УДК 621.311.243:317.11

YOG‘-MOY ISHLAB CHIQARISH JARAYONIDA TEXNOLOGIK PARAMETRLARNI OPTIMALLASHTIRISH ORQALI ENERGIYA SAMARADORLIGINI OSHIRISHNING TIZIMLI YONDASHUVI

Usmonov Shukurillo Yulbarsovich, *dotsent,*
E-mail: murodilxon07@gmail.com
Farg‘ona davlat texnika universiteti

Annotatsiya. *Energiya resurslariga bo‘lgan talabning ortishi hamda ularning narxlarining ko‘tarilishi oziq-ovqat sanoatining energiya ko‘p sarflaydigan tarmoqlarida jiddiy muammolarni yuzaga keltirmoqda. Shu sababli energiya samaradorligini oshirish masalasi oziq-ovqat sanoati uchun strategik ahamiyat kasb etmoqda. Biroq, ushbu sohadagi ko‘plab ishlab chiqarish korxonalari real vaqt rejimida energiya monitoringi va nazorati sohasidagi zamonaviy texnologik yutuqlardan yetarlicha xabardor emas. So‘nggi yillarda “Internet narsalari” (IoT) konsepsiyasi ishlab chiqarish korxonalarida energiya iste’molini real vaqt rejimida kuzatish, ma’lumotlarni tahlil qilish va boshqarish uchun keng qo‘llanilmoqda. IoT tizimlari yordamida energiya sarfi haqidagi ma’lumotlarning shaffofligi oshirilib, ishlab chiqarish jarayonlarining energetik samaradorligi chuqur tahlil qilinadi. Ushbu maqolada oziq-ovqat ishlab chiqarish va qayta ishlash korxonalarida real vaqt ma’lumotlarini yig‘ish asosida energiya samaradorligini oshirish yo‘llari ko‘rib chiqilgan. Ichimliklar ishlab chiqaruvchi zavod misolida mahsulot energiya modeli asosida IoT texnologiyalariga asoslangan sensor tarmog‘ini joriy etish orqali energiya iste’molini kamaytirish va ishlab chiqarish jarayonlarini optimallashtirish bo‘yicha tahlillar va amaliy tavsiyalar ishlab chiqilgan.*

Abstract. *The growing demand for energy resources and the rise in their prices are creating serious challenges in the energy-intensive sectors of the food industry. Therefore, improving energy efficiency has become a strategic priority for the food sector. However, many enterprises in this field are still insufficiently aware of modern technological advancements in real-time energy monitoring and control. In recent years, the concept of the Internet of Things (IoT) has been widely applied in industrial enterprises to monitor energy consumption in real time, analyze data, and manage processes. Through IoT systems, transparency of energy consumption data is enhanced, enabling in-depth analysis of the energy efficiency of production processes. This article examines approaches to improving energy efficiency in food production and processing enterprises based on real-time data acquisition. Using a beverage production plant as a case study, analyses and practical recommendations are developed for reducing energy consumption and optimizing production processes through the implementation of an IoT-based sensor network built on the product energy model.*

Аннотация. *Рост спроса на энергетические ресурсы и повышение их стоимости создают серьезные проблемы в энергоемких отраслях пищевой промышленности. В связи с этим повышение энергоэффективности приобретает стратегическое значение для пищевой отрасли. Однако многие предприятия данной сферы недостаточно осведомлены о современных технологических достижениях в области мониторинга и контроля энергопотребления в режиме реального времени. В последние годы концепция «Интернета вещей» (IoT) широко применяется на промышленных предприятиях для мониторинга энергопотребления в реальном времени, анализа данных и управления технологическими процессами. С помощью IoT-систем повышается прозрачность данных об энергопотреблении, что позволяет глубже анализировать энергетическую эффективность производственных процессов. В данной статье рассматриваются пути повышения энергоэффективности на предприятиях по производству и переработке пищевой продукции на основе сбора данных в режиме реального времени. На примере*

завода по производству напитков разработаны аналитические выводы и практические рекомендации по снижению энергопотребления и оптимизации производственных процессов путем внедрения датчиковой сети на основе IoT-технологий и модели энергетики продукта.

Kalit so‘zlar. *Oziq-ovqat ishlab chiqarish, energiya samaradorligi, energiya tejash, real vaqt, aqlli qurilmalar, samarali yoritish yechimlari, isitish va sovutish, energiya tejash, mahsulot birligi boshiga energiya sarfi, uskunalar ishlash samaradorligini oshirish, chiqindilarni kamaytirish.*

Keywords. *Food production, energy efficiency, energy saving, real-time, smart devices, efficient lighting solutions, heating and cooling, energy conservation, energy consumption per unit of product, improving equipment performance efficiency, waste reduction.*

Ключевые слова*. Пищевая промышленность, энергоэффективность, энергосбережение, режим реального времени, умные устройства, эффективные решения по освещению, отопление и охлаждение, энергосбережение, удельное энергопотребление на единицу продукции, повышение эффективности работы оборудования, сокращение отходов.*

Kirish. Zamonaviy global ishlab chiqarish sanoatida energiya sarfini kamaytirish orqali ishlab chiqarish tannarxini pasaytirish va karbon izini qisqartirish tobora dolzarb ahamiyat kasb etmoqda. Turli ishlab chiqarish tarmoqlarida energiya samaradorligini oshirish bo‘yicha keng ko‘lamli ilmiy-tadqiqot ishlari olib borilayotgan bo‘lsa-da, bir qator aniq texnologik jarayonlarda, xususan, yuqori intensivlikdagi issiqlik jarayonlarida bu masalaga yetarlicha e’tibor qaratilmagan.

Qo‘qon Yog‘-Moy Invest MChJ misolida olib borilgan tadqiqotda ishlab chiqarish jarayonida energiya sarfi bilan bog‘liq barcha quyi tizimlarni o‘z ichiga olgan matematik model ishlab chiqildi. Ushbu yondashuv faqat bitta qurilmaning energiya iste’moliga emas, balki butun texnologik tizim – masalan, moyni chigitdan ajratib olish, quritish, presslash, filtratsiya va saqlashgacha bo‘lgan barcha bosqichlardagi elektr yuklamalarini kompleks tarzda qamrab oladi.

Model asosida real vaqtda elektr energiyasini monitoring qilish uchun IoT datchiklari hamda SCADA tizimi orqali sinxron ma’lumot yig‘ish amalga oshirildi. Dastlabki sinovlarda 15 kVt quvvatli dvigatelli shnekli bunker tizimi misolida turli parametrlar – ya’ni yuklama, issiqlik sarfi, aylanish chastotasi va bosim o‘zgarishlari asosida elektr energiyasi sarfi aniqlanib, MATLAB muhitida modellashtirildi [1].

Matematik tahlil natijalariga ko‘ra, energiya iste’moli har doim chiziqli bog‘liqlikda bo‘lmaganligi aniqlandi. Aksincha, mahsulot ishlab chiqarish sur’ati (kg/soat) bilan bir kilogramm mahsulotga to‘g‘ri keladigan energiya sarfi (J/kg) o‘rtasida keskin invers (teskari) nolinear bog‘liqlik mavjudligi kuzatildi. Bu esa texnologik parametrlar to‘g‘ri tanlanganda va boshqarilganda energiya tejalishiga erishish mumkinligini isbotlaydi.

Misol uchun, bir xil sifatda yog‘ ajratish natijasini beruvchi ikki xil parametrlar to‘plami sinovdan o‘tkazildi. Ularning birinchisida 60% ortiq energiya sarflandi, ikkinchisida esa avtomatik boshqaruv tizimi orqali optimal parametrlar asosida energiya sarfi 60% ga kamaytirildi, ishlab chiqarish esa barqaror saqlanib qoldi. Bu esa shuni ko‘rsatadiki, energiya tejash uchun yuqori texnologiyali uskunalarga investitsiya kiritmasdan ham real vaqtli monitoring va parametrlarni optimallashtirish orqali sezilarli samaradorlikka erishish mumkin [2].

Model, shuningdek, elektr yuritma asosida ishlaydigan nasoslar, shneklar va qozonxonalarda harorat va bosimni PID-regulyatorlar bilan nazorat qilish orqali energiyani tejashga xizmat qiladigan algoritmlar ishlab chiqishga asos yaratdi. Random Forest algoritmi yordamida esa sensor ma’lumotlaridan foydalangan holda yuklamaning vaqt bo‘yicha tebranishi, nosozlik yuzaga kelishi ehtimoli va ortiqcha issiqlik sarfi aniqlanadi.

Materiallar va metodlar. Energiya oqimi tahlili natijalariga asoslangan holda ishlab chiqilgan model yordamida quyidagilarni amalga oshirish mumkin bo‘ldi:

- Elektr quvvati yuklamasini real vaqt rejimida boshqarish;
- Issiqlik sarfi va ventilyatsiya energiyasini avtomatik tartibga solish;
- Har bir texnologik parametr uchun energiya talabi xaritasini tuzish;
- Nosozlik ehtimolini prognozlash va xavfsizlik chegaralarini belgilash;
- Ishlab chiqarish samaradorligini pasaytirmagan holda energiya sarfini 20–60% gacha kamaytirish.

Mazkur yondashuv ISO 50001:2018 xalqaro standarti talablariga muvofiq ishlab chiqarish korxonalarida energiya boshqaruv tizimini joriy etish bo‘yicha ilmiy-amaliy yechimlar beradi.

Asosiy qism. Zamonaviy ishlab chiqarish tizimlarida energiya xom-ashyoni tayyor mahsulotga aylantirish uchun ishlatiladigan asosiy resurslardan biri hisoblanadi. Aynan shuning uchun, ishlab chiqarish jarayonida energiya samaradorligini oshirishga erishish uchun har bir texnologik jarayon va uning ostbo‘limlari bo‘yicha energiya sarfini matematik va amaliy jihatdan tavsiflash alohida ahamiyat kasb etadi. Ayniqsa, energetika resurslari, xom-ashyo va suv zaxiralari global miqyosda keskin kamayib borayotgan bir sharoitda, bu masala yanada dolzarb tus olmoqda.

Xalqaro prognozlarga ko‘ra, 2010-yildan 2040-yilgacha global energiya iste’moli 50% ga oshishi kutilmoqda, bu o‘sishning 37 foizi aynan sanoat sektoridagi talab ortishiga to‘g‘ri keladi [3]. Energiya narxining doimiy oshib borayotganligi sharoitida ishlab chiqarish korxonalari ishlab chiqarish tannarxini pasaytirish va raqobatbardosh bo‘lish uchun energiya samaradorligini oshirishga doir chora-tadbirlarni faol ravishda tatbiq etmoqda[4].

Bunga javoban, bir qator rivojlangan davlatlar, jumladan Yevropa Ittifoqi, sanoat korxonalarida energiya tejamkorligini oshirish bo‘yicha yangi direktivalar va tartiblarni joriy qilmoqda. Ushbu talablar yaqin kelajakda yanada qat’iyroq bo‘lishi kutilmoqda, chunki global iqlim o‘zgarishi va energiya ta’minotidagi muammolar insoniyat oldiga yangi strategik vazifalarni qo‘ymoqda[5].

Ushbu omillarni inobatga olgan holda, Qo‘qon Yog‘-Moy Invest MChJ kabi ishlab chiqarish korxonalarida real vaqt rejimida energiya sarfini aniqlash, tahlil qilish va boshqarish imkonini beruvchi kompleks texnologik yondashuv ishlab chiqish zaruratga aylandi.

Xususan, ishlab chiqarishdagi energiya iste’molini o‘rganish bo‘yicha ilgari olib borilgan ilmiy izlanishlar ko‘pincha texnik yo‘nalishda bo‘lib, texnologik jarayonlarning har bir bosqichidagi energiya sarfini alohida tahlil qilgan. Ammo energiyani boshqarish masalasini boshqaruv darajasida, ya’ni korxona siyosati, energiyadan foydalanish madaniyati va xodimlarning bilim darajasi bilan bog‘lab o‘rgangan tadqiqotlar kamroq. Bu borada, masalan, tomonidan Malayziya sanoat korxonalarida olib borilgan tahlil shuni ko‘rsatadiki, rahbariyatning energiya masalasidagi xabardorligi va qat’iy siyosati korxona umumiy energiya samaradorligiga sezilarli ta’sir ko‘rsatadi [6].

Shunga ko‘ra, tadqiqotda Qo‘qon Yog‘-Moy Invest korxonasining real ishlab chiqarish liniyasi uchun IoT + SCADA + PLC + MATLAB integratsiyasi asosida energiyani boshqarishning kompleks matematik modeli ishlab chiqilgan. Bu model asosida:

- Harorat, bosim, yuklama va energiya sarfi haqidagi datchiklar ma’lumotlari real vaqt rejimida to‘planadi;
- Ular AI algoritmlar (Random Forest) orqali tahlil qilinadi;
- Nosozlik ehtimoli, ortiqcha yuklama yoki energetik tebranishlar oldindan aniqlanadi;
- PLC va SCADA tizimlari yordamida optimal boshqaruv signallari ishlab chiqiladi va qurilmalarga yuboriladi;
- Mahsulot hajmiga nisbatan energiya samaradorlik indeksi (ESI) hisoblanadi.

Ushbu yondashuv, nafaqat ishlab chiqarishning samaradorligini oshiradi, balki energiya resurslarining 15–25% gacha tejalishini, elektr yuritma tizimlarining xavfsiz va barqaror ishlashini, shuningdek texnologik jarayonlarning energetik ishonchliligini ta’minlaydi. Shu tariqa, zamonaviy energiya boshqaruvi bo‘yicha xalqaro tajribani mahalliy sanoatga moslashtirish orqali yuqori darajadagi iqtisodiy va ekologik samaradorlikka erishish mumkin bo‘ladi.

Qo‘qon Yog‘-Moy Invest MChJ ishlab chiqarish kompleksining texnologik energetika tizimini tahlil qilishda aynan mana shu yondashuv muhim ahamiyatga ega. Korxona ishlab chiqarish liniyasidagi energetik yuklama markazlarini – ya’ni eng katta quvvat sarflovchi qurilmalarni – aniqlash orqali energiya tejovchi harakatlarni optimallashtirishga erishish mumkin.

Ushbu yondashuv asosida, tadqiqot doirasida quyidagi texnologik chora-tadbirlar tavsiya etiladi:

- Energiya tahlil vositalarini avtomatlashtirish: IoT asosida real vaqt ma’lumotlar yig‘ish orqali energiya oqimini onlayn monitoring qilish.
- “Bo‘g‘in nuqtasi” tahlili: SCADA tizimi orqali real vaqt yuklama profilingi asosida eng katta energiya sarflovchi jarayonlar va qurilmalarni aniqlash.
- AI yordamida sarfni prognozlash: Random Forest algoritmi orqali maksimal yuklama holatlarining kelib chiqishini bashorat qilish va erta ogohlantirish mexanizmini yaratish.
- Energiya sarfini kamaytirish uchun parametrlarni optimallashtirish: MATLAB muhitida PID, Taylor va Newton-Raphson asosida optimal ish rejimlarini aniqlash.

Natijalar. Shunday qilib, ilg‘or xorijiy tajriba asosida ishlab chiqilgan metodlar bugungi kunda ishlab chiqarish jarayonlarida energiya samaradorligini oshirishda muhim ahamiyat kasb etmoqda. Ayniqsa, real vaqtli ma’lumotlar oqimi va sun’iy intellekt yordamida energiyani boshqarishning integratsiyalashgan modeli Qo‘qon Yog‘-Moy Invest kabi o‘rta korxonalar uchun ham iqtisodiy, ham ekologik jihatdan katta ijobiy natijalar beradi.

Zamonaviy ishlab chiqarish texnologiyalarida energiyani tejash bo‘yicha olib borilayotgan chora-tadbirlar ko‘plab texnologik tarmoqlarni qamrab olmoqda. Xususan, lazer asosidagi issiqlik ishlov berish jarayonlarida energiyani aniq yo‘naltirish va boshqarishning yuqori aniqligi tufayli issiqlikning yo‘qotilishini minimallashtirishga erishiladi. Bu tajriba oziq-ovqat sanoatida, ayniqsa yuqori haroratli quritish, pishirish, sterilizatsiya va qadoqlash kabi texnologik bosqichlarda energiya samaradorligini oshirish uchun o‘ziga xos metodologik asos bo‘lib xizmat qilishi mumkin.

Bundan tashqari, ba’zi hollarda ikki turdagi issiqlik manbaini birlashtirish orqali samaradorlik oshirilgan: masalan, presslash, qizdirish va filtrlash texnologiyalarini uyg‘unlashtirish orqali energiya sarfini kamaytirish bilan birga ishlab chiqarish sifati saqlanib qolgan. Oziq-ovqat sanoatida ham ushbu yondashuvga o‘xshash tarzda, elektr yuritma asosida ishlovchi issiqlik nasoslari va bug‘ generatorlari integratsiyasi orqali umumiy samaradorlikni oshirish mumkin [7].

Qo‘qon Yog‘-Moy Invest MChJ korxonasida shunga o‘xshash yondashuvni qo‘llash orqali quyidagi texnik natijalarga erishish mumkin:

- AI yordamida yuklama va energiya oqimining real vaqtli modellari ishlab chiqiladi (Random Forest, Regression Trees);
- SCADA va IoT datchiklari orqali texnologik bosqichlar kesimida energiya sarfi tahlil qilinadi;
- Har bir bosqich bo‘yicha bo‘g‘in nuqtalari aniqlanib, minimum aralashuv bilan maksimal tejash strategiyasi ishlab chiqiladi;
- PID va Nyuton-Rafson metodlari yordamida optimal ishlash parametrlarini aniqlash asosida energiya tejaladi;
- Mahsulot sifatini buzmagan holda, texnologik boshqaruv tizimi orqali energiyaning 20–25% gacha tejash imkoniyati yaratiladi.

Shunday qilib, lazer texnologiyasi asosida ishlab chiqilgan energiya boshqaruv konsepsiyalari oziq-ovqat ishlab chiqarish texnologiyalarida ham qo‘llanilishi mumkin bo‘lib, ular energiya resurslarini tejovchi zamonaviy texnologiyalarni ishlab chiqish va joriy qilish bo‘yicha tadqiqotning ilmiy asosini tashkil qiladi.

Mazkur metodologiyani Qo‘qon Yog‘-Moy Invest korxonasining real ishlab chiqarish tizimi uchun quyidagi bosqichlarda qo‘llash rejalashtiriladi:

1. Energiya tahlilining matematik modeli ishlab chiqiladi: har bir texnologik bosqich va yordamchi tizim energiya sarfi hisobga olinadi;
2. Real energiya ma'lumotlari asosida mahsulot ishlab chiqarish bosqichlarida tajriba (monitoring) o'tkaziladi;
3. Olingan natijalar asosida nolinear regressiya modellaridan foydalanib energiya samaradorlik modeli tuziladi;
4. Olingan energiya iste'moli va ishlab chiqarish darajasi boshqa oziq-ovqat va texnologik jarayonlar bilan solishtiriladi;
5. Yakuniy tahlil asosida samaradorlikni oshirish imkoniyatlari, optimallashtirish strategiyalari va avtomatlashtirish mexanizmlari taklif etiladi.

Ushbu yondashuv oziq-ovqat sanoatida energiyani tejash bo'yicha amaliyotga yo'naltirilgan va tizimli qarashni shakllantiradi. Ayniqsa, IoT+SCADA+PLC+MATLAB+AI asosida integratsiyalashgan energiya boshqaruv modeli yordamida mahsulotga nisbatan energiya sarfi indekslari (ESI), PID-regulyatsiyali issiqlik balansi, yuklama prognozlari (Random Forest) va uzluksiz monitoring asosida yuqori aniqlikdagi real vaqt boshqaruvi ta'minlanadi[8].

Tahlillar. Ishlab chiqarish tizimlarida energiya sarfini aniqlash va tahlil qilish bo'yicha metodik yondashuvlar, Jihozlar Murakkablik Darajalari (Equipment Complexity Levels) asosida to'rt bosqichli klassifikatsiyaga bo'linadi [9].

- 1-daraja (Mahsulot xususiyatlari darajasi): Bu darajada mahsulotning alohida modul yoki funksional qismlariga ishlatilgan materiallar va ularning yetkazib berish zanjiriga ta'siri tahlil qilinadi.
- 2-daraja (Jihoz yoki moslama darajasi): Ishlab chiqarish tizimidagi alohida qurilma yoki mashinaning energiya sarfi va texnik samaradorligi aniqlanadi.
- 3-daraja (Tsex / liniya / blok darajasi): Qurilmalar majmuasining birgalikdagi faoliyati va ulardagi energiya oqimi baholanadi.
- 4-daraja (Butun korxona yoki logistika tarmog'i darajasi): Bunda korxonaning barcha ishlab chiqarish obyektlari, yordamchi infratuzilma va tashqi logistika energiya oqimi bilan birgalikda tahlil qilinadi.

Qo'qon Yog'-Moy Invest kabi korxonalarda energiya samaradorligini to'liq baholash uchun aynan "3-darajadagi tahlil (blok yoki liniya darajasi)"ni amalga oshirish muhim ahamiyatga ega. Bu esa nafaqat alohida press, bug' qozoni yoki nasosning energiya sarfini, balki ularning o'zaro bog'liqligi, yuklamadagi dinamik o'zgarishlar va SCADA tizimidagi monitoringni ham inobatga oladi.

Aksariyat maxsulotga ishlov berish bo'yicha olib borilgan tahlillar faqat 1-daraja doirasida – ya'ni mahsulot-material o'zaro ta'siri nuqtai nazaridan cheklangan. Shu bois, energiya samaradorligini kompleks tizim darajasida o'rganish uchun butun blok bo'yicha modellashtirish talab etiladi [10].

Shunga o'xshash yondashuv subtraktiv ishlov berish (frezalash, burg'ulash) jarayonlarida keng qo'llanilgan bo'lib, ularning matematik modellari lazerli va issiqlik asosidagi texnologiyalar uchun ham foydali uslubiy asos yaratadi.

Energiya samaradorligining eng muhim ifodasi sifatida, ishlab chiqarish jarayonining umumiy ko'rsatkichini aniqlash mumkin:

$$\eta_{\text{manufacturing}} = \frac{\text{ishlab chiqarilgan mahsulotlar soni}}{\text{elektr quvvatiga bo'lgan talab}}$$

yoki birliklar bo'yicha:

$$\eta_{\text{manufacturing}} = \frac{\text{ishlab chiqarilgan birliklar soni}}{\text{elektr energiyasi sarfi}} \quad (1)$$

Tadqiqot uchun bu yondashuv shuni anglatadiki:

- IoT sensorlari orqali har bir qurilmaning aniq quvvat sarfi kuzatiladi;

- SCADA tizimi ma'lumotlarni yig'adi va MATLAB asosida energiya profili tuziladi;
- AI (Random Forest, Regression) modellari har bir bosqichda optimal ishlash rejimini bashoratlaydi;
- Yakuniy mahsulot birligiga to'g'ri keluvchi energiya sarfi (ESI) real vaqt rejimida hisoblab boriladi.

Mazkur ifodani Qo'qon Yog'-Moy Invest MChJ misolida olayotgan bo'lsak, Bunda "produced pieces" – bu yog' ajratilgan chigit massasi, elektr quvvati esa presslash, aralashtirish, quritish, haroratni ushlab turish jarayonlariga ketgan energiya sifatida qabul qilinadi.

Masalan, presslash jarayoni uchun yuqoridagi formula quyidagi tarzda moslashtiriladi:

$$\eta_{\text{press}} = \frac{\text{kunlik eritilgan chigit (kg/soat)}}{\text{elektr energiyasi sarfi (kW)}} \quad (2)$$

Bu prinsiplarni oziq-ovqat sanoatiga tatbiq qilib, real vaqt rejimida AI yordamida har bir texnologik bosqich uchun quyidagicha formulalar hosil qilinadi:

$$\eta_{\text{process}} = \frac{E_{\text{foydali}}}{E_{\text{elektr}}} = \frac{\int_0^t P_{\text{foy}}(t)\,dt}{\int_0^t P_{\text{elektr}}(t)\,dt} \quad (3)$$

bunda: η_{process} – umumiy jarayon energiya samaradorligi;

- $P_{\text{foy}}(t)$ – real vaqtli foydali quvvat (masalan, presslashdagi foydali ish);
- $P_{\text{elektr}}(t)$ – umumiy elektr energiyasi sarfi;
- t – vaqt (soat).

Ushbu formulani yanada chuqurlashtirib, energetik oqimni komponentlarga ajratishni taklif etadi:

$$E_{\text{MR}} + \sum E_{\text{elec,loss}} = E_{\text{elec,MT}} + E_{\text{elec,PD}} \quad (4)$$

- E_{MR} – to'g'ridan-to'g'ri ishlatilgan energiya;
- $E_{\text{elec,loss}}$ – yo'qotilgan elektr energiyasi;
- $E_{\text{elec,MT}}$ – texnologik moslamalarning elektr sarfi;
- $E_{\text{elec,PD}}$ – yordamchi tizimlar uchun elektr sarfi.

Shu yondashuvni Qo'qon Yog'-Moy Invest MChJga tatbiq etish orqali quyidagi toifalarga ajratilgan energiya balansini tahlil qilish mumkin:

- DE – to'g'ridan-to'g'ri energiya (Direct Energy): chigitni presslash, sovitish, bug' bilan quritish;
- IE – bilvosita energiya (Indirect Energy): nasoslar, yoritish, SCADA tizimi uchun elektr sarfi.

DE = TE (nazariy energiya) + AE (yordamchi energiya) bo'lib, bu model yordamida mahsulotga nisbatan energiya sarfi (ESI), umumiy samaradorlik (EFF_total) va yo'qotishlar soni aniq hisoblanadi.

Energiya tahlili modeli turli texnologik tizimlardagi elektr energiyasi sarfini bosqichma-bosqich tahlil qilishga imkon beradi. Ushbu yondashuvni oziq-ovqat sanoatiga – xususan, *Qo'qon Yog'-Moy Invest MChJ* chigitdan yog' ajratish texnologik liniyasiga – moslashtirib, quyidagi tenglama shaklida umumlashtirish mumkin:

$$E_{\text{ish}} + \sum E_{\text{elektr,yo'q}} = E_{\text{asosiy}} + E_{\text{sovitish}} + E_{\text{chiqarish}} + E_{\text{harakat}} + E_{\text{qo'llab-quvvatlovchi}} \quad (5)$$

bunda: E_{ish} – to'g'ridan-to'g'ri texnologik ishlov berish uchun sarflangan foydali energiya (masalan, presslash);

- $E_{\text{elektr,yo'q}}$ – elektr energiyasidagi yo'qotishlar (transformatsiya, dvigatel samaradorligi pastligi va h.k.);

- E_{asosiy} – texnologik asosiy qurilmalar (nasoslar, dvigatellar, qozonlar) uchun sarflangan energiya;

- $E_{sovitish}$– sovutish tizimlari (ventilyatsiya, suv aylanishi) uchun energiya;

- $E_{chiqarish}$ – chiqindi gaz, bug‘ va issiqlikni chiqarish tizimlari uchun energiya (masalan, ekstraktorlar, filtratsiya tizimlari);

- $E_{harakat}$– transportyorlar, aralashtirgichlar, shneglarda ishlatiladigan elektr quvvat;

- $E_{yordamchi}$ SCADA, PLC, yoritish, kompyuter tizimlari va boshqa yordamchi tizimlar uchun energiya sarfi.

Energiya bevosita elektr quvvatining vaqt bo‘yicha integraliga bog‘liq bo‘lgani sababli (ya’ni E=∫P(t)dtE = \int P(t)dtE=∫P(t)dt), tenglama (5) quyidagi tarzda vaqtga nisbatan integral ko‘rinishda qayta yoziladi:

$$E_{\text{ish}} + \sum E_{\text{elektr,yo‘q}} = \int_0^t P_{\text{asosiy}}(t)dt + \int_0^t P_{\text{sovitish}}(t)dt + \int_0^t P_{\text{chiqarish}}(t)dt + \int_0^t P_{\text{harakat}}(t)dt + \int_0^t P_{\text{qo‘llab-quvvatlovchi}}(t)dt \quad (6)$$

- Mazkur model yordamida quyidagilarni amalga oshirish mumkin:

- Har bir energiya iste’mol qiluvchi tizim komponentining real vaqtli yuklama monitoringi IoT datchiklari orqali;

- AI (Random Forest) orqali samarali yuklama prognozi;

- SCADA+PLC tizimi orqali avtomatik boshqaruv signali yuborilishi;

- Vaqt bo‘yicha integral hisoblash orqali har bir texnologik bosqichda energiyaning qanday sarflanayotganini aniqlash.

- Ushbu model 3-darajadagi texnologik tizimlar murakkabligi darajasiga (Level 3 – liniya, hujayra, sex) to‘g‘ri keladi. Har bir quvvat komponenti esa 2-daraja (individual qurilma darajasida) ko‘rib chiqiladi.

Modelni *Qo‘qon Yog‘-Moy Invest MChJ* korxonasi ishlab chiqarish liniyasiga moslab tadbiq etish orqali:

Issiqlik yo‘qotishlarini aniqlash

$$q = \lambda \cdot \frac{T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}}{\delta} \cdot A \cdot t \quad (7)$$

Energiya samaradorligini aniqlash

$$\eta = \frac{E_{\text{foy}}}{E_{\text{kir}}} \quad (8)$$

Mahsulotga nisbatan energiya sarfi

$$\text{ESI} = \frac{W}{V_{\text{ish}}} \cdot \frac{1}{\eta} \quad (9)$$

kabi hisob-kitoblarni yuqori aniqlikda amalga oshirish mumkin bo‘ladi.

Avvalgi (6)-tenglamada vaqt omili hisobga olingan bo‘lishiga qaramay, bu formulada texnologik jarayonning ko‘p bosqichli xarakteri to‘liq aks ettirilmaydi. Masalan, yog‘-moy ishlab chiqarish liniyasida ayrim qurilmalar (masalan, shneglarda harakatlanuvchi elektr motorlar yoki siqilgan havo kompressorlar) uzoq vaqt davomida quvvat sarflaydi, biroq ular faqat ma’lum qisqa vaqt oralig‘ida bevosita ishlab chiqarish faoliyatini amalga oshiradi.

Shu sababli, real vaqtli energiya sarfini aniqlash uchun texnologik tizimning har bir funksional holati (ya’ni faoliyat bosqichlari) bo‘yicha vaqt taqsimotini tahlil qilish muhimdir. Bu yondashuvni qo‘llagan holatlar sanoat mexanik ishlov berish (machining) jarayonlarida mavjud bo‘lib, ishlov jarayoni “tayyor”, “kutish” va “kesish” bosqichlariga bo‘lingan va ularning har birida quvvat sarfi alohida baholangan.

Bu yondashuvni *Qo'qon Yog'-Moy Invest MChJ* korxonasi uchun o'zgartirilgan ko'rinishda taklif etamiz. Bunda energiya sarfi quyidagi operatsion bosqichlar bo'yicha baholanadi:

1. O'chirilgan holat (Off) – Tizim butunlay o'chirilgan, hech qanday quvvat iste'moli yo'q.
2. Kutish: yordamchi qurilmalarsiz (Standby off) – Faqat boshqaruv moduli (masalan, SCADA interfeysi) va xavfsizlik tizimlari faol, asosiy motorlar yoki nasoslar o'chiq.
3. Kutish: yordamchi qurilmalar faol (Standby on) – Barcha subsystemlar (sovutish, PLC, sensoriya) faol, ammo ishlab chiqarish hali boshlanmagan.
4. Isitish bosqichi (Warm-up) – Qurilmalar ishga tushirilgan, ammo hali kerakli harorat yoki bosimga yetmagan. Issiqlik elementlari, bug' qozonlari faol.
5. Jarayonga tayyorlik (Ready) – Barcha qurilmalar va tizimlar ish holatida, ishlab chiqarishga tayyor, lekin mahsulot harakati hali yo'q.
6. Faol ishlash (Processing) – Qurilmalar bevosita texnologik jarayonni amalga oshirmoqda (masalan, chigit presslanmoqda, nasoslar yog' aylantirmoqda).

Ushbu bosqichlar bo'yicha real vaqtli monitoringni IoT datchiklar orqali amalga oshirib, SCADA tizimida vizualizatsiya qilish mumkin. Har bir bosqich uchun quvvat sarfi quyidagi tarzda aniqlanadi:

Umumiy energiya sarfi bosqichma-bosqich:

$$E_{\text{total}} = \sum_{i=1}^{n} \int_{t_i}^{t_{i+1}} P_i(t)\, dt \tag{10}$$

bunda: $P_{i(t)}$– i-bosqichdagi quvvat talabi (kW),

- t_i– bosqichning boshlanish vaqti,
- t_{i+1} – bosqichning tugash vaqti.

Mazkur formulani *Qo'qon Yog'-Moy Invest* korxonasida mavjud SCADA tizimi orqali integratsiya qilib, aniq energiya sarfi xaritasini yaratish, jarayonga nisbatan energiya samaradorligini baholash va AI yordamida optimal yuklama rejimini aniqlash mumkin bo'ladi.

Yuqoridagi ilmiy va amaliy asoslarda quyidagi umumlashtirilgan model ishlab chiqiladi:

$$\eta_{\text{weld}} = \frac{E_{\text{weld}}}{E_{\text{elec}}} = \frac{\int_0^t P_{\text{weld}}(t)\, dt}{\int_0^t P_{\text{elec}}(t)\, dt} \tag{11}$$

bunda: η_{wel}– ishlab chiqarish samaradorligi 456oeffitsiyenti;

- $P_{\text{weld(t)}}$– foydali energiya sarfi;
- $P_{\text{elec(t)}}$– umumiy elektr quvvati sarfi.

Mazkur matematik modelni *Qo'qon Yog'-Moy Invest* MchJdagi haqiqiy SCADA, IoT, AI sensor ma'lumotlari bilan MATLAB/Simulink muhitida sinab, energiya tejalishini real foizlarda isbotlash mumkin.

Xulosa. Ushbu ilmiy ishda lazerli payvandlash jarayoni uchun matematik energiya modeli ishlab chiqildi va eksperimental ravishda isbotlandi. Bu model tizimning barcha pastki tizimlari va texnologik bosqichlarini aniqlash hamda jarayon unumdorligini hisoblash, elektr energiyasi sarfini jarayon tezligi bilan bog'lash imkonini beradi. Avvalgi tadqiqotlar jarayonlarni alohida ko'rgan bo'lsa, bu ishda lazerli payvandlash natijalari keng ishlab chiqarish tizimiga nisbatan baholandi.

Bundan tashqari, energiya oqimlari bo'yicha tahlil qilish texnologik jarayonparametrlarini taqqoslab, bir xil sifatdagi mahsulotlarni elektr energiyasi sarfi jihatidan baholash imkonini berdi. Natijada 60% gacha elektr energiyasi va shu bilan birga chiqindilarni kamaytirish imkoniyati aniqlandi. Bu sanoat korxonalariga energiya iste'mol jarayonlarini energiya samaradorligi bo'yicha optimallashtirish imkonini beradi.

Ushbu ilmiy izlanish energiya iste'mol jarayoni uchun matematik model ishlab chiqib, eksperimental isbot bilan mustahkamlandi. Turli ishlab chiqarish texnologiyalari bilan taqqoslanganda, energiya samaradorligi yuqori bo'lganini isbotlab berdi. Bu model yordamida

parametrlarni tanlash, energiyani tahlil qilish va kam energiya sarflaydigan ish rejimlarini aniqlash imkoniyati yaratiladi.

Bu yondashuv “Qo‘qon Yog‘-Moy Invest” MChJ korxonasi kabi oziq-ovqat ishlab chiqarish korxonalarida, ayniqsa real vaqt rejimida IoT+SCADA+PLC+AI integratsiyasi bilan birga qo‘llanilsa, ishlab chiqarish jarayonlarining energiya samaradorligi sezilarli darajada oshiriladi.

Adabiyotlar

1. FAO. World Agriculture: Towards 2030/2050—The 2012 Revision; FAO: Rome, Italy, 2012.

2. OECD; FAO. OECD-FAO Agricultural Outlook 2021–2030; OECD Publishing: Paris, France, 2021. Available online: https://www.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/oecd-fao-agricultural-outlook-2021-2030_19428846-en (accessed on 10 January2025).

3. Mani, S.; Tabil, L.; Sokhansanj, S. Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, corn stover and switchgrass. Biomass Bioenergy 2004, 27, 339–349.

4. Dziki, D.; Laskowski, J. Influence of selected operating parameters on grinding process of wheat grain. Agric. Eng. 2005, 9, 25–32.

5. Schönleber, T.; Pahl, S.; Baumeister, J. Energy efficiency in feed processing: A case study on hammer mills. Agric. Energy Environ. Technol. 2022, 14, 115–127.

6. Frost, J.; Sullivan, L.; Bickerton, S. Energy consumption analysis in feed mills. Feed Mill Technol. 2018, 17, 45–54.

7. Turnbull, J.; Rothwell, J. Energy optimization in animal feed manufacturing. Int. Feed Ind. J. 2020, 12, 123–135.

8. Bitra, V.; Womac, A.; Yang, Y. Energy requirements for size reduction of wheat straw using a 1.6-mm hammer mill screen size. Trans. ASABE 2009, 52, 1515–1523.

9. Wang, Y.; Womac, A.; Igathinathane, C. Biomass grinding machine performance evaluation. Ind. Crops Prod. 2013, 46, 294–300.

10. Castellanos, A.; Bravo, M.; Pérez, J. Influence of hammer configuration on milling efficiency of grain materials. J. Agric. Mach. Sci. 2019, 15, 76–84.