UDK 681.5.015.23:004.89

TEXNOLOGIK JARAYON PARAMETRLARINI REAL VAQT REJIMIDA AVTOMATIK OPTIMALLASHTIRISH TIZIMINI ISHLAB CHIQISH

Kamolova Fotima Alisher qizi
Toshkent to'qimachilik va yengil sanoat instituti (TTYeSI)
https://doi.org/10.5281/zenodo.22921943

Annotatsiya. Mazkur kengaytirilgan ilmiy tezisda sanoat korxonalaridagi texnologik jarayon parametrlarini real vaqt rejimida kuzatish, prognozlash va avtomatik optimallashtirishga mo'ljallangan intellektual boshqaruv tizimining konseptual hamda algoritmik modeli ishlab chiqildi. Taklif etilgan tizim real vaqt ma'lumotlarini yig'ish, signalni filtrlash, texnologik obyektning adaptiv modelini yangilash, cheklovlarni hisobga olgan holda iqtisodiy optimal ish nuqtasini aniqlash va Model Predictive Control orqali boshqaruv ta'sirlarini shakllantirish bosqichlarini birlashtiradi. Real-Time Optimization, Model Predictive Control, rekursiv identifikatsiya va Digital Twin yondashuvlari yagona yopiq konturga integratsiyalandi. Namunaviy hisoblash tajribasida harorat, bosim, material sarfi, energiya iste'moli va mahsulot sifati ko'rsatkichlari tahlil qilindi. Modellash natijalari RTO–MPC tizimi dinamik xatolikni, rostlanish vaqtini va energiya sarfini kamaytirish, shu bilan birga texnologik cheklovlarga rioya qilish imkonini berishini ko'rsatdi.

Kalit so'zlar: texnologik jarayon, real vaqt rejimi, avtomatik optimallashtirish, Model Predictive Control, MPC, Real-Time Optimization, RTO, raqamli egizak, adaptiv boshqaruv, Industry 4.0, energiya samaradorligi.

Аннотация. В тезисе разработана концептуальная и алгоритмическая модель интеллектуальной системы автоматической оптимизации параметров технологического процесса в режиме реального времени. Система объединяет сбор и фильтрацию данных, адаптивную идентификацию объекта, расчет экономически оптимальной рабочей точки, Model Predictive Control и технологию цифрового двойника. На модельном непрерывном процессе проведено сравнение традиционного управления и архитектуры RTO–MPC. Результаты вычислительного эксперимента показывают возможность уменьшения динамических ошибок, времени регулирования и энергопотребления при соблюдении технологических ограничений.

Ключевые слова: технологический процесс, оптимизация в реальном времени, автоматическое управление, MPC, RTO, цифровой двойник, адаптивное управление, Industry 4.0.

Abstract. This extended thesis develops a conceptual and algorithmic intelligent control system for real-time monitoring, prediction and automatic optimization of technological process parameters. The proposed architecture integrates online data acquisition, signal preprocessing, adaptive model identification, Real-Time Optimization, Model Predictive Control and Digital Twin technologies. A representative continuous process with temperature, pressure, flow rate, energy consumption and product quality variables is used for simulation-based evaluation. The results indicate that the RTO–

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

MPC structure can reduce dynamic deviations, settling time and energy consumption while explicitly respecting process constraints.

Keywords: technological process, real-time optimization, automatic control, MPC, RTO, digital twin, adaptive control, Industry 4.0, energy efficiency.

KIRISH

Zamonaviy sanoat korxonalarida ishlab chiqarish samaradorligi, energiya tejamkorligi va mahsulot sifatini barqaror saqlash texnologik parametrlarni aniq boshqarish bilan bevosita bog‘liq. Kimyo, neft-gaz, oziq-ovqat, farmatsevtika, energetika va metallurgiya jarayonlarida harorat, bosim, oqim, konsentratsiya, namlik, elektr quvvati va boshqa ko‘rsatkichlar o‘zaro bog‘langan dinamik tizimni hosil qiladi. Shu sababli bir parametr bo‘yicha berilgan boshqaruv ta’siri boshqa parametrlarning ham o‘zgarishiga olib keladi. Klassik alohida PID konturlari oddiy obyektlarda yuqori ishonchlilikka ega bo‘lsa-da, ko‘p o‘zgaruvchili va cheklovlarga ega murakkab jarayonlarda global texnologik yoki iqtisodiy optimumni ta’minlash imkoniyati cheklangan (1, 2).

Model Predictive Control (MPC) ko‘p o‘zgaruvchili sanoat obyektlarini boshqarishning samarali usullaridan biri bo‘lib, u texnologik obyektning matematik modelidan foydalanib kelajakdagi holatlarni prognoz qiladi va boshqaruv ta’sirlarini optimallashtirish masalasi sifatida hisoblaydi. MPC texnologik parametrlar, ijro mexanizmlari va ularning o‘zgarish tezligiga qo‘yilgan cheklovlarni to‘g‘ridan-to‘g‘ri hisoblashga kiritishi mumkin. Shu xususiyat sababli u neftni qayta ishlash, kimyo sanoati va energetikada keng qo‘llanadi (1, 3).

Biroq MPCning asosiy vazifasi ko‘pincha jarayonni oldindan belgilangan setpointlar atrofida ushlab turishdan iborat. Ishlab chiqarishning iqtisodiy optimumi esa energiya tarifi, xomashyo xususiyatlari, mahsulot talabi, uskunaning holati va texnologik cheklovlar o‘zgarishi bilan vaqt bo‘yicha siljib boradi. Real-Time Optimization (RTO) ushbu muammoni hal etishga xizmat qiladi: RTO yuqori darajadagi optimizator sifatida real jarayon ma’lumotlari asosida iqtisodiy maqsad funksiyasini minimallashtiradi yoki foyda funksiyasini maksimal qiladi va quyi boshqaruv darajasi uchun optimal setpointlarni aniqlaydi (4, 5).

Industry 4.0 konsepsiyasi, sanoat Interneti, IoT sensorlari, yuqori tezlikdagi tarmoqlar va edge computing texnologiyalarining rivojlanishi ishlab chiqarish obyektlaridan katta hajmdagi ma’lumotlarni real vaqt rejimida olish imkoniyatini keskin kengaytirdi. Kiber-fizik ishlab chiqarish tizimlarida fizik obyektlar, hisoblash vositalari va aloqa kanallari bitta boshqaruv muhitiga birlashtiriladi (6, 7). Bu esa jarayon modelini doimiy yangilash va optimallashtirish algoritmlarini ma’lumot oqimiga bevosita bog‘lash uchun texnologik asos yaratadi.

Raqamli egizak (Digital Twin) konsepsiyasi real ishlab chiqarish obyektining virtual nusxasini yaratish va uni real vaqt ma’lumotlari bilan sinxronlashtirishga asoslanadi. Raqamli egizak monitoring, diagnostika, prognozlash, prediktiv texnik xizmat va optimallashtirish vazifalarini qo‘llab-quvvatlaydi (8–11). ISO 23247 standartlari ishlab chiqarish tizimlarida raqamli egizak arxitekturasini tartibga soluvchi umumiy tamoyillarni tavsiflaydi (12).

Shunga qaramay, real korxonalarda ma’lumotlarni yig‘ish, ularning sifatini nazorat qilish, model parametrlarini online yangilash, iqtisodiy optimumni hisoblash va boshqaruv signallarini xavfsiz shakllantirishni yagona yopiq konturga birlashtirish murakkab ilmiy-amaliy masala bo‘lib qolmoqda.

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

Sensor shovqini, aloqa kechikishi, uskunaning eskirishi, xomashyo xususiyatining o'zgarishi va modelning real obyektga mosligini yo'qotishi optimallashtirish sifatiga salbiy ta'sir qiladi (5, 9, 13).

Tadqiqotning maqsadi – texnologik jarayon parametrlarini real vaqt rejimida kuzatish, prognozlash va texnologik hamda iqtisodiy mezonlar asosida avtomatik optimallashtirish imkonini beruvchi adaptiv RTO–MPC tizimini ishlab chiqish. Ushbu maqsadga erishish uchun real vaqt ma'lumotlarini yig'ish arxitekturasini ishlab chiqish, obyektning adaptiv matematik modelini shakllantirish, parametrlarni online identifikatsiyalash, cheklovli optimallashtirish mezonini tuzish, RTO va MPC darajalarini integratsiyalash hamda tizimning ishlashini hisoblash tajribasi asosida baholash vazifalari belgilandi.

TADQIQOT MATERIALLARI VA METODLARI

Tizimning funksional arxitekturasi

Taklif etilgan tizim kiber-fizik boshqaruv tamoyiliga asoslanadi. Texnologik obyekt, sensorlar, PLC yoki sanoat kontrolleri, IoT/OPC UA kommunikatsiya qatlami, real vaqt ma'lumotlar bazasi, Digital Twin modeli, RTO optimizatori, MPC regulyatori va ijro mexanizmlari yagona axborot konturiga birlashtiriladi. Bunday arxitektura real obyekt holatini uzluksiz kuzatish, virtual modelni yangilash va hisoblangan optimal boshqaruv ta'sirlarini texnologik obyektga qaytarish imkonini beradi (6, 8, 12).

Boshqaruv konturining tez qismi soniyalar darajasida ishlaydi va holatni baholash hamda MPC hisobini bajaradi. Sekinroq iqtisodiy kontur esa ishlab chiqarish sharoitiga qarab o'nlab soniya yoki bir necha daqiqada bir marta RTO masalasini yechadi. Bunday ierarxik ajratish katta hisoblash yukini kamaytiradi va real vaqt talablarini bajarishga imkon yaratadi (4, 5).

1-rasm. Taklif etilgan real vaqt optimallashtirish tizimining funksional ketma-ketligi

Texnologik obyekt
↓ Sensorlar (T, P, F, Q, E)
↓ PLC / IoT Gateway
↓ Filtrlash va validatsiya
↓ Real vaqt ma'lumotlar bazasi
↓ **Digital Twin + adaptiv model**
↓ **RTO iqtisodiy optimizatori**
↓ **MPC boshqaruv algoritmi**
↓ **Safety layer va cheklovlar**
↓ Ijro mexanizmlari

Real vaqt ma'lumotlarini yig'ish va qayta ishlash

Texnologik jarayonning joriy holati $z(k)=[T(k), P(k), F(k), Q(k), E(k)]$ vektor bilan ifodalanadi. Bu yerda T – harorat, P – bosim, F – material sarfi, Q – mahsulot sifati indeksi, E – energiya sarfi, k esa diskret vaqt indeksidir. Sensorlardan kelayotgan ma'lumotlar boshqaruv algoritmiga uzatilishidan oldin fizik diapazon, o'zgarish tezligi va ma'lumotning yangilanish vaqti bo'yicha tekshiriladi.

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

Sensor signalidagi yuqori chastotali shovqinni kamaytirish uchun eksponensial silliqlash qo'llanilishi mumkin: $\hat{z}(k)=\alpha z(k)+(1-\alpha)\hat{z}(k-1)$. α koeffitsiyenti 0 dan 1 gacha tanlanadi. Kichik α kuchli silliqlashni, katta α esa tizimning yangi o'lchovlarga tezroq javob berishini ta'minlaydi. Jarayon dinamikasi tez bo'lgan konturlarda filtrlash kechikishi alohida hisobga olinishi lozim.

Ma'lumotlarni validatsiya qilish bosqichi algoritmning xavfsiz ishlashi uchun alohida ahamiyatga ega. Masalan, harorat sensori fizik jihatdan mumkin bo'lmagan qiymatni uzatsa, optimizator ushbu ma'lumotni to'g'ridan-to'g'ri qabul qilmasligi kerak. Bunday holatda oxirgi ishonchli qiymat, parallel sensor yoki holat kuzatuvchisidan olingan baho vaqtincha ishlatilishi mumkin.

Texnologik jarayonning adaptiv matematik modeli

MPC uchun obyektning diskret holat modeli $x(k+1)=Ax(k)+Bu(k)+Ed(k)+w(k)$, $y(k)=Cx(k)+v(k)$ ko'rinishida qabul qilindi. Bu yerda x(k) – tizim holati, u(k) – boshqaruvchi ta'sirlar, d(k) – o'lchanadigan tashqi buzilishlar, y(k) – boshqariluvchi chiqishlar; A, B, C va E – model matritsalari; w(k) va v(k) – jarayon hamda o'lchash shovqinlari.

Boshqaruvchi ta'sirlar vektori $u(k)=[H(k), V(k), Fin(k)]^T$ ko'rinishida qabul qilindi. H – isitish quvvati, V – boshqaruvchi klapan holati, Fin – kiruvchi material oqimi. Real obyekt parametrlari vaqt davomida o'zgarishi sababli model doimiy deb qabul qilinmaydi. Issiqlik almashinuvi yuzasining ifloslanishi, uskunaning eskirishi yoki xomashyo tarkibining o'zgarishi statik modelning aniqligini kamaytirishi mumkin.

Shu sababli model parametrlarini online yangilash uchun rekursiv eng kichik kvadratlar usuli qo'llanadi. Parametrlar $\theta(k)=\theta(k-1)+K(k)[y(k)-\varphi^T(k)\theta(k-1)]$ ifoda bo'yicha tuzatiladi. Forgetting factor $\lambda<1$ bo'lganda yangi ma'lumotlarga nisbatan yuqoriroq vazn beriladi. Bu mexanizm raqamli egizak va real obyekt o'rtasidagi model driftini kamaytiradi (9, 13).

RTO va MPC optimallashtirish mezoni

Taklif etilgan tizim faqat texnologik parametrning setpointdan og'ishini emas, balki energiya sarfi, mahsulot sifati va boshqaruv qurilmalarining ortiqcha harakatlanishini ham hisobga oladi. MPCning integral maqsad funksiyasi $J=\Sigma(y-r)^TQ(y-r)+\Sigma\Delta u^TR\Delta u+\lambda E\cdot E+\lambda Q\cdot LQ$ ko'rinishida shakllantiriladi. Bunda r – RTO tomonidan aniqlangan optimal setpoint, Q – chiqish xatolarining vazn matritsasi, R – boshqaruv signali o'zgarishining vazni, E – energiya sarfi, LQ – sifat yo'qotish funksiyasi.

RTO darajasida iqtisodiy maqsad funksiya xomashyo va energiya xarajatlari, mahsulot miqdori, sifat uchun bonus yoki jarima va uskunaning ishlash chegaralarini hisobga olishi mumkin. RTO optimal statik yoki sekin o'zgaruvchi ish nuqtasini aniqlaydi, MPC esa jarayonni ushbu nuqtaga dinamik xavfsizlikni buzmasdan olib boradi (4, 5).

Optimallashtirish $y_min\le y(k)\le y_max$, $u_min\le u(k)\le u_max$ va $\Delta u_min\le\Delta u(k)\le\Delta u_max$ cheklovlari ostida amalga oshiriladi. Xavfsizlikka tegishli chegaralar hard constraint sifatida, iqtisodiy maqsadlar esa soft constraint sifatida beriladi. Agar iqtisodiy maqsad xavfsizlik cheklovlari bilan qarama-qarshi bo'lsa, xavfsizlik birinchi o'rinda turadi.

1-jadval. Modellashda foydalanilgan asosiy texnologik parametrlar

Parametr	Belgilanishi	Maqsad qiymat	Ruxsat etilgan oraliq
Harorat	T	85 °C	80–90 °C
Bosim	P	4,2 bar	3,8–4,6 bar

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

Parametr	Belgilanishi	Maqsad qiymat	Ruxsat etilgan oraliq
Mahsulot sarfi	F	12 m³/soat	9–14 m³/soat
Sifat indeksi	Q	≥0,95	≥0,92
Isitgich quvvati	H	optimallashtiriladi	0–100 %
Klapan holati	V	optimallashtiriladi	10–90 %
Diskretlash vaqti	Ts	1 s	—
Prognoz gorizonti	Np	30	—
Boshqaruv gorizonti	Nc	10	—
RTO yangilanish oralig'i	—	60 s	—

Algoritmning ishlash ketma-ketligi

1) sensorlardan T, P, F, Q va E qiymatlarini olish;
2) yetishmayotgan, sakragan yoki fizik chegaradan chiqqan ma'lumotlarni aniqlash;
3) signallarni filtrlash va vaqt bo'yicha sinxronlashtirish;
4) real obyekt va Digital Twin holatini yangilash;
5) model bashorat xatosini hisoblash;
6) xato ruxsat etilgan chegaradan katta bo'lsa, online identifikatsiya yordamida model parametrlarini tuzatish;
7) RTO blokida iqtisodiy optimal setpointni hisoblash;
8) MPC yordamida prognoz gorizonti bo'yicha optimal boshqaruv ketma-ketligini topish;
9) Safety layer orqali apparat va texnologik cheklovlarni tekshirish;
10) optimal ketma-ketlikning faqat birinchi boshqaruv signalini obyektga uzatish;
11) keyingi diskret vaqtda barcha hisoblarni qayta bajarish.

NATIJALAR

Taklif etilgan algoritmning ishlash xususiyatlarini baholash uchun uzluksiz ishlab chiqarish obyektining namunaviy kompyuter modeli shakllantirildi. Ushbu bo'limdagi sonli qiymatlar real korxonadan olingan tajriba ma'lumotlari emas, balki algoritm samaradorligini metodik jihatdan ko'rsatish uchun yaratilgan hisoblash tajribasi natijalaridir. Amaliy joriy etishda bu qiymatlar muayyan korxona tarixiy ma'lumotlari va texnologik reglamenti bilan almashtiriladi.

Modellash davomida jarayonning 10-daqiqasida kiruvchi xomashyo harorati 7 °C ga kamaytirildi va tarkibiy buzilish 8 % ga oshirildi. Bundan tashqari, iqtisodiy adaptatsiyani tekshirish uchun energiya narxi 20 % ga oshirilgan ssenariy ko'rib chiqildi. Taqqoslash uchun an'anaviy PID boshqaruvi va taklif etilgan adaptiv RTO–MPC arxitekturasi ishlatildi.

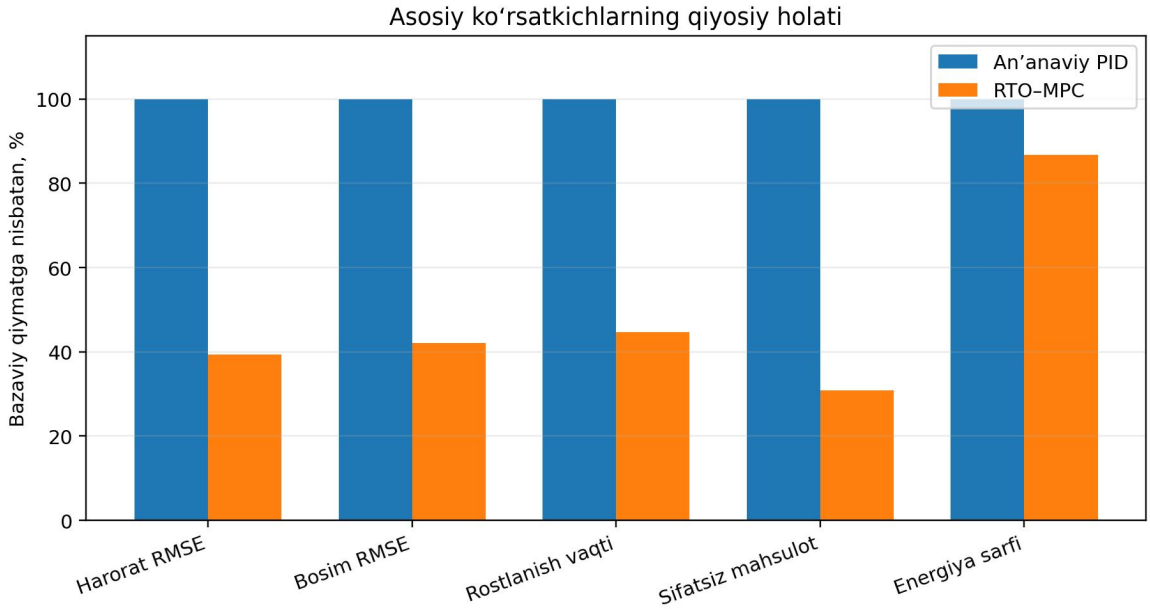
Natijalar shuni ko'rsatdiki, RTO–MPC tizimida harorat va bosimning maqsad qiymatdan og'ishi sezilarli kamaydi. Prognozli boshqaruv tashqi buzilishning kelajakdagi ta'sirini model orqali hisoblagani

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

sababli boshqaruv signali kechikmasdan tuzatildi. RTO darajasining mavjudligi esa energiya narxi o'zgarganda iqtisodiy optimal ish nuqtasini qayta hisoblash imkonini berdi.

2-jadval. Boshqaruv tizimlari samaradorligining qiyosiy natijalari

Ko'rsatkich	An'anaviy PID	RTO–MPC	O'zgarish
Harorat RMSE, °C	2,80	1,10	−60,7 %
Bosim RMSE, bar	0,19	0,08	−57,9 %
Rostlanish vaqti, min	9,4	4,2	−55,3 %
Maksimal harorat oshishi, °C	6,3	2,4	−61,9 %
Energiya sarfi, kWh	128	111	−13,3 %
Sifatsiz mahsulot ulushi	6,8 %	2,1 %	−69,1 %
Cheklov buzilishlari soni	12	3	−75,0 %
Nisbiy unumdorlik	100 %	104,5 %	+4,5 %



2-rasm. Asosiy ko'rsatkichlarning an'anaviy PID tizimiga nisbatan o'zgarishi

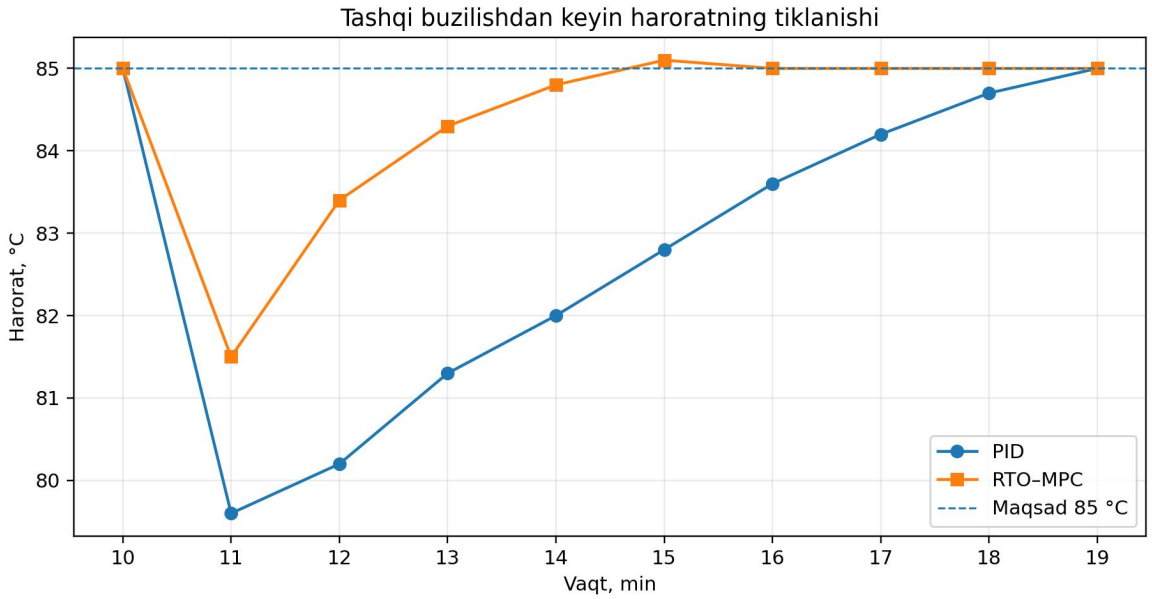
2-rasmda RTO–MPC tizimining nisbiy ko'rsatkichlari PID boshqaruvining 100 % bazaviy darajasiga nisbatan tasvirlangan. Eng katta yaxshilanish sifatsiz mahsulot ulushi, harorat xatosi va rostlanish vaqtida kuzatildi. Energiya sarfidagi 13,3 % kamayish boshqa ko'rsatkichlarga qaraganda kichikroq ko'rinsa-da, energiya intensiv korxonalarda bu miqdor yillik xarajatlarga sezilarli ta'sir ko'rsatishi mumkin.

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

Tashqi buzilishdan keyingi harorat tiklanishining vaqt bo'yicha dinamikasi RTO–MPC tizimi maqsad qiymatga tezroq qaytishini ko'rsatdi. PID boshqaruvda 85 °C atrofidagi barqaror holatga qaytish taxminan 9 daqiqa davom etgan bo'lsa, prognozli boshqaruvda bu jarayon taxminan 4–5 daqiqada yakunlandi.

3-jadval. Tashqi buzilishdan keyingi haroratning tiklanish dinamikasi

Vaqt, min	PID, °C	RTO–MPC, °C	Maqsad, °C
10	85.0	85.0	85
11	79.6	81.5	85
12	80.2	83.4	85
13	81.3	84.3	85
14	82.0	84.8	85
15	82.8	85.1	85
16	83.6	85.0	85
17	84.2	85.0	85
18	84.7	85.0	85
19	85.0	85.0	85



3-rasm. Tashqi buzilishdan keyingi haroratning tiklanish dinamikasi

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

Energiya tarifi 20 % ga oshirilgan ssenariyda RTO darajasi energiya iste'moli va mahsulot sifati o'rtasidagi muvozanatni qayta hisobladi. Sifat indeksi 0,92 dan pasayish ehtimoli paydo bo'lganda energiyani tejashga qaratilgan setpoint korreksiyasi cheklangan. Bu yechim xavfsizlik va sifat cheklovlarining iqtisodiy optimallashtirishdan ustunligini ta'minlaydi.

Cheklov buzilishlari sonining 12 tadan 3 tagacha kamayishi optimallashtirish jarayonida texnologik chegaralarni bevosita hisobga olishning samaradorligini ko'rsatadi. PID tizimida regulyatorlar ko'pincha lokal xatoga javob beradi, RTO–MPC esa bir vaqtning o'zida bir nechta parametr va kelajakdagi holatlarni hisobga oladi. Natijada apparatning ruxsat etilgan ish diapazoniga yaqinlashish holatlari kamayadi.

MUHOKAMA

Olingan modellash natijalari ko'p parametrli texnologik obyektlarda modelga asoslangan prognozli boshqaruvning muhim afzalliklarini ko'rsatadi. MPCning asosiy kuchli tomoni turli parametrlar o'rtasidagi o'zaro ta'sirlarni yagona matematik model orqali hisobga olishidir. Masalan, isitish quvvatining o'zgarishi nafaqat harorat, balki bosim, bug' sarfi, energiya iste'moli va mahsulot sifatiga ham ta'sir qilishi mumkin. Alohida PID konturlari bunday bog'lanishlarni to'liq hisobga olmaydi, MPC esa ularni ko'p o'zgaruvchili optimallashtirish masalasi doirasida yechadi (1, 3).

RTO blokining integratsiyasi boshqaruv tizimini faqat texnologik stabillashtirish vositasidan iqtisodiy qaror qabul qiluvchi tizimga aylantiradi. RTO bo'yicha tadqiqotlarda iqtisodiy optimal ish nuqtasini aniqlash va uni quyi boshqaruv darajasiga uzatish sanoat optimallashtirishining asosiy prinsipi sifatida ko'rsatiladi (4, 5). Taklif etilgan tizimda ushbu tamoyil energiya narxi va sifat cheklovlarini o'zgaruvchan omil sifatida ko'rishga imkon beradi.

Digital Twin texnologiyasining integratsiyasi modelni real obyekt ma'lumotlari bilan doimiy bog'lash imkonini beradi. Ishlab chiqarishdagi raqamli egizaklar monitoring, simulyatsiya, prediktiv texnik xizmat va optimallashtirish vazifalarini qo'llab-quvvatlashi adabiyotlarda keng ko'rsatilgan (8–11). Virtual model yordamida boshqaruv qarorini real obyektga berishdan avval uning ehtimoliy oqibatini tekshirish mumkin. Bu ayniqsa xavfli, qimmat yoki to'xtatib bo'lmaydigan texnologik jarayonlarda muhim.

Adaptiv identifikatsiya tizimning uzoq muddatli ishlash barqarorligini oshiradi. Dastlab yaxshi sozlangan model vaqt o'tishi bilan real obyektga mos kelmay qolishi mumkin. Issiqlik almashinuvi koeffitsiyentining pasayishi, klapan xarakteristikasining o'zgarishi yoki xomashyo tarkibining almashishi bunga misol bo'ladi. Online parametr baholash modelning bu og'ishini kamaytiradi va optimallashtirish sifatini saqlashga yordam beradi (13).

Amaliy joriy etishda sensor ma'lumotlari sifati birlamchi shart hisoblanadi. Noto'g'ri kalibrlangan yoki nosoz sensor optimizatorga obyektning noto'g'ri holatini ko'rsatadi. Shu sababli signal plausibility check, redundant sensor, soft sensor va state estimation mexanizmlari alohida himoya qatlami sifatida ko'zda tutilishi lozim. Ma'lumotlar vaqt bo'yicha sinxron bo'lishi ham muhim: turli sensorlarning vaqt tamg'alari mos kelmasa, dinamik modelni identifikatsiyalashda sistematik xato yuzaga keladi.

Hisoblash vaqti ham real vaqt tizimining asosiy cheklovlaridan biridir. Agar optimallashtirish masalasini yechish uchun talab qilinadigan vaqt jarayonning sezilarli o'zgarish vaqtidan katta bo'lsa, hisoblangan yechim eskirib qoladi. Shuning uchun model murakkabligi, prognoz gorizonti va optimizator turi texnologik jarayon dinamikasiga mos tanlanishi zarur. Zarur holatlarda edge computing, real-time OS yoki yuqori unumli sanoat serverlaridan foydalanish maqsadga muvofiq.

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

Kiberxavfsizlik Industry 4.0 arxitekturasida alohida ahamiyat kasb etadi. Optimallashtirish serveri va PLC o'rtasidagi aloqa buzilishi yoki noqonuniy boshqaruv buyrug'i yuborilishi ishlab chiqarish xavfsizligiga tahdid tug'dirishi mumkin. Shu sababli tarmoq segmentatsiyasi, autentifikatsiya, shifrlash, rolga asoslangan kirish va favqulodda lokal boshqaruv rejimi joriy qilinishi kerak (6, 7).

Har qanday iqtisodiy optimizator ustida mustaqil Safety Layer bo'lishi lozim. Optimallashtiruvchi modul texnologik parametrni xavfsiz chegaradan chiqaradigan yechimni taklif qilsa, Safety Layer uni bloklaydi yoki eng yaqin ruxsat etilgan qiymatga proyeksiya qiladi. Boshqaruvning bunday qatlamli arxitekturasi iqtisodiy samaradorlikni funksional xavfsizlik bilan uyg'unlashtirish imkonini beradi.

Sun'iy intellekt va reinforcement learning algoritmlari kelajakda RTO–MPC tizimiga qo'shimcha imkoniyatlar berishi mumkin. Ayniqsa murakkab nochiziqli jarayonlarda ma'lumotga asoslangan model yoki RL agenti operator uchun optimal tavsiyalarni o'rganishi mumkin. Biroq sanoat jarayonlarida RLni bevosita yopiq konturga ulash xavfsizlik, generalizatsiya va trening ma'lumotlariga bog'liq cheklovlarga ega. Shu sababli amaliy tizimlarda modelga asoslangan va ma'lumotga asoslangan usullarni gibrid tarzda qo'llash istiqbolli hisoblanadi (14).

Taklif etilgan tizimni real korxonaga joriy etish bosqichma-bosqich amalga oshirilishi lozim. Avvalo mavjud sensor, PLC va SCADA infratuzilmasi audit qilinadi; keyin boshqariluvchi va manipulyatsiya qilinuvchi parametrlar tanlanadi; tarixiy ma'lumotlar asosida dastlabki model identifikatsiya qilinadi; Digital Twin ishlab chiqiladi; algoritm avval simulyatsiyada, keyin operatorga tavsiya beruvchi advisory mode rejimida sinovdan o'tkaziladi. Faqat xavfsizlik va ishonchlilik tasdiqlangach avtomatik yopiq konturga o'tiladi.

Ushbu tadqiqotning asosiy cheklovi shundaki, sonli natijalar namunaviy model asosida olingan. Shu sababli 13,3 % energiya tejalishi yoki boshqa ko'rsatkichlar barcha korxonalar uchun universal qiymat sifatida talqin qilinmasligi kerak. Muayyan obyekt bo'yicha yakuniy samaradorlik texnologik sxema, uskunaning holati, xomashyo va energiya narxlari, sensor aniqligi, amaldagi regulyatorlar sifati hamda ishlab chiqarish rejimiga bog'liq. Biroq ishlab chiqilgan arxitektura va algoritmik ketma-ketlik turli tarmoqlarga moslashtirilishi mumkin.

XULOSA

Texnologik jarayon parametrlarini real vaqt rejimida avtomatik optimallashtirish uchun RTO, MPC, adaptiv identifikatsiya va Digital Twin yondashuvlarini integratsiyalovchi boshqaruv tizimi ishlab chiqildi. Tizim real vaqt ma'lumotlarini yig'ishdan boshlab iqtisodiy optimal setpointni hisoblash va xavfsiz boshqaruv signalini obyektga uzatishgacha bo'lgan to'liq yopiq konturga ega.

MPC ko'p o'zgaruvchili jarayonning kelajakdagi holatini prognoz qilish va texnologik cheklovlarni optimallashtirish masalasiga bevosita kiritish imkonini beradi. RTO esa energiya sarfi, mahsulot sifati va ishlab chiqarish samaradorligini yagona iqtisodiy mezon orqali muvozanatlashtiradi. Digital Twin real obyekt va modelni sinxronlashtirish, adaptiv identifikatsiya esa model parametrlarining vaqt bo'yicha o'zgarishiga moslashish imkonini yaratadi.

Namunaviy hisoblash tajribasida RTO–MPC arxitekturasi an'anaviy PID boshqaruviga nisbatan harorat RMSE qiymatini 60,7 %, bosim xatosini 57,9 %, rostlanish vaqtini 55,3 % va energiya sarfini 13,3 % ga kamaytirgan model natijasini ko'rsatdi. Sifatsiz mahsulot ulushi 6,8 % dan 2,1 % gacha, texnologik cheklov buzilishlari soni esa 12 tadan 3 tagacha kamaydi. Ushbu ko'rsatkichlar real sanoat tajribasi emas, balki ishlab chiqilgan usulning metodik samaradorligini ko'rsatuvchi simulyatsiya natijalaridir.

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.

Kelgusida tizimni real sanoat obyektida sinash, nonlinear MPC, soft-sensor, anomaliyani aniqlash, prediktiv texnik xizmat va gibrid machine-learning modullari bilan boyitish maqsadga muvofiq. Shuningdek, real korxonada iqtisodiy samara energiya narxi, mahsulot tannarxi va uskuna resursini hisobga olgan holda alohida texnik-iqtisodiy baholanishi kerak.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Qin, S. J., Badgwell, T. A. A survey of industrial model predictive control technology. Control Engineering Practice. 2003. Vol. 11, No. 7. P. 733–764. DOI: 10.1016/S0967-0661(02)00186-7.
2. Rawlings, J. B., Mayne, D. Q., Diehl, M. Model Predictive Control: Theory, Computation, and Design. 2nd ed. Nob Hill Publishing, 2017.
3. Camacho, E. F., Bordons, C. Model Predictive Control. 2nd ed. London: Springer, 2007.
4. Darby, M. L., Nikolaou, M., Jones, J., Nicholson, D. RTO: An overview and assessment of current practice. Journal of Process Control. 2011. Vol. 21, No. 6. P. 874–884. DOI: 10.1016/j.jprocont.2011.03.009.
5. Krishnamoorthy, D., Skogestad, S. Real-Time optimization as a feedback control problem – A review. Computers & Chemical Engineering. 2022. Vol. 161. Article 107723. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2022.107723.
6. Lee, J., Bagheri, B., Kao, H.-A. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. Manufacturing Letters. 2015. Vol. 3. P. 18–23. DOI: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001.
7. Monostori, L. Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges. Procedia CIRP. 2014. Vol. 17. P. 9–13. DOI: 10.1016/j.procir.2014.03.115.
8. Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., Sihn, W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51, No. 11. P. 1016–1022. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
9. Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., Hicks, B. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2020. Vol. 29. P. 36–52. DOI: 10.1016/j.cirpj.2020.02.002.
10. Fuller, A., Fan, Z., Day, C., Barlow, C. Digital Twin: Enabling technologies, challenges and open research. IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 108952–108971. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998358.
11. Aivaliotis, P., Georgoulias, K., Chryssolouris, G. The use of Digital Twin for predictive maintenance in manufacturing. International Journal of Computer Integrated Manufacturing. 2019. Vol. 32, No. 11. P. 1067–1080. DOI: 10.1080/0951192X.2019.1686173.
12. ISO 23247-1:2021. Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing – Part 1: Overview and general principles. Geneva: International Organization for Standardization, 2021.
13. Ljung, L. System Identification: Theory for the User. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1999.
14. Faria, R. R., Capron, B. D. O., de Souza Jr., M. B., Secchi, A. R. One-Layer Real-Time Optimization Using Reinforcement Learning: A Review with Guidelines. Processes. 2023. Vol. 11, No. 1. Article 123. DOI: 10.3390/pr11010123.
15. Åström, K. J., Murray, R. M. Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers. 2nd ed. Princeton University Press, 2021

© Ushbu material Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) litsenziyasi asosida tarqatiladi.