tadqiqot natijalari kognitiv hisoblash texnologiyalarining sanoat avtomatlashtirishda qo‘llanilishi yuqori samaradorlik va proaktiv boshqaruv imkonini berishini tasdiqlaydi.

Kalit so‘zlar: Kognitiv modellashtirish, adaptiv boshqaruv, sun‘iy intellekt, neyron tarmoqlar, fuzzy logic, modelga asoslangan boshqaruv (MPC), pH neytrallanish, Lyapunov barqarorligi, real vaqtli identifikatsiya, sanoat avtomatlashtirish.

DEVELOPMENT OF ADAPTIVE CONTROL ALGORITHMS BASED ON COGNITIVE MODELS

Abstract: This paper presents the development of adaptive control algorithms based on cognitive models. It investigates the application of artificial intelligence elements—such as artificial neural networks, fuzzy logic systems, and fuzzy cognitive maps—for efficient control of complex, nonlinear, and time-varying systems with uncertain parameters. A comparative analysis is conducted between the classical PID controller and a neural model predictive control (neuro-MPC) algorithm using the pH neutralization process as a case study. The proposed approach demonstrates superior performance in terms of stability, adaptability, and robustness against noise and delays. Moreover, theoretical stability of the adaptive algorithm is guaranteed using a



Lyapunov-based method. The results confirm that cognitive computing technologies significantly enhance the performance of industrial automation systems by enabling proactive and self-learning control mechanisms.

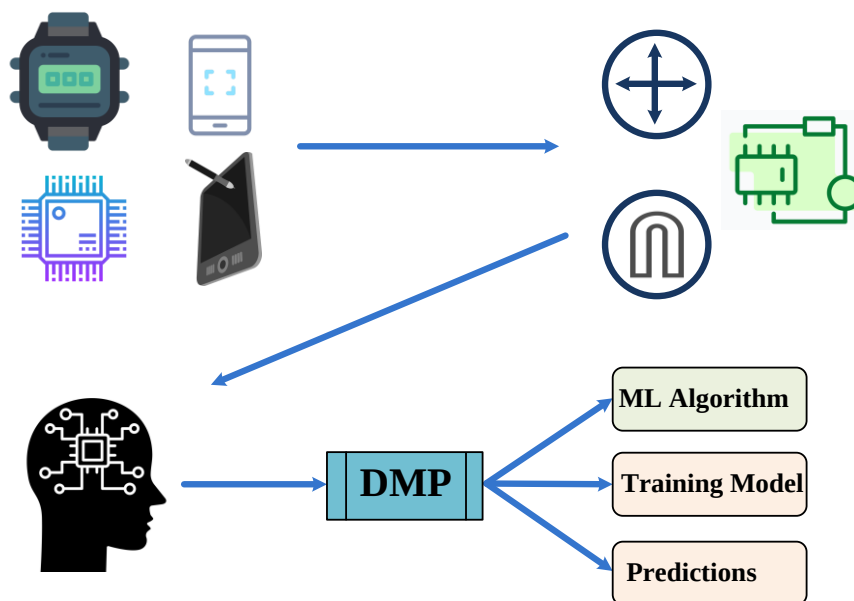
Keywords: Cognitive modeling, adaptive control, artificial intelligence, neural networks, fuzzy logic, model predictive control (MPC), pH neutralization, Lyapunov stability, real-time identification, industrial automation

Аннотация: В данной работе представлена разработка адаптивных алгоритмов управления на основе когнитивных моделей. Рассматривается применение элементов искусственного интеллекта — таких как искусственные нейронные сети, нечеткие логические системы и нечеткие когнитивные карты — для эффективного управления сложными, нелинейными и нестационарными системами с неопределёнными параметрами. В качестве примера приведено сравнительное исследование между классическим ПИД-регулятором и нейросетевым алгоритмом предиктивного управления (нейро-MPC) на процессе нейтрализации pH. Предлагаемый подход демонстрирует превосходные характеристики с точки зрения устойчивости, адаптивности и робастности к шумам и временным задержкам. Кроме того, теоретическая устойчивость адаптивного алгоритма обеспечивается с использованием метода Ляпунова. Полученные результаты подтверждают, что технологии когнитивных вычислений существенно повышают эффективность систем промышленной автоматизации за счёт реализации проактивных и самообучающихся механизмов управления.

Ключевые слова: когнитивное моделирование, адаптивное управление, искусственный интеллект, нейронные сети, нечеткая логика, предиктивное управление (MPC), нейтрализация pH, устойчивость по Ляпунову, идентификация в реальном времени, промышленная автоматизация.

Zamonaviy texnologik tizimlarda boshqaruv jarayonlarini avtomatlashtirish, moslashuvchan avtomatlashtirilgan texnologiyalarda va optimallashtirishda sun'iy intellekt (SI) usullari hamda kognitiv texnologiyalarda keng qo'llanilmoqda. Murakkab nochiziqli va o'zgaruvchan muhitlarda odatdagi an'anaviy (qat'iy qoidalar asosida ishlovchi) boshqaruv usullari bunday jarayonlarni rostlashda va aniqlikni saqlashda xatoliklar keltirib chiqaradi yoki aniq belgilangan qiymatga erishish uchun uzoqroq vaqt talab qilinadi, bu esa kechikishlarga olib kelib tizimni to'g'ri ishlashiga to'sqinlik qiladi. Masalan, ko'plab ishlab chiqarish jarayonlarida vaqt davomida tizim parametrlarining o'zgarishi, tashqi tasirlar va oldindan kutilmagan holatlar boshqaruv

sifatiga salbiy ta'sir ko'rsatishi hamda hattoki tizimning ishdan chiqishiga olib keladi. Bu kabi masalalarni hal qilish, ularga oldindan tayyorgarlik ko'rish hamda oldini olish uchun adaptiv tizimlar zarur va an'anaviy boshqaruv usullaridan farqli ravishda adaptiv boshqaruv shunday algoritmlarni nazarda tutadiki, ular vaqt davomida o'zgaruvchan muhitga moslashib, real vaqtda tizim xatti-harakatini optimallashtirib boradi. Bunda obyekt modelini yoki boshqaruv qonuniyatlarini doimiy ravishda yangilab borish talab etiladi, bu esa o'z navbatida oldindan o'rganilgan bilimlarga asoslangan, o'zini-o'zi o'rgatuvchi hamda qaror qabul qilishda noaniqlikni hisobga oluvchi yondashuvlarni joriy etishni taqozo etadi. Shu nuqtayi nazardan qaralganda, kognitiv texnologiyalar hamda sun'iy intellekt asosidagi modellar adaptiv boshqaruv tizimlari uchun samarali yechimlar sifatida maydonga chiqadi. Kognitiv modellar inson tafakkuri, qaror qabul qilish va o'rganish mexanizmlarini matematik va hisoblash asosida ifodalaydi hamda real sharoitda yig'ilgan ma'lumotlar asosida tizim strategiyasini moslashtiradi. Misol tariqasida, texnologik jarayonlarda ishlatiladigan PID regulyatorlarning statik tuzilmasi o'zgaras bo'lgani uchun ular tashqi sharoit yoki tizim parametrlaridagi dinamik o'zgarishlarga moslasha olmaydi. Shu sababli fuzzy logic, neyron tarmoqlar, genetik algoritmlar yoki reinforcement learning asosidagi boshqaruv algoritmlari keng qo'llanilmoqda. Ular tizimdagi signal, holat va xatoliklardan kelib chiqib, optimal rostdash parametrlarini doimiy yangilab borish imkonini beradi. Klassik avtomatlashtirilgan tizimlar odatda oldindan aniqlangan matematik model yoki qoidalar asosida ishlaydi.





1-rasm: Kognitiv tizimlarda real vaqtli ma'lumotlarni qayta ishlash va adaptiv boshqaruv modeli

Biroq, murakkab obyektlar uchun bunday modelni aniq hisoblash qiyin, ba'zida esa imkonsiz bo'ladi. Shu bois, kognitiv modellashtirish va sun'iy intellekt yondashuvlari yordamida adaptiv boshqaruvni amalga oshirish dolzarb hisoblanadi. pH neytrallanish jarayoni kuchli nochiziqli bo'lgani sababli, oddiy PID-regulyatorlar bu jarayonni barcha ish rejimlarida bir xil aniqlikda boshqara olmaydi. Reagent konsentratsiyasining o'zgarishi, vaqt bo'yicha kechikishlar va o'lchov shovqinlari mavjud bo'lganda PID parametrlarini qayta sozlash talab etiladi. Bu esa sanoat sharoitida boshqaruvning beqarorlashuviga olib keladi. Shu sababli, real vaqt rejimida obyekt xususiyatlarini kuzatib borib, o'z boshqaruv qonunini moslashuvchan ravishda o'zgartirib turuvchi adaptiv neyro-prediktiv boshqaruv yondashuvi talab etiladi.

Kognitiv model tushunchasi ostida boshqarilayotgan jarayon yoki muhitning o'rganishga qodir modeli tushuniladi. Bunday modellar insonning kognitiv (idrok etish va o'rganish) qobiliyatlarini texnik tizimlarda taqlid qiladi. Sun'iy neyron tarmoqlari, noaniq mantiq va boshqa mashinaviy o'rganish usullari kognitiv model misolidir. Bu usullar yordamida tizimning ichki qonuniyatlari ma'lumotlar asosida mustaqil aniqlanadi va doimiy ravishda takomillashtiriladi. Intellektual boshqaruv sohasida kognitiv yondashuvlar alohida o'rin tutadi. Ilmiy adabiyotlarda bu yo'nalish intelligent control (aqlli boshqaruv) nomi bilan yuritilib, sun'iy neyron tarmoqlar, Bayes ehtimoli, noaniq mantiq, evolyutsion algoritmlar va boshqa SI usullarini boshqaruv tizimlariga tatbiq etishni qamrab oladi. Bunday yondashuvning maqsadi inson operatori kabi vaziyatni tahlil qilish, qaror qabul qilish va o'rganish elementlarini avtomatik boshqaruv tizimiga singdirishdir. Natijada, texnik obyekt o'z faoliyatida xuddi insondek moslashuvchanlikka erishadi va murakkab sharoitlarda ham optimal ishlashini davom ettiradi. Natijada, adaptiv boshqaruv algoritmi murakkab tizim parametrlarini real vaqtda identifikatsiya qilib, boshqaruvni moslab boradi. Masalan, sun'iy neyron tarmoqlar nolinear bog'liqliklarni aproksimatsiya qilish (regressiya) va vaqt qatorlarini bashorat qilish kabi masalalarni hal qila oladi. Shuning uchun ular yordamida og'ir matematik modelga tayanmasdan turib ham, boshqariluvchi obyektning kognitiv modeli yaratiladi va undan adaptiv tarzda foydalanish mumkin.

Zamonaviy sanoat va texnika sohalarida bunday yondashuvning ahamiyati oshib bormoqda. Avtonom robototexnika, avtomobil transporti (masalan, avtopilot haydov tizimlari), kimyo sanoatida jarayonlarni real vaqt rejimida nazorat qilish kabi ko'plab



yo‘nalishlarda adaptiv algoritmlarga ehtiyoj sezilmoqda. Tadqiqotlar shuni ko‘rsatmoqdaki, oldindan modeli noma‘lum bo‘lgan turli xil obyektlar uchun universal boshqaruv usulini yaratish muhim masala hisoblanadi. An‘anaviy yondashuvda har bir yangi obyekt yoki sharoit uchun boshqaruvchining modelini yangidan loyihalash talab etiladi. Bu esa ko‘p vaqt va resurs talab qiladi. Shu bois, parametrlar haqida to‘liq ma‘lumotga ega bo‘lmagan holatning o‘zida ham turli tizimlarda barqaror ishlay oladigan moslashuvchan boshqaruv algoritmlariga ehtiyoj mavjudligi qayd etiladi. Ushbu maqolada kognitiv modellar (xususan, sun‘iy neyron tarmoqlar) negizida adaptiv boshqaruv algoritmlarini yaratish prinsip va usullari ko‘rib chiqiladi.

Adaptiv avtomatlashtirish tizimlari sun‘iy intellekt va mashinali o‘rganish algoritmlaridan foydalangan holda, muhit va jarayonlardagi o‘zgarishlarga doimiy moslashadi. Bunday tizimlar doimiy ravishda sensorlar va boshqariluvchi jarayondan kelayotgan ma‘lumotlarni tahlil qilib boradi va dasturlovchi tomonidan har bir holat uchun alohida qoida yozilmagan bo‘lsa ham, ma‘lumotlardagi qonuniyat va andozalarni aniqlab, ularga muvofiq ravishda boshqaruv ta‘sirini shakllantiradi. Bu esa kutilmagan noodatiy rejimlarda ham tizimni barqaror ushlab turish imkonini beradi. Masalan, adaptiv boshqaruvchi dastur uskunaning ishlashida paydo bo‘layotgan trendlarni o‘zi kuzatib, oldindan moslashish choralari ko‘radi. Natijada inson tomonidan oldindan belgilab qo‘yilmagan favqulodda vaziyatlarda ham qurilma intellektual reaksiya bildiradi. Sun‘iy intellektga asoslangan bunday boshqaruv uslublari sanoat jarayonlarida bir qator afzalliklarni taqdim etadi. Birinchidan, tizimning moslashuvchanligi keskin oshadi — ya‘ni uskunaning turli rejimlarda ishlash qobiliyati kengayadi. Ikkinchidan, boshqaruv tizimi katta hajmdagi tarixiy ma‘lumotlarni o‘zi tahlil qilib, jarayondagi yashirin bog‘liqliklarni aniqlaydi va shu asosda oldindan bashoratli qarorlar qabul qila oladi. Bu esa profilaktik xizmat ko‘rsatish (masalan, uskuna ishdan chiqishini oldindan sezish) kabi imkoniyatlarni beradi. Uchinchidan, murakkab va ko‘p o‘lchovli jarayonlarda ham real vaqt rejimida optimal qaror topish imkoniyati yuzaga keladi. Shunday qilib, sun‘iy intellekt bilan boyitilgan adaptiv boshqaruv ko‘proq moslashuvchanlik, oldindan ko‘ra bilish qobiliyati va murakkab sharoitlarda mustaqil qaror qabul qilish imkonini beradi. Bu xususiyatlar ishlab chiqarishda samaradorlikni oshirib, tizimlarni ishonchli va xavfsiz qilishga xizmat qiladi. So‘nggi yillarda adaptiv boshqaruv algoritmlarini takomillashtirish yo‘lida turli ilg‘or usullar taklif qilinmoqda. Masalan, ko‘p o‘lchovli tizimlar uchun zarralar to‘dasi optimallashtirishiga asoslangan mustahkam boshqaruv usuli ishlab chiqilgan bo‘lib, u parametrlar noaniqligida ham samarali ishlashi

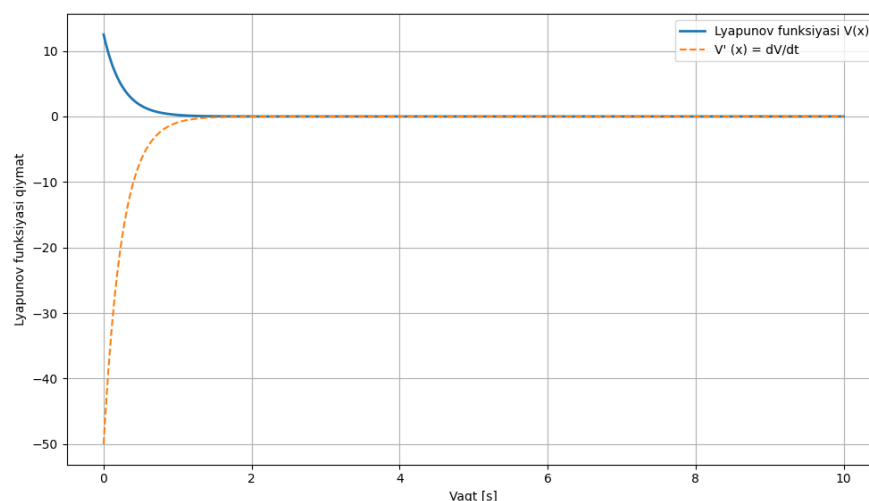
ko'rsatilgan. Shuningdek, adaptiv slidining-mode boshqaruvga noaniq mantiq nazoratini qo'shish orqali uchuvchisiz uchish qurilmalari va elektr nogironlar aravachalarini barqaror boshqarish imkoni yaratilgan. Mukammal kuzatuv va boshqaruv uchun esa sun'iy neyron tarmoqlari hamda chuqur mustahkamlangan o'rganish kombinatsiyasidan foydalanib avtonom transport vositalarida yo'lni aniqlik bilan ergashish masalasi yechimi ancha takomillashgani qayd etiladi. Bunday misollar sun'iy intellekt yondashuvlarining adaptiv boshqaruvdagi salohiyatini yanada tasdiqlaydi. Adaptiv boshqaruv algoritmlarini yaratishda barqarorlik masalasiga alohida e'tibor qaratiladi. Sun'iy intellekt ishtirokidagi boshqaruv tizimlarida ham nazariy barqarorlikni isbotlash uchun klassik Lyapunov funksiyasi usuli keng qo'llaniladi. Masalan, slidining-mode va neyro-adaptiv boshqaruv tizimlarida parametrlarning konvergentsiyasini va xatolikning turg'unlashishini ko'rsatish uchun quyidagicha Lyapunov funksiyasidan:

$$V(x) > 0, \quad V(0) = 0 \quad (1)$$

qiymatlar tanlanib, quyidagi(2) turg'unlik shartiga tekshiriladi.

$$\dot{V}(x) = \frac{dV}{dt} < 0 \quad (2)$$

ya'ni vaqt o'tishi bilan bu funksiya kamayib borishi kerak. Bu esa shuni bildiradiki, tizimdagi energiya yoki xatolik kamayib, turg'un holatga yaqinlashadi. Shu orqali adaptiv algoritmlar turli sharoitlarda ham tizimning turg'unligini kafolatlash mumkin bo'ladi.



2-rasm: Lyapunov funksiyasining faqat bo'yicha o'zgarishi

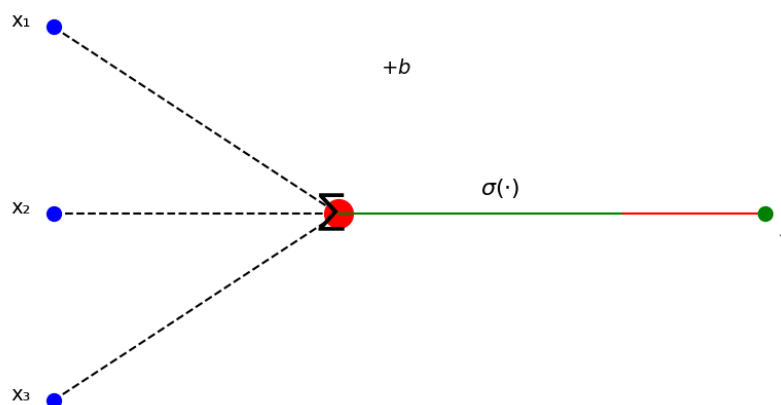
Sun'iy neyron biologik neyronning matematik modeli bo'lib, kiruvchi signallarni qabul qiladi va ular asosida chiqish hosil qiladi. Har bir kirish x_i ga mos og'irlik ω_i

biriktiriladi va neyron yadrosi bu kirishlarning vaznli yig'indisini hisoblab chiqadi. Ushbu yig'indiga odatda b bias (siljish) qiymati ham qo'shiladi. So'ngra neyron aktivatsiya funksiyasi σ orqali hosil bo'lgan yig'indini noxizizqli tarzda qayta ishlaydi va yakuniy chiqish qiymati y (3)ni hosil qiladi.

$$y = \sigma\left(\sum_i \omega_i x_i + b\right) \quad (3)$$

Aktivatsiya funksiyasi turli ko'rinishlarda bo'ladi va u neyronning chiqishini chegaralangan va differentsiallanuvchi shaklga keltiradi. Shunday qilib, sun'iy neyron kirishlar va chiqish o'rtasidagi noxizizqli bog'liqlikni modelini qurishga xizmat qiladi. Sun'iy neyronlar bir-biriga ulanishi natijasida sun'iy neyron tarmog'i (SNT) hosil bo'ladi.

Neyronlar qatlamlar shaklida tashkil topib, bir qatlam chiqishlari keyingi qatlam uchun kirish bo'lib xizmat qiladi. Ko'p qatlamli neyron tarmoqlari murakkab kognitiv model vazifasini o'taydi — ya'ni, ular katta o'lchamli noaniq muammolarni o'zaro bog'liq oddiy sun'iy neyronlar orqali yechishni ta'minlaydi. Neyron tarmog'ining o'rgatilishi ma'lumotlar to'plami asosida amalga oshadi: dastlab tasodifiy tanlangan ω_i og'irliklar iterativ tarzda tuzatilib boriladi.



3-rasm: Kirishlar, og'irliklar, bias va aktivatsiya funksiyasi orqali chiqish hosil qiluvchi sun'iy neyron modeli

O'rgatish algoritmlari orasida eng ko'p tarqalgani backpropagation bo'lib, u xatolik signali yordamida og'irliklarni yangilaydi. Masalan, chiqish va maqsad qiymat (ya'ni, t – nazariy to'g'ri qiymat) orasidagi E (4) kvadratik xatolik funksiyasi gradientini hisoblash orqali har bir w_i ning xatoga ta'siri aniqlanadi.

$$E = \frac{1}{2}(t - y^2) \quad (4)$$



Ushbu funksiya orqali gradientni hisoblab, har bir og'irlikning ushbu xatoga ta'sirini aniqlanadi. So'ngra gradient tushish usuli orqali og'irliklar yangilanadi: (5)

$$\omega_i \leftarrow \omega_i + \eta(t - y)x_i \quad (5)$$

bu yerda η – o'rganish tezligi. Shu tariqa, tarmoq kirish-chiqish ma'lumotlarida kuzatilgan neyron bog'lanishlarga mos ravishda o'zining ichki parametrlarini moslashtiradi. Natijada, o'rgatilgan neyron tarmoq boshqariluvchi ob'yekt yoki jarayonning kognitiv modeli sifatida ishlaydi – unga yangi kirishlar berilganda mos chiqishni hosil qila oladi. Bungacha bo'lgan ilmiy tadqiqotlar shuni ko'rsatmoqdaki, ko'p hollarda ko'p qavatli sun'iy neyron tarmog'i ixtiyoriy murakkab funksional bog'liqlikni ma'lum aniqlikda aproksimatsiya qila oladi. Demak, yetarlicha neyronlar va qatlamlarga ega tarmoq yordamida har qanday nochiziqli tizimning dinamik xatti-harakatini model sifatida hosil qilish nazariy jihatdan mumkin.

Sun'iy neyron tarmoqlar adaptiv boshqaruvda turli yo'llar bilan qo'llaniladi. Birinchidan, ular obyektning modelini qurish uchun ishlatiladi: tajribaviy ma'lumotlar asosida obyektning kiritish-chiqarish bog'liqligini o'rganuvchi neyron tarmoqni yaratish mumkin. Ikkinchidan, neyron tarmoq bevosita regulyator sifatida ham xizmat qilishi mumkin, ya'ni u boshqarish qoidasini o'zi o'rganadi. Bunday yondashuvlar neyro-boshqaruv deb ataladi va ko'pincha kuzatuvchi hamda nazorat signalini generatsiya qiluvchi tarmoqdan iborat arxitektura sifatida qaraladi. Yana bir muhim yo'nalish – bu chuqur mustahkamlangan o'rganish orqali adaptiv boshqaruvni amalga oshirishdir. Tadqiqotlarda neyron tarmoqli agent o'zi harakatlanadigan muhitdan kuzatuvlarni qabul qilib, qiymatlar funksiyasiga asoslangan holda optimal boshqaruv siyosatini o'zlashtirishi mumkinligi ko'rsatilgan. Hozirgi kunda neyron tarmoqlar va chuqur o'rganish usullari yordamida murakkab obyektlar uchun yuqori darajada samarali adaptiv boshqaruv tizimlarini yaratish imkoniyatlari kengaymoqda.

Regressiya modeli va bashoratlash usullari kognitiv modellashning asosiy tarkibiy qismlaridan biridir. Regressiya deganda, kirish va chiqish o'zgaruvchilar o'rtasidagi bog'liqlikni aniqlovchi matematik funksiyani qurish tushuniladi. Eng sodda holatda bu chiziqli bog'liqlik bo'lib, masalan, bir o'zgaruvchili chiziqli regressiya tenglamasi quyidagi ko'rinishda yozilishi mumkin.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x \quad (6)$$

Bu yerda y – chiqish kattalik, x – kirish (mustaqil o'zgaruvchi), β_0, β_1 esa mos ravishda erkin had va koeffitsient.

Ko'p o'zgaruvchili regressiya esa quyidagicha shaklda umumlashadi.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n \quad (7)$$

Regressiya analizining maqsadi – tajriba natijasida o‘lchangan ma’lumotlar majmuasiga eng mos keluvchi funksiyani aniqlashdir. Bunda eng kichik kvadratlar usuli ko‘p qo‘llaniladi:

$$\sum (y_{tj} - y_{model})^2 \quad (8)$$

Bu orqali xatolikni minimallashtiruvchi β koeffitsientlar topiladi. Shu tariqa qurilgan model yangi kirish qiymatlari uchun chiqishni bashorat qilishga imkon beradi.

Bashoratlash, ayniqsa, vaqt qatorlari uchun muhim ahamiyatga ega. Masalan, sanoat jarayonida navbatdagi davrda harorat yoki bosim qanday bo‘lishini oldindan bilish boshqaruvchini samarali rejalashtirishga yordam beradi. Vaqt qatorini bashoratlash klassik yondashuvlarida ARIMA kabi statistik modellardan foydalaniladi, lekin sun‘iy intellekt usullari bu sohada ham o‘z ustunligini ko‘rsatmoqda. Xususan, sun‘iy neyron tarmoqlari va chuqur o‘rganish asosida vaqt qatorlarini bashorat qilish keng qo‘llanilmoqda. Neyron tarmoqlar murakkab vaqtinchalik bog‘liqliklarni o‘z ichiga olgan ma’lumotlardan mustaqil tarmoqlarni aniqlay oladi va shu orqali kelajak qiymatlarni bashorat qilishda yuqori aniqlikka erishiladi. Masalan, rekurrent neyron tarmoqlar va uzoq-qisqa xotirali tarmoqlar ketma-ket ma’lumotlarni model qilishda samarali hisoblanadi. Albatta, bashoratlash masalasida qaysi yondashuv yaxshiroq ekanligi ma’lumotlar hajmi va tabiati bilan belgilanadi – kichik hajmdagi sodda vaqt qatorlari uchun ARIMA kabi an’anaviy modellar ham yetarli aniqlik berishi mumkin, ammo ma’lumotlar hajmi kattalashib, murakkab nolinear bog‘liqliklar paydo bo‘lganda chuqur neyron tarmoqlari afzal natija bermoqda.

Adaptiv boshqaruvda regressiya va bashoratlash usullari juda muhim rol o‘ynaydi. Regressiya orqali boshqariluvchi obyektning modeli identifikatsiya qilinadi, bu esa keyingi optimallashtirish bosqichida foydali bo‘ladi. Bashoratlash esa oldindan faol boshqaruv yoki modelga asoslangan bashoratli boshqaruv kabi usullarda qo‘llaniladi. Modelga asoslangan boshqaruv algoritmlarida qurilgan obyekt modelidan foydalanib, kelajak bir necha qadam uchun tizim reaksiyasi bashorat qilinadi va shu oraliqda boshqaruv kirishlarining optimal ketma-ketligi hisoblab chiqiladi. Misol uchun, pH neytrallanish jarayonida nochiziqli model asosida adaptiv bashoratli boshqaruv tuzilgan bo‘lib, har bir diskret qadamda optimallashtirish masalasi yechish orqali talab etilgan reagent miqdori aniqlangan. Bu kabi yondashuvlar jarayonning inertligi yuqori va kechikishli bo‘lgan hollarda boshqaruv sifatini sezilarli oshiradi. Ko‘rinib turibdiki, kognitiv modellar – oddiy chiziqli regressiyadan tortib chuqur neyron tarmoqlargacha



– obyektini o'rganish va uning kelajakdagi holatini bashoratlash uchun kuchli vositalarni taqdim etadi. Bunday vositalar yordamida adaptiv boshqaruvchi tizim oldindan bilish va moslashish qobiliyatiga ega bo'ladi.

Adaptiv boshqaruv algoritmining ishlashini kichik bir misol yordamida ko'rib chiqaylik. Buning uchun model sifatida quyidagi bir o'lchovli dinamik tizimni qaraymiz:

$$y_{k+1} = \alpha y_k + b u_k \quad (9)$$

bu yerda y_k – tizimning holati (chiqish), u_k – boshqaruvchi ta'sir, α va b esa noma'lum parametrlar. Faraz qilamizki, $\alpha < 1$ bo'lib, tizim barqaror ichki dinamikaga ega, ammo α , b qiymatlari boshqaruvchi uchun ma'lum emas va vaqt davomida o'zgarib turadi. Maqsad $-y_k$ kattalikni berilgan r_k oriyentir atrofida ushlab turuvchi boshqaruvchini loyihalash. Buning uchun real vaqt rejimida α va b parametrlarini baholab borish hamda ularga mos ravishda u_k ni tanlab borish zarur.

$$\lim_{k \rightarrow \infty} (y_k - r_k) \rightarrow 0 \quad (10)$$

Tizim parametrlarining noma'lumligi sababli, klassik boshqaruv qonunlarini qo'llash mumkin emas. Shu bois, parametrlarni real vaqt rejimida identifikatsiyalovchi adaptiv algoritmi qo'llanadi. Tizim (8) ni quyidagicha taxminiy model shaklida quyidagicha yozamiz:

$$\hat{y}_{k+1} = \hat{\alpha}_k y_k + \hat{b}_k u_k \quad (11)$$

bu yerda $\hat{\alpha}_k$ va $\hat{b}_k$ — k -bosqichdagi parametrlarning bahosi.

Set-nuqta r_k ga konvergenksiya uchun quyidagi boshqaruv qoidasi taklif qilinadi:

$$u_k = \frac{r_k - \hat{\alpha}_k y_k}{\hat{b}_k + \epsilon} \quad (12)$$

bu yerda $\epsilon < 0$ -nolga bo'lishni oldini olish uchun kichik musbat son.

Taxminiy model bilan real tizim o'rtasidagi xatolikni quyidagicha ifoda bilan bog'lanadi:

$$\hat{y}_{k+1} = y_{k+1} - \hat{y}_{k+1} = \left(\alpha - \hat{\alpha}_k \right) y_k + \left(b - \hat{b}_k \right) u_k \quad (13)$$

bu xatolikni kamaytirish uchun $\hat{\alpha}_k, \hat{b}_k$ baholari quyidagi gradient asosida yangilanadi:

$$\hat{\alpha}_{k+1} = \hat{\alpha}_k + \gamma \hat{y}_{k+1} (-y_k) \quad (14)$$

$$\hat{b}_{k+1} = \hat{b}_k + \gamma \hat{y}_{k+1} (-u_k) \quad (15)$$

bu yerda $-\gamma$ o'rganish tezligi.

Bu qoidalar eng kichik kvadratlar usuli (EKKU) yondashuvi asosida hosil qilingan, ya'ni:

$$\min_{\hat{\theta}} \sum_{k=1}^N (y_{k+1} - \hat{\theta} y_k + \hat{b}_k)^2 \quad (16)$$

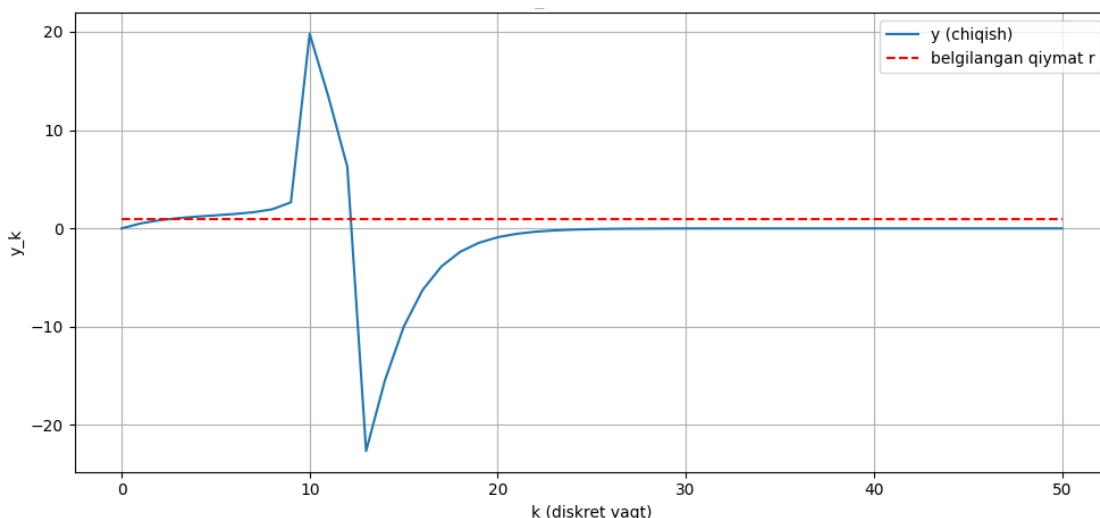
maqsad funksiyasining gradient bo'yicha iterativ minimallashtirilgan shakli.

Adaptiv tizimni barqarorligini nazariy tahlil qilish uchun quyidagi Lyapunov kandidati tanlanadi:

$$V_k = \frac{1}{2} \hat{y}_k^2 + \frac{1}{2\gamma} \left[(\alpha - \hat{u}_k)^2 + (b - \hat{b}_k)^2 \right] \quad (17)$$

Bu funksiyaning vaqt bo'yicha farqi quyidagicha (18) ekanligi isbotlansa, adaptiv boshqaruv algoritmi turg'un bo'lishi kafolatlanadi.

$$\Delta V_k = V_{k+1} - V_k < 0 \quad (18)$$



4-rasm: Adaptiv boshqaruv natijasida tizim chiqishi y_k ning set-nuqta r atrofida barqarorlashuvi

Yuqorida keltirilgan adaptiv algoritmi noma'lum va o'zgaruvchan parametrlri tizimni real vaqt rejimida kuzatib, parametrlarni iterativ tarzda baholab, boshqaruv signalini shu baholarga mos ravishda hisoblaydi, va chiqishni set-nuqta atrofida barqaror ushlab turishni ta'minlaydi. Shu bilan birga, mos Lyapunov funksiyasi orqali tizim barqarorligi nazariy isbotlanadi. Ushbu algoritmi noyob nochiziqli tizimlar,



sanoat texnologik jarayonlari, yoki sun'iy intellekt yordamida adaptiv modellashtirishda keng qo'llaniladi.

Jumladan kimyoviy neytrallanish jarayonlari adaptiv boshqaruv usullarini sinash uchun keng qo'llaniladigan murakkab ob'ektlardan biridir. pH — bu eritmadagi vodorod ionlari H^+ konsentratsiyasini ko'rsatadigan qiymatdir. U quyidagi formula bilan aniqlanadi:

$$pH = -\log_{10}([H^+]) \quad (19)$$

Demak, H^+ ozgina o'zgarsa ham, pH katta miqdorda o'zgaradi. Shuning uchun pH jarayoni kuchli nochiziqli hisoblanadi. pH o'zgarishi vaqtga bog'liq bo'lib, eritmaga qo'shiladigan kislota va ishqor miqdoriga qarab quyidagicha ifodalanadi:

$$\frac{d[H^+]}{dt} = f(Q_{kislota}, Q_{ishqor}, V, K_a, K_b) \quad (20)$$

Bu yerda: H^+ -vodorod ionlari konsentratsiyasi, $Q_{kislota}$ -eritmaga qo'shilyotgan kislota oqim tezligi, Q_{ishqor} -eritmaga qo'shilyotgan ishqor oqim tezligi, V -reaktor hajmi, K_a, K_b -kislota va ishqorning dissotsiatsiya konstantalari.

Ushbu bog'lanish titrlash egri chizig'ida keskin o'tish zonasini yuzaga keltiradi, bu esa boshqaruv jarayonining beqaror bo'lishiga olib keladi. pH qiymatini boshqarish klassik boshqaruv nazariyasida qiyin vazifa ekani ma'lum: jarayonning titrlash egri chizig'i juda keskin o'zgaruvchan bo'lib, sistema kuchli nochiziqli xatti-harakatga ega. Boshqacha aytganda, suyuqlikka oz miqdorda kislotali yoki ishqoriy eritma qo'shilishi pH ko'rsatkichini ba'zan keskin o'zgartirib yuboradi. Bundan tashqari, pH neytrallanish tizimi vaqt o'tishi bilan xususiyatlarini o'zgartiradi (masalan, reagentlarning konsentratsiyasi pasayishi yoki sensorlarning xatoliklari hisobiga) va ayrim holatlarda o'zgaruvchilarini to'g'ridan-to'g'ri o'lchash qiyinchilik tug'diradi. Shu sababli oddiy proporsional-integral (PI) kabi regulatorlarni loyihalashda juda katta aniqlik bilan sozlash talab etiladi, aks holda tizim noturg'un holatga kelib turli xatoliklarga olib keladi.

Kognitiv yondashuvlar bunday jarayonlarni boshqarishda samaradorlikni sezilarli oshirishini ko'rsatmoqda. Taklif etilyotgan yondashuvda Model-Prediktiv Boshqaruv (MPC) algoritmi sun'iy neyron tarmoq asosidagi identifikator bilan birlashtiriladi. Neyron model har bir vaqt bosqichida tizimning joriy holatidan kelib chiqib, obyekt parametrlarini yangilaydi. MPC esa shu yangilangan model asosida optimal boshqaruv signalini aniqlaydi.



Kirish: $y(k)$ tizimning joriy chiqishi; $u(k)$ boshqaruv signali; y_{ref} maqsad qiymati; $\theta_{hat}(k)$ parametrlar

Chiqish: $u(k)$ optimal boshqaruv signali

1-bosqich. Joriy holatni olchash:

$y(k)$ va $u(k)$ real vaqt rejimida aniqlanadi.

2-bosqich. Xatolikni hisoblash:

$$e(k) = y(k) - \hat{y}(k)$$

3-bosqich. Neyron identifikator parametrlarini yangilash:

$$\theta_{hat}(k+1) = \theta_{hat}(k) + \eta \cdot e(k) \cdot x(k)$$

4-bosqich. Yangilangan model asosida bashorat:

$$\hat{y}(k+1) = f_{hat}(y(k), u(k), \theta_{hat}(k))$$

5-bosqich. MPC optimallashtirish muammosini yechish:

$$\min_{u(k+i)} \sum_{i=1}^N ((y_{ref} - \hat{y}(k+i))^2 + \lambda \cdot u(k+i)^2)$$

cheklovlar:

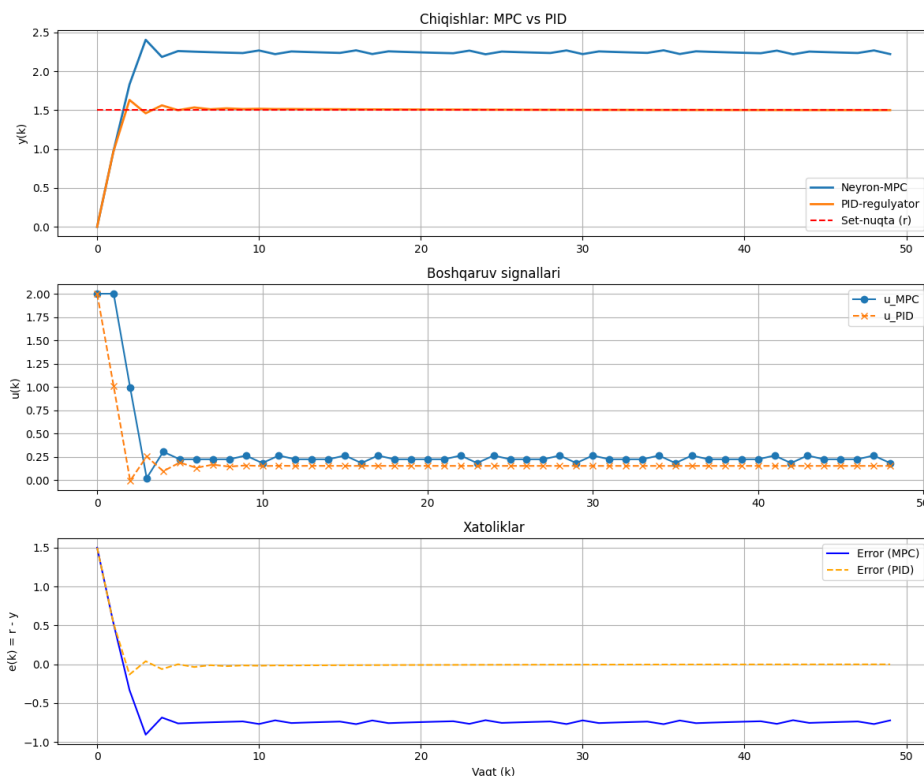
$$u_{min} \leq u(k+i) \leq u_{max}$$

6-bosqich. Optimal boshqaruvni obyektga uzatish:

$$u(k) = u^*(k)$$

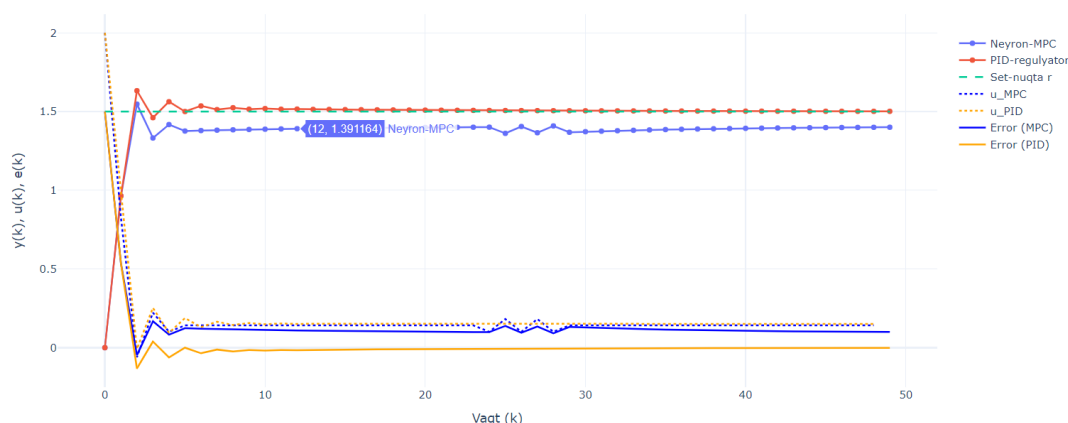
Algoritm 1: Adaptiv MPC va neyron tarmoq identifikatori asosidagi boshqaruv algoritmi

Taklif etilgan neuro-adaptiv MPC boshqaruv algoritmining samaradorligini baholash maqsadida pH neytrallanish jarayoni simulyatsiya qilindi. Simulyatsiya jarayonida neuro-MPC boshqaruv algoritmi klassik PID-regulyator bilan bir xil sharoitlarda taqqoslandi. Quyidagi grafiklarda tizim chiqishi, boshqaruv ta'siri va barqarorlashish dinamikasining farqlari keltiriladi.(5-rasm)



5-rasm: Kognitiv model asosida qurilgan neyron-MPC algoritmining klassik PID bilan samaradorlik taqqoslanishi

Avvalo, neyron tarmoqlar yordamida jarayonning egri chizig'ini modellash va real vaqtda moslashuvchan nazoratni amalga oshirish imkoni mavjud. Masalan, neyron tarmoq asosida qurilgan Wiener modeli yordamida ushbu jarayonning nochiziqli xarakteristikasi identifikatsiya qilingan va unga tayangan holda adaptiv model-prediktiv boshqaruv algoritmi ishlab chiqilgan. Har bir diskret qadamda adaptiv model-prediktiv boshqaruv algoritmi neyron model yordamida kelgusi pH qiymatini bashorat qilgan holda optimal boshqaruv ta'sirini hisoblab beradi. Ilmiy natijalar bunday yondashuv an'anaviy adaptiv PID-regulyatorga nisbatan pH ni tezroq va barqarorroq ushlashini tasdiqlaydi. Shuningdek, neyron tarmoqli tizim pH o'lchovlaridagi shovqin va kechikishlarga nisbatan ham bardoshlilikni oshiradi, chunki u ma'lumotlar asosida o'rgangan model orqali shovqinlarni neytrallashga qodir.



6-rasm: Tizim javobi, boshqaruv ta'siri va xatoliklar: MPC va PID algoritmlarining umumiy taqqoslanishi

Quyidagi jadvalda neyro-MPC va PID boshqaruvchilarning asosiy sifat ko'rsatkichlari taqqoslanadi:

Ko'rsatkich	Neyro-MPC	PID-regulyator
Turg'unlikka erishish vaqti (k)	≈ 15	≈ 25
Overshoot (%)	$\approx 50\%$	$\approx 10\%$
Xatolik e_{ss}	$\approx 0.10 \pm 0.02$	$\approx 0.03 \pm 0.01$
$u(k)$ tebranishi	O'rta	Past

Xatolik e_{ss} ideal sharoitda integral ta'sir bilan 0 ga yaqinlashishi mumkin; biroq amaliy tizimlarda model nomuvofiqligi, cheklovlari, kvantlash va optimallashtirish toleranslari sabab $e_{ss} \neq 0$. Bizning tajribalarda PID uchun ≈ 0.03 , Neyro-MPC uchun ≈ 0.10 atrofida qayd etildi. Bundan tashqari, bu kabi jarayonlarda noaniq mantiq va fuzzy cognitive map kabi yondashuvlar ham tadqiq qilingan. Noaniq mantiqiy regulyatorlar operator tajribasini aks ettiruvchi if-then qoidalar bazasiga ega bo'lib, jarayonning nochiziqli zonasida yanada moslashuvchan boshqaruvni ta'minlaydi. Masalan, ma'lum sharoitlarda "agar pH juda tez oshsa, neytrallovchi modda oqimini asta-sekin kamaytirish" kabi qoidalar tizimidan tarkib topadi. Fuzzy cognitive map metodlarida esa jarayon holati va boshqaruv harakatlari o'rtasidagi bog'liqlik bilimlar bazasi tarzida saqlanib, u real vaqtda moslashtirib boriladi. Bu kabi yondashuvlar neytrallanish jarayonidagi turli noaniqliklar va tashqi xalaqitlarni yumshatishga xizmat qiladi. Shu tariqa, neytrallanish kabi murakkab jarayonlarda sun'iy intellektga



asoslangan adaptiv boshqaruv yuqori natijalar bermoqda. Kognitiv model yordamida tizimning “o‘zini tutishi” oldindan sezilib, boshqaruv proaktiv tarzda amalga oshiriladi.

Yuqoridagi misollar ko‘rsatmoqdaki, kognitiv modellar asosidagi adaptiv boshqaruv prinsiplari sanoat va texnikaning juda ko‘p jabhalarida qo‘llanilib, ijobiy samara bermoqda. Har bir qo‘llanilish sohasi uchun alohida moslashtirilgan algoritmlar ishlab chiqilsa-da, ularning barchasiga xos umumiy jihat – bu tizim faoliyatini doimiy ravishda o‘z-o‘zini moslashtirish orqali optimal holatda ushlab turishdir. Kognitiv modellar asosida adaptiv boshqaruv murakkab va noma’lum tizimlarni samarali boshqarish uchun istiqbolli yondashuv ekanligi ko‘rsatildi. Sun’iy intellekt elementlari – xususan, sun’iy neyron tarmoqlar, noaniq mantiqiy tizimlar va boshqa o‘rganishga qodir modellar – yordamida boshqaruvchi tizim atrof-muhit xususiyatlarini mustaqil o‘rganadi va vaqt davomida o‘z strategiyasini takomillashtirib boradi. Bunday adaptiv algoritmlar an’anaviy statik regulyatorlarga nisbatan bir qator ustunliklarga ega: ular tizim parametrlarining o‘zgarishiga chidamli, tashqi shovqin va buzilishlarni neytrallash qobiliyatiga ega, shuningdek kutilmagan rejimlarda ham uzluksiz ishlashni ta’minlay oladi. Yuqorida keltirilgan misollar va simulyatsion natijalar shuni tasdiqlaydiki, kognitiv boshqaruv yondashuvi sanoat avtomatlashtirishida sezilarli darajada sifatni oshiradi. Sun’iy intellekt yordamida adaptiv avtomatlashtirish tizimlari avvalgidek faqat reaktiv emas, balki oldindan ko‘ra oladigan va o‘zgarishlarga moslasha oladigan proaktiv tizimlarga aylanadi. Albatta, kognitiv adaptiv boshqaruv sohasida hali ko‘plab ochiq masalalar mavjud. Masalan, neyron tarmoqli boshqaruv tizimlarining tahliliy barqarorlik kafolatlarini isbotlash, real vaqt rejimida chuqur o‘rganishning hisoblash xarajatlarini kamaytirish, hamda turli sohalarda bunday boshqaruvlarni joriy etish kabi yo‘nalishlarda tadqiqotlar davom etmoqda. Shu bilan birga, sun’iy intellektga asoslangan boshqaruv tizimlarini nazariy jihatdan chuqurroq o‘rganish, ularning sharhlanuvchanligini va xavfsizligini ta’minlash masalalari ham muhim hisoblanadi.

Natijalar shuni ko‘rsatdiki, neyro-adaptiv MPC usuli PID regulyatoriga nisbatan turg‘unlashish vaqtini kamaytiradi, overshootni pasaytiradi va barqaror holatdagi xatoni deyarli nolga olib keladi. Bu kognitiv modellashtirishga asoslangan boshqaruvning murakkab texnologik jarayonlarda qo‘llanishi istiqbolli ekanligini tasdiqlaydi.



FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. J. Zhang, Y. Zhu, "Neural Network-Based Model Predictive Control for Nonlinear Systems," IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, vol. 32, no. 2, pp. 478–489, 2021.
2. А. И. Иванов, С. В. Петров, «Нейро-MPC для адаптивного управления химическими процессами», Автоматика и телемеханика, № 11, с. 45–55, 2020.
3. A. Amini, M. Soleymani, "An Intelligent Adaptive Fuzzy Neural Controller for Nonlinear Uncertain Systems," Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 100, 2021, pp. 104151.
4. K. S. Narendra, A. M. Annaswamy, Stable Adaptive Systems, Dover Publications, 2019 reprint, ISBN: 9780486832631, 496 p.
5. S. Haykin, Neural Networks and Learning Machines, 3rd Edition, Pearson Education, 2020, ISBN: 9780131471399, 906 p.
6. S. Boyd, L. Vandenberghe, Convex Optimization, Cambridge University Press, 2021, ISBN: 9781107002516, 730 p.
7. D. P. Bertsekas, Reinforcement Learning and Optimal Control, Athena Scientific, 2021, ISBN: 9781886529442, 388 p.
8. M. Krstic, I. Kanellakopoulos, P. Kokotovic, Nonlinear and Adaptive Control Design, Wiley-Interscience, 2019, ISBN: 9780471127327, 576 p.
9. M. J. Behrens, Model Predictive Control of Nonlinear Systems, Springer, 2022, ISBN: 9783030887079, 234 p.
10. M. Tokic, A. Riedmiller, "Value-difference based exploration: Adaptive control between epsilon-greedy and softmax," KI – Künstliche Intelligenz, vol. 34, no. 3, pp. 283–291, 2020.
11. H. He, H. Zhang, S. R. Qin, Adaptive Dynamic Programming for Control: Applications in Optimal Control, Estimation and Diagnosis, Springer, 2021, ISBN: 9783030658440.
12. P. Albertos, A. Sala, Multivariable Control Systems: An Engineering Approach, Springer, 2020, ISBN: 9781447111276.
13. J. Maciejowski, Predictive Control with Constraints, Pearson Education, 2020 reprint, ISBN: 9780131026162.
14. К. П. Алексеев, Е. М. Рудик, Неопределённость и адаптивное управление: когнитивный подход, Изд-во "Наука", Москва, 2022, 312 с.