ISNN 3030-3907

2026
MAY
ISSUE - 5
VOLUME - 7

DEVELOPMENT OF SCIENCE

scientific journal



Development of science

Ilmiy jurnal

MAY 2026
Issue - 5, VOLUME – 7

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

SUVNI ELEKTROLIZ QILISH ORQALI VODOROD OLISH JARAYONINI BOSHQARISH MODEL VA ALGORITMLARI

Abdullayev Husniddin Husen o‘g‘li
O‘zbekiston milliy metrologiya instituti doktoranti (Dsc), dotsenti, texnika fanlar bo‘yicha falsafa doktori(PhD)
E-mail: husniddin.abdullayev9395@gmail.com
Ortikov Sohibjon Ro‘ziboyevich
Buxoro davlat texnika universiteti “Texnologik jarayonlar va ishlab chiqarishni avtomatlashtirish” kafedrasi magistranti
Erkinov Shahboz Namoz o‘g‘li
Buxoro davlat texnika universiteti “Texnologik jarayonlar va ishlab chiqarishni avtomatlashtirish” kafedrasi asisstenti
E-mail: shahbozerkinov7@gmail.com

Annotatsiya. Ushbu maqolada suvni elektroliz qilish orqali vodorod olish jarayonini boshqarishning zamonaviy model va algoritmlari tahlil qilingan. Elektroliz jarayonining texnologik parametrlari, jumladan kuchlanish, tok kuchi, harorat va bosimning tizim samaradorligiga ta’siri o‘rganilgan. Jarayonni avtomatlashtirish va optimal boshqarish usullari asosida energiya sarfini kamaytirish hamda vodorod ishlab chiqarish unumdorligini oshirish masalalari ko‘rib chiqilgan. Shuningdek, boshqaruv tizimining matematik modeli va algoritmik tuzilmasi ishlab chiqilgan.

Kalit so‘zlar: vodorod, suv elektrolizi, avtomatlashtirish, boshqaruv tizimi, matematik model, algoritm, elektrolizer, energiya samaradorligi, texnologik jarayon.

Аннотация. В данной статье рассмотрены современные модели и алгоритмы управления процессом получения водорода путем электролиза воды. Исследовано влияние технологических параметров электролиза, включая напряжение, силу тока, температуру и давление, на эффективность системы. Рассмотрены вопросы автоматизации и оптимального управления процессом с целью снижения энергопотребления и повышения производительности получения водорода. Также разработаны математическая модель и алгоритмическая структура системы управления.

Ключевые слова: водород, электролиз воды, автоматизация, система управления, математическая модель, алгоритм, электролизер, энергоэффективность, технологический процесс.

Abstract. This article analyzes modern models and control algorithms for hydrogen production through water electrolysis. The influence of technological parameters of the electrolysis process, including voltage, current, temperature, and pressure, on system efficiency is investigated. Methods of automation and

optimal process control aimed at reducing energy consumption and increasing hydrogen production efficiency are considered. In addition, a mathematical model and algorithmic structure of the control system are developed.

Keywords: hydrogen, water electrolysis, automation, control system, mathematical model, algorithm, electrolyzer, energy efficiency, technological process.

KIRISH.

Hozirgi kunda dunyo energetika tizimida ekologik toza va qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan foydalanish dolzarb masalalardan biri hisoblanadi. Atmosferaga zararli gazlar chiqarilishini kamaytirish, an'anaviy yoqilg'i resurslarining cheklanganligi hamda energiya xavfsizligini ta'minlash zarurati vodorod energetikasiga bo'lgan qiziqishni yanada oshirmoqda. Vodorod yuqori energiya sig'imiga ega bo'lgan, yonish jarayonida atrof-muhitga zararli moddalar chiqarmaydigan ekologik toza energiya tashuvchisi sifatida muhim ahamiyat kasb etadi.

Vodorod olishning turli usullari mavjud bo'lib, ular orasida suvni elektroliz qilish usuli ekologik xavfsizligi va yuqori samaradorligi bilan ajralib turadi. Elektroliz jarayonida elektr energiyasi yordamida suv molekulalari kislorod va vodorod gazlariga ajratiladi. Ushbu texnologiya qayta tiklanuvchi energiya manbalari bilan integratsiyalash imkoniyatiga ega bo'lib, "yashil vodorod" ishlab chiqarishda asosiy usullardan biri hisoblanadi.

Suv elektrolizi jarayonining samaradorligi ko'plab texnologik parametrlar — tok kuchi, kuchlanish, harorat, elektrolit konsentratsiyasi va bosim kabi omillarga bog'liq. Ushbu parametrlarni optimal boshqarish energiya sarfini kamaytirish, uskunalarning ishonchliligini oshirish hamda vodorod ishlab chiqarish unumdorligini ta'minlashda muhim rol o'ynaydi. Shu sababli elektroliz qurilmalarini avtomatlashtirish, ularning matematik modellarini yaratish va boshqaruv algoritmlarini ishlab chiqish zamonaviy ilmiy tadqiqotlarning muhim yo'nalishlaridan biri hisoblanadi.

Mazkur maqolada suvni elektroliz qilish orqali vodorod olish jarayonining boshqaruv modeli va algoritmlari tahlil qilinadi. Jarayonning asosiy texnologik ko'rsatkichlari o'rganilib, boshqaruv tizimining funksional tuzilmasi hamda samarali ishlash algoritmlari ishlab chiqiladi. Bundan tashqari, energiya tejamkor va barqaror ishlovchi avtomatlashtirilgan boshqaruv tizimini yaratish masalalari ko'rib chiqiladi.

MATERIALLAR VA USULLAR. Elektroliz orqali vodorod ishlab chiqarish jarayonining avtomatlashtirilgan sxemasini loyihalash uchun quyidagi asosiy komponentlar va ularning o'zaro bog'lanishini hisobga olish kerak. Quyida umumiy sxema va uning tarkibiy qismlari tasvirlanadi. Ushbu sxema jarayonni

ISSN 3030-3907

real vaqt rejimida monitoring qilish, boshqarish va optimallashtirishni ta’minlaydi.

Jarayon MAVO (elektroliz qurilmasi) idishida demineralizatsiyalangan suv tayyorlashdan boshlanadi, bu erda suvga kuchli elektrolit (masalan, KOH yoki NaOH) qo‘shiladi, bu suvning elektr o‘tkazuvchanligini oshiradi. Elektrolit CH-1 nasosi yordamida T-1 kolonni orqali aylanishga yo‘naltiriladi, keyin T-2 kolonni orqali qayta ishlanib, CH-2 nasosi orqali tizimga qaytariladi, bu jarayonning uzluksizligini ta’minlaydi. Keyinchalik elektrolit “Elektroliz bloki 3-1” ga (elektroliz kamerasi) yetib boradi, bu yerda doimiy tok manbai ta’sirida suv molekulalari ajralishni boshlaydi. Anod (+) va katod (-) elektrodlari orqali elektr zaryadi taqsimlanadi: anodda $2H2O \rightarrow O2+4H++4e-$ $2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$ $2H2O \rightarrow O2+4H++4e-$ reaksiyasi sodir bo‘lib kislorod hosil bo‘ladi, katodda esa $2H2O+2e- \rightarrow H2+2OH-$ $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$ $2H2O+2e- \rightarrow H2+2OH-$ reaksiyasi natijasida vodorod chiqadi.

Hosil bo‘lgan gazlar T-3 (vodorod) va T-4 (kislorod) kolonnalari orqali yig‘iladi. Vodorod C-2-1 filtrlash moslamasi orqali tozalashga yo‘naltirilib, PK-1 idishida “Quritish va tozalash blogi H_2” da bosim ostida quruq va 99.9995% tozalangan holga keltiriladi. Kislorod esa C-2 filtrlash moslamasi orqali K-1 idishiga o‘tib, 99.5% tozalangan holatga keltiriladi. Vodorodning ikki baravar ko‘p hosil bo‘lishi tufayli bosim farqini muvozanatlash uchun maxsus membrana ishlatiladi, bu kislorod poliga o‘tkazishni oldini oladi. T-4 issiqlik almashinuvchisi va “Chiller” (sovutish moslamasi) yordamida jarayon harorati boshqariladi va tizimning barqarorligi ta’minlanadi.

Avtomatlashtirish nuqtai nazaridan, jarayon sensorlar (harorat, bosim, gaz konsentratsiyasi), PLC/SCADA boshqaruv tizimlari va IoT integratsiyasi orqali real vaqt rejimida monitoring qilinishi mumkin. Nasoslar (CH-1, CH-2) va klapanlar avtomatik sozlanishi, quvvat regulyatorlari orqali energiya sarfi optimallashtirilishi va gaz sızıqtılarını aniqlash sensorlari (masalan, MQ-8) xavfsizlikni oshirishi mumkin. Jarayonning energiya samaradorligi 50-70% va ishlab chiqarish hajmi 500 m^3/soatgacha yetishi mumkin, bu esa uni sanoatda keng qo‘llashga moslashtiradi.

Tadqiqot davomida boshqaruv tizimining matematik modeli ishlab chiqildi va unda kirish parametrlarining chiqish samaradorligiga ta’siri baholandi. Jarayonni boshqarishda mikroprotsessorli kontroller hamda sensorlardan foydalanildi. Sensorlar yordamida real vaqt rejimida harorat, tok va bosim ko‘rsatkichlari nazorat qilindi.

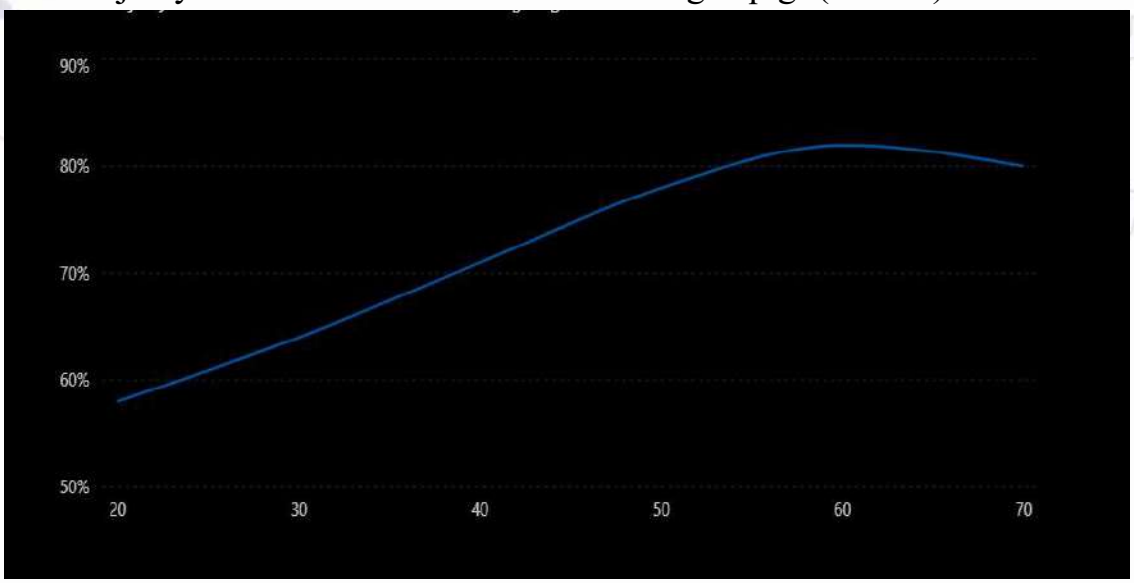
Boshqaruv tizimida PID-algoritm asosida avtomatik rostlash usuli qo‘llanildi. Ushbu usul parametrlarning keskin o‘zgarishlarida tizimning barqaror ishlashini ta’minlaydi. Tok kuchining oshishi vodorod ishlab chiqarish

ISSN 3030-3907

unumdorligini oshiradi, biroq energiya sarfi ham ortadi. Shu sababli optimal boshqaruv rejimini tanlash muhim hisoblanadi.

NATIJALAR VA XULOSA. Tajriba natijalariga ko‘ra haroratning oshishi elektroliz samaradorligini ma’lum chegaragacha yaxshilashi aniqlandi. Biroq yuqori harorat elektrodlarning ishlash muddatiga salbiy ta’sir ko‘rsatishi mumkin.

Elektroliz jarayonida harorat va samaradorlik bog‘liqligi (1-rasm)



1-rasm. Haroratning elektroliz samaradorligiga ta’siri

Jarayon algoritmi quyidagi bosqichlarda amalga oshirildi:

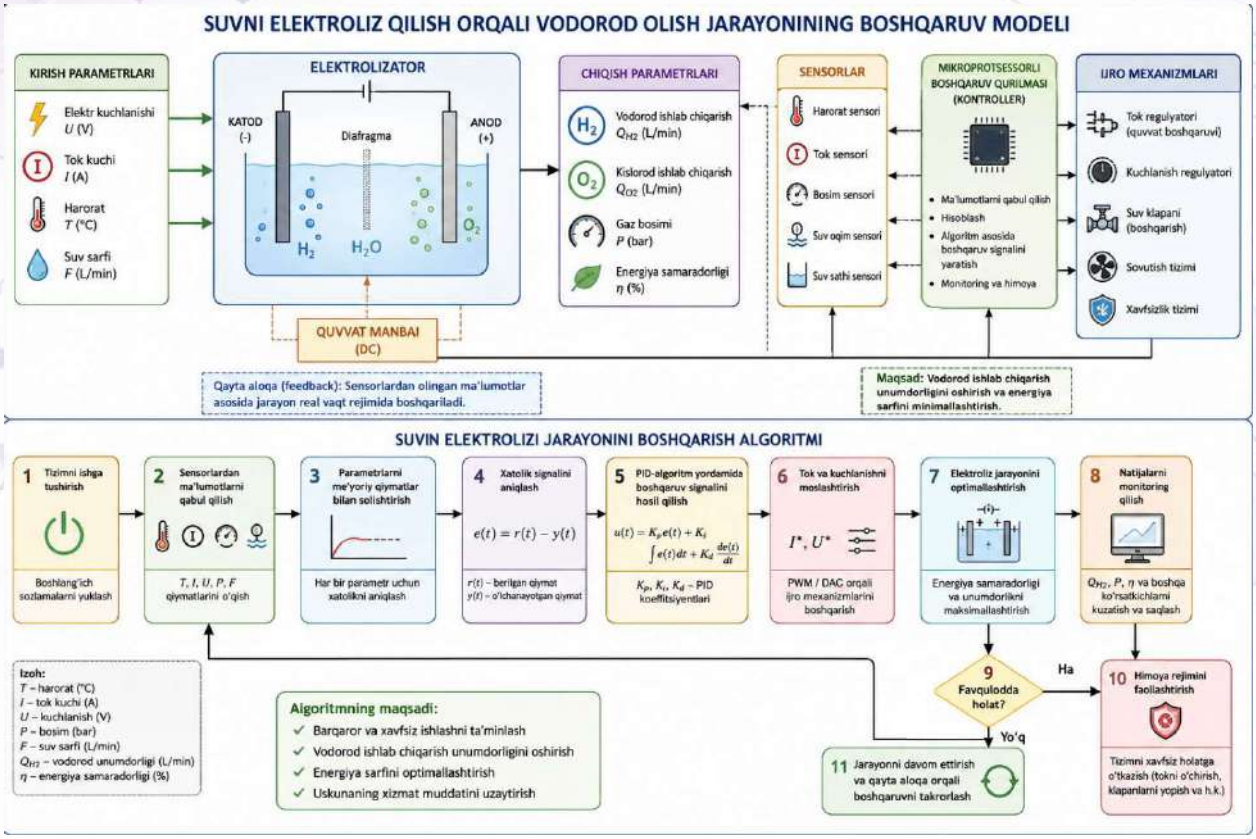
Elektroliz tizimini ishga tushirish;
Sensorlardan boshlang‘ich ma’lumotlarni qabul qilish;
Tok kuchi va kuchlanishni nazorat qilish;
Harorat va bosim parametrlarini monitoring qilish;
PID-algoritm asosida boshqaruv signalini shakllantirish;
Elektrolizator ish rejimini optimallashtirish;
Vodorod ishlab chiqarish samaradorligini baholash.

Mazkur usullar asosida ishlab chiqilgan boshqaruv modeli elektroliz jarayonining energiya samaradorligini oshirish, tizimning barqaror ishlashini ta’minlash hamda vodorod ishlab chiqarish unumdorligini ko‘paytirishga xizmat qiladi.

Suvni elektroliz qilish orqali vodorod olish jarayonining boshqaruv modeli va algoritmlari: Boshqaruv modelida elektrolizator asosiy texnologik obyekt sifatida qaraladi (2-rasm). Tizimga kiruvchi parametrlar sifatida elektr kuchlanishi, tok kuchi, harorat va suv sarfi olinadi. Chiqish parametrlariga esa vodorod ishlab chiqarish unumdorligi, gaz bosimi va energiya samaradorligi kiradi. Sensorlar yordamida real vaqt rejimida ma’lumotlar olinadi va

ISSN 3030-3907

mikroprotsessorli boshqaruv qurilmasiga uzatiladi. Kontroller esa optimal boshqaruv algoritmi asosida ijro mexanizmlariga buyruq beradi.



2- rasm. Suvni elektroliz qilish orqali vodorod olish jarayonining boshqaruv modeli

Jarayonning umumiy matematik modeli quyidagi bog‘lanish orqali ifodalanadi:

$$Q_{H2}=k \cdot I \cdot t$$

Bu yerda:

Q_{H2} — hosil bo‘lgan vodorod miqdori;

I — tok kuchi;

t — vaqt;

k — elektrokimyoviy koeffitsiyent.

Boshqaruv algoritmi quyidagi ketma-ketlikda ishlaydi (3-rasm):

- Tizimni ishga tushirish;
- Sensorlardan ma’lumotlarni qabul qilish;
- Parametrlarni me’yoriy qiymatlar bilan solishtirish;
- Xatolik signalini aniqlash;
- PID-regulyator yordamida boshqaruv signalini hosil qilish;
- Tok va kuchlanishni moslashtirish;
- Elektroliz jarayonini optimallashtirish;
- Natijalarni monitoring qilish;

ISSN 3030-3907

Favqulodda holatlarda tizimni himoyalash.

PID-regulyatorning matematik ifodasi quyidagicha yoziladi:

$$u(t) = Kpe(t) + Ki\int e(t)dt + Kddtde(t)$$

Bu yerda:

u(t) — boshqaruv signali;

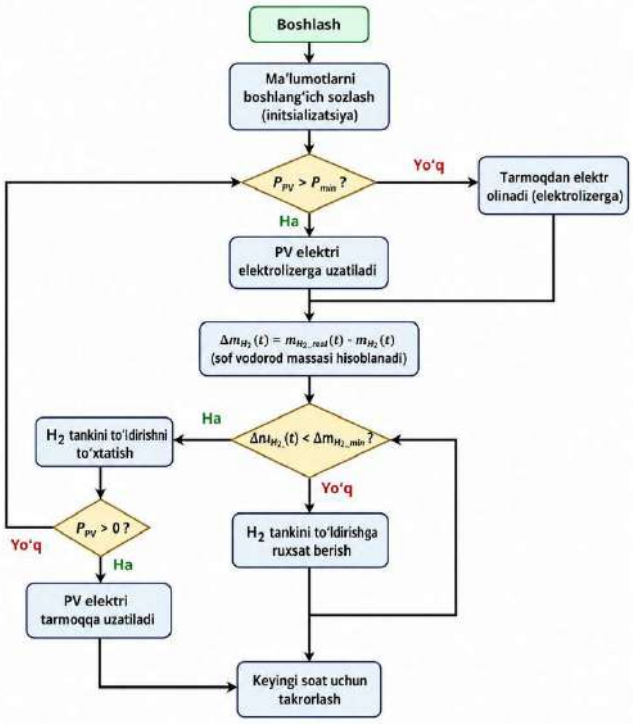
e(t) — xatolik signali;

Kp — proporsional koeffitsiyent;

Ki — integral koeffitsiyent;

Kd — differensial koeffitsiyent.

Mazkur algoritm tizimning barqaror ishlashini, energiya sarfining kamayishini va vodorod ishlab chiqarish samaradorligining oshishini ta’minlaydi.



3-rasm. Boshqaruv algoritmi

XULOSA. Mazkur tadqiqot ishida suvni elektroliz qilish orqali vodorod olish jarayonini boshqarish modeli va algoritmlari tahlil qilindi. Tadqiqot natijasida elektroliz jarayonining asosiy texnologik parametrlari — tok kuchi, kuchlanish, harorat va bosimning tizim samaradorligiga sezilarli ta’sir ko‘rsatishi aniqlandi. Ushbu parametrlarni avtomatik boshqarish orqali vodorod ishlab chiqarish unumdorligini oshirish va energiya sarfini kamaytirish imkoniyati mavjudligi ko‘rsatildi.

Ish davomida elektroliz qurilmasining matematik modeli ishlab chiqildi hamda PID-regulyator asosidagi boshqaruv algoritmi taklif etildi. Taklif etilgan algoritm tizimning barqaror ishlashini ta’minlab, texnologik parametrlarning me’yoriy qiymatlarda ushlab turilishiga xizmat qiladi. Shuningdek, real vaqt

ISSN 3030-3907

rejimida monitoring va qayta aloqa mexanizmlaridan foydalanish tizimning xavfsizligi hamda ishonchliligini oshirishga yordam beradi.

Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatdiki, avtomatlashtirilgan boshqaruv tizimlarini qo‘llash elektroliz jarayonining energiya samaradorligini oshiradi, vodorod ishlab chiqarish sifatini yaxshilaydi va uskunalarning xizmat muddatini uzaytiradi. Shu sababli suv elektrolizi asosida vodorod ishlab chiqarish texnologiyalarini zamonaviy boshqaruv usullari bilan integratsiyalash sanoat va energetika sohalarida istiqbolli yo‘nalishlardan biri hisoblanadi.

Kelgusida ushbu tizimlarni sun’iy intellekt, neyron tarmoqlar va adaptiv boshqaruv algoritmlari asosida takomillashtirish orqali vodorod energetikasi samaradorligini yanada oshirish mumkin.

ADABIYOTLAR RO‘YXATI

1. Smith, J. (2020). Hydrogen Production through Electrolysis. Science Publishers.
2. Brown, A., & Green, B. (2018). Environmental Impact of Hydrogen Production. Energy Journal, 35(2), 123-145.
3. Norsk Hydro Electrolysers AS. (2021). Retrieved from https://www.norskhydro.com/
4. Hydrogenics Corporation. (2019). Hydrogen Electrolysis Technology. Retrieved from https://www.hydrogenics.com/
5. Uralhimmash. (2022). Electrolysis Equipment for Hydrogen Production. Technical Report, Uralhimmash, Russia.
6. http://www.hydro.com/en/, www. hydroelectrolysers.com 2. Lymberopoulos N.
7. «Hydrogen production from renewables» Report on RES2H2.
8. Кулешов Н.В., Коровин Н.В., Терентьев А.А., Рыжиков А.В. Отечественные
9. электролизеры – необходимая составляющая водородной энергетики России – Труды Международного симпозиума по водородной энергетике. Москва, 1-2 ноября 2005 г. - М.: Издательство МЭИ, 2005. – С. 156-162.
10. Godula-Jopek, A. (2015). Hydrogen production: By electrolysis. Wiley-VCH.
11. Groover, M. P. (2015). Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing (4th ed.). Pearson.
12. International Energy Agency. (2020-2023). Hydrogen production and technology reports. https://www.iea.org/reports/hydrogen
13. IEEE Transactions on Industrial Informatics. (n.d.). Real-time monitoring and optimization with IoT and AI.
14. ScienceDirect. (n.d.). Electrolysis process energy consumption and electrode materials. https://www.sciencedirect.com

ISSN 3030-3907

15. SpringerLink. (n.d.). Electrolysis technologies and automation research. https://link.springer.com
16. Siemens AG. (n.d.). TIA portal documentation and S7-1200 manual. https://support.industry.siemens.com
17. Omega Engineering. (n.d.). Temperature measurement handbook (PT100 section). https://www.omega.com

ISSN 3030-3907