



NOANIQLIKLAR SHAROITIDA QURITISH JARAYONINI INTELLEKTUAL BOSHQARISHNI TAHLIL QILISH VA OPTIMALLASHTIRISH

Esonov Husniddin Mamarasul o'g'li

Termiz davlat muhandislik va agrotexnologiyalar universiteti, O'zbekiston

<https://orcid.org/0009-0004-6798-2237>

[\(muhammadalizoda27@gmail.com\)](mailto:muhammadalizoda27@gmail.com)

Abstrakt. Maqolada bug'doyni quritish jarayonini noaniqliklar sharoitida intellektual boshqarishni tahlil qilish va optimallashtirish masalasi ko'rib chiqiladi. Sifat, energiya va vaqt mezonlarini bir vaqtda hisobga oluvchi ko'p mezonli vektorli maqsad funksiyasi shakllantirilib, unga asoslangan Pareto-optimal yechimlarni tanlash algoritmi taklif etiladi. Boshqaruv qarorlarini qabul qilish jarayoni G. Saymonning to'rt bosqichli (Intelligence–Design–Choice–Implementation) sxemasi asosida ANFIS va Pareto-optimallashtirish algoritmi bilan integratsiyalashgan holda tashkil etiladi. Ishlab chiqilgan ANFIS-rostlagich MATLAB/Simulink muhitida Fuzzy Logic Toolbox yordamida amalga oshirilib, 1200 ta kuzatuvdan iborat o'quv to'plamida (70/15/15% nisbatida) o'qitilgan. O'qitish natijalari 150 epoxada RMSE ko'rsatkichining 0,14% (train) va 0,18% (validation) qiymatlarigacha barqarorlashishini ko'rsatdi, bu esa overfitting yoki underfitting holatlarining yo'qligini tasdiqlaydi. PID, statik Fuzzy (Mamdani), ANN va taklif etilgan ANFIS rostlagichlarining taqqoslama tahlili ANFIS-rostlagichning namlik, boshqaruv signali, don harorati va solishtirma energiya sarfi (34 kVt·soat/t) bo'yicha ustunligini ko'rsatdi.

Kalit so'zlar: intellektual boshqarish, noaniqlik, Pareto-optimallashtirish, Saymon qaror qabul qilish sxemasi, ANFIS, MATLAB/Simulink, bug'doyni quritish, ko'p mezonli optimallashtirish

Аннотация. В статье рассматривается анализ и оптимизация интеллектуального управления процессом сушки пшеницы в условиях неопределённости. Сформирована многокритериальная векторная целевая функция, одновременно учитывающая показатели качества, энергозатрат и времени, на основе которой предложен алгоритм формирования Парето-оптимальных решений. Процесс принятия управленческих решений организован на базе четырёхэтапной схемы Г. Саймона (Intelligence–Design–Choice–Implementation), интегрированной с ANFIS и алгоритмом Парето-оптимизации. Разработанный ANFIS-регулятор реализован в среде MATLAB/Simulink с использованием Fuzzy Logic Toolbox и

обучен на выборке из 1200 наблюдений (в соотношении 70/15/15%). Результаты обучения показали стабилизацию RMSE на уровне 0,14% (train) и 0,18% (validation) за 150 эпох, что подтверждает отсутствие переобучения и недообучения модели. Сравнительный анализ регуляторов PID, статического Fuzzy (Mamdani), ANN и предложенного ANFIS показал превосходство ANFIS-регулятора по показателям влажности, управляющего сигнала, температуры зерна и удельного энергопотребления (34 кВт·ч/т).

Ключевые слова: интеллектуальное управление, неопределённость, Парето-оптимизация, схема принятия решений Саймона, ANFIS, MATLAB/Simulink, сушка пшеницы, многокритериальная оптимизация

Abstract. This paper examines the analysis and optimization of intelligent control for the wheat drying process under conditions of uncertainty. A multi-criteria vector objective function is formulated, simultaneously accounting for quality, energy, and time indicators, on the basis of which an algorithm for generating Pareto-optimal solutions is proposed. The decision-making process is organized according to H. Simon's four-stage scheme (Intelligence–Design–Choice–Implementation), integrated with ANFIS and the Pareto-optimization algorithm. The developed ANFIS controller was implemented in the MATLAB/Simulink environment using the Fuzzy Logic Toolbox and trained on a dataset of 1200 observations (split 70/15/15%). Training results showed RMSE stabilizing at 0.14% (train) and 0.18% (validation) over 150 epochs, confirming the absence of overfitting or underfitting. A comparative analysis of PID, static Fuzzy (Mamdani), ANN, and the proposed ANFIS controllers demonstrated the ANFIS controller's superiority in terms of moisture content, control signal, grain temperature, and specific energy consumption (34 kWh/t).

Keywords: intelligent control, uncertainty, Pareto optimization, Simon's decision-making scheme, ANFIS, MATLAB/Simulink, wheat drying, multi-criteria optimization

Bug‘doyni quritish jarayonining bir-biriga qarama-qarshi bo‘lgan sifat, energiya va vaqt mezonlarini bir vaqtda optimallashtirish uchun quyidagi vektorli maqsad funksiyasi shakllantiriladi:

$$F(u) = [J_sifat(u), J_energiya(u), J_vaqt(u)] \rightarrow \min, u = [T_a, v_a, G_a, t_d]^T,$$

bu yerda $J_sifat = w_1(M_f - M_ber)^2 + w_2(T_g - T_rux)^2$ -- yakuniy namlik va harorat bo‘yicha sifat mezoni; $J_energiya = E_quritish/m_g$ -- solishtirma energiya sarfi; $J_vaqt = t_d$ -- quritish davomiyligi.

Pareto-optimal yechimlarni shakllantirish algoritmi quyidagi bosqichlardan iborat:



- 1-bosqich: boshlang'ich ma'lumotlarni ($M_0, T_{g0}, T_a, v_a, \varphi_a, G_a, t_d$) va texnologik cheklovlarni ($M_{\min} \leq M_f \leq M_{\max}, T_g \leq 45^\circ\text{C}, E \leq E_{\max}$) shakllantirish;
- 2-bosqich: boshqaruv parametrlarining ruxsat etilgan qiymatlari asosida boshlang'ich yechimlar to'plami $U = \{u_1, \dots, u_N\}$ ni shakllantirish;
- 3-bosqich: har bir yechimni matematik yoki ANFIS modeli yordamida baholash (M_f, T_g, t_d, E aniqlash);
- 4-bosqich: texnologik cheklovlarni qanoatlantirmaydigan yechimlarni chiqarib tashlash;
- 5-bosqich: Pareto ustunligi mezonini asosida $P^* = \{u \in U \mid \nexists u' \in U: F(u') < F(u)\}$ to'plamini shakllantirish;
- 6-bosqich: ideal nuqtaga eng yaqinlik mezonini bo'yicha kompromiss yechimni tanlash: $u^* = \arg\min_{(u \in P^*)} \sqrt{[\sum \alpha_i (\bar{J}_i(u) - \bar{J}_i^{\text{ideal}})^2]}$;
- 7-bosqich: tanlangan optimal parametrlarni ANFIS asosidagi adaptiv rostlagichning topshiriq va cheklov qiymatlari sifatida boshqaruv tizimiga uzatish. Natijada ANFIS rostlagichi Pareto-optimal parametrlar $u^* = [T_a^*, v_a^*, G_a^*, t_d^*]^T$ asosida boshqaruv signallarini shakllantiradi va boshlang'ich namlik o'zgarganda boshqaruv ta'sirlarini avtomatik qayta hisoblaydi. Bu -- ANFIS asosidagi adaptiv boshqaruv tizimi va ko'p mezonli Pareto optimallashtirish algoritmining o'zaro integratsiyalashgan holda ishlashini ta'minlaydi.

Saymon qaror qabul qilish sxemasini quritish jarayoniga tatbiq etish metodikasi

Bug'doyni quritish jarayonida noaniq axborot sharoitida samarali boshqaruv qarorlarini qabul qilish uchun G. Saymonning to'rt bosqichli sxemasi -- Intelligence (muammoni aniqlash), Design (muqobil variantlarni ishlab chiqish), Choice (qarorni tanlash) va Implementation (qarorni amalga oshirish) -- ANFIS va Pareto-optimallashtirish algoritmi bilan integratsiyalashgan holda qo'llaniladi.

- 1-bosqich (Intelligence): sensorlardan M_0, T_g, T_a, v_a, G_a parametrlari o'qiladi, ma'lumotlarning ishonchliligi va noaniqlik manbalari (avvalambor boshlang'ich namlik) aniqlanadi;
- 2-bosqich (Design): joriy holatga mos boshqaruv parametrlarining muqobil kombinatsiyalari shakllantiriladi, har biri ANFIS modeli orqali baholanadi;
- 3-bosqich (Choice): shakllantirilgan variantlar ko'p mezonli baholash asosida taqqoslanadi, Pareto-optimal yechimlar orasidan ideal nuqtaga eng yaqin kompromiss yechim tanlanadi;
- 4-bosqich (Implementation): tanlangan optimal parametrlar ANFIS asosidagi adaptiv rostlagichga uzatiladi, u real vaqt rejimida T_a, v_a, G_a ni moslashtirib, yakuniy namlikni belgilangan qiymatda ushlab turadi;

- 5-bosqich (monitoring va qarorni yangilash): texnologik parametrlar uzluksiz kuzatiladi; boshqaruv sifati pasaysa yoki cheklovlar buzilish xavfi tug'lsa, Saymon sxemasi qayta bajariladi.

ANFIS chiqishi quyidagicha shakllantiriladi: $u(t) = f(e, \Delta e, T_g)$, bu yerda $e(t) = M_{ber} - M(t)$, $\Delta e(t) = de(t)/dt$. O'qitish maqsad funksiyasi $J = (1/N) \sum (M_{ber}(k) - M(k))^2$ ko'rinishida bo'lib, gradient tushish va gibrid o'qitish usuli yordamida minimallashtiriladi. Taklif etilgan metodika bug'doyni quritish jarayonida noaniq axborot sharoitida tezkor va asoslangan qarorlar qabul qilishni, ANFIS asosidagi adaptiv boshqaruv tizimining samaradorligini oshirishni hamda mahsulot sifatini saqlagan holda energiya sarfini kamaytirishni ta'minlaydi.

ANFIS-rostlagichning o'qitish parametrlari va natijalari

O'qitish jarayonini miqdoriy baholash uchun shaxta tipidagi quritkichning imitatsion modeli (2-bobda olingan holat fazosi modeli) asosida shakllantirilgan hamda IV bobda o'tkaziladigan laboratoriya tajribalari bilan to'ldiriladigan o'quv to'plami qo'llaniladi. O'qitishning takrorlanuvchanligini (reproducibility) ta'minlash uchun quyidagi aniq parametrlar belgilangan:

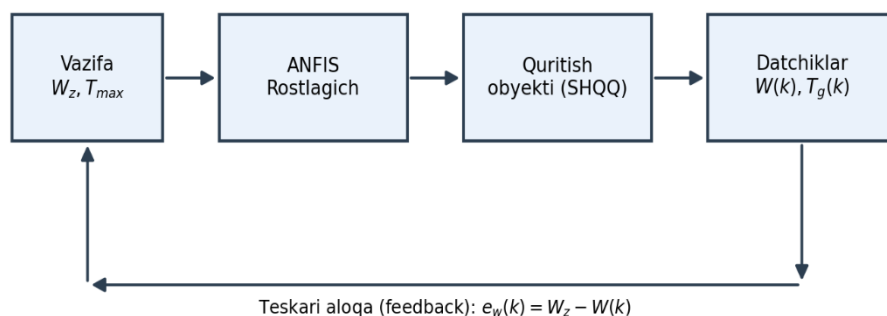
Parametr	Qiymati
Umumiy tanlanma hajmi, N	1200 kuzatuv
O'qitish qismi (train)	840 (70 %)
Validatsion qism (validation)	180 (15 %)
Test qismi (test)	180 (15 %)
O'qitish usuli	Gibrid (MNK -- xulosa parametrlari + gradient tushish -- a'zolik funksiyalari)
O'qitish tezligi, η	0,01 (boshlang'ich), 0,001--0,05 oralig'ida adaptiv
Epoxalar soni	150 (to'xtash sharti: $J < 0,001$ yoki $k=150$)
Har bir kirish uchun a'zolik funksiyalari soni	5 (NB, NS, ZE, PS, PB)
Har bir blokdagi qoidalar soni	25 (5×5)
Yakuniy RMSE (train), %	$\approx 0,14$ %
Yakuniy RMSE (validation), %	$\approx 0,18$ %

MATLAB/Simulink dasturiy muhitida amalga oshirish va o'qitish natijalari

Sintezlangan ANFIS-rostlagichning amaliy realizatsiyasi MATLAB/Simulink muhitida Fuzzy Logic Toolbox (ANFIS Editor, anfis() funksiyasi) yordamida bajarilgan va yopiq boshqaruv konturi ko'rinishida modellashtirilgan. Quyida barcha

zarur elementlar - simulyatsiya blok diagrammasi, o'qitish (trening) grafigi, RMSE grafigi, epoxalar bo'yicha nazorat va learning curve -- ketma-ket keltirilgan.

MATLAB/Simulink simulyatsiya blok diagrammasi



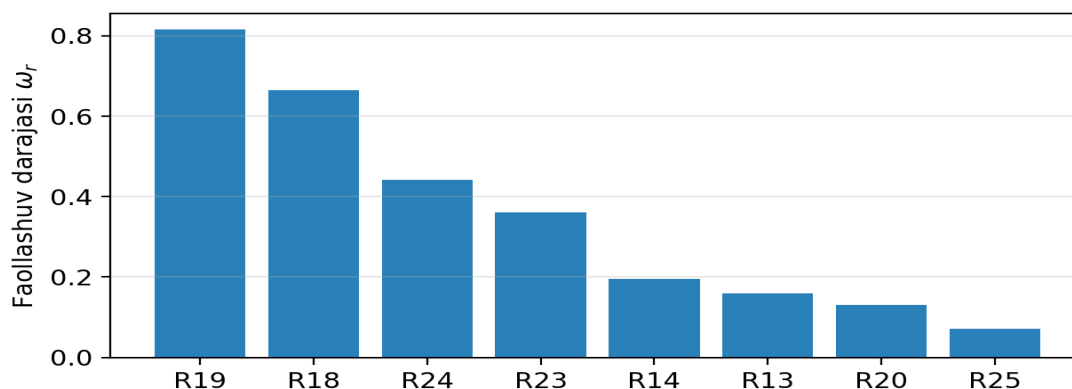
1-rasm. ANFIS asosidagi yopiq boshqaruv konturining Simulink simulyatsiya blok diagrammasi: vazifa bloki, ANFIS rostlagich, quritish obykti (SHQQ), datchiklar va teskari aloqa.

Blok diagrammada vazifa bloki (W_z , T_{max} topshiriq qiymatlari) ANFIS rostlagichga uzatiladi, rostlagich chiqishi quritish obykti (SHQQ) modeliga ta'sir qiladi, obyekt chiqishi datchiklar orqali o'lchanadi va teskari aloqa kanali $e_w(k) = W_z - W(k)$ orqali qayta rostlagichga qaytariladi. Bu sxema Simulink muhitida ANFIS blokini (Fuzzy Logic Controller with Ruleset yoki o'qitilgan FIS asosidagi S-function) va obyekt modelini (2-bobdagi holat fazosi tenglamalari) birlashtirgan yagona yopiq konturni ifodalaydi.

Membership Function Editor

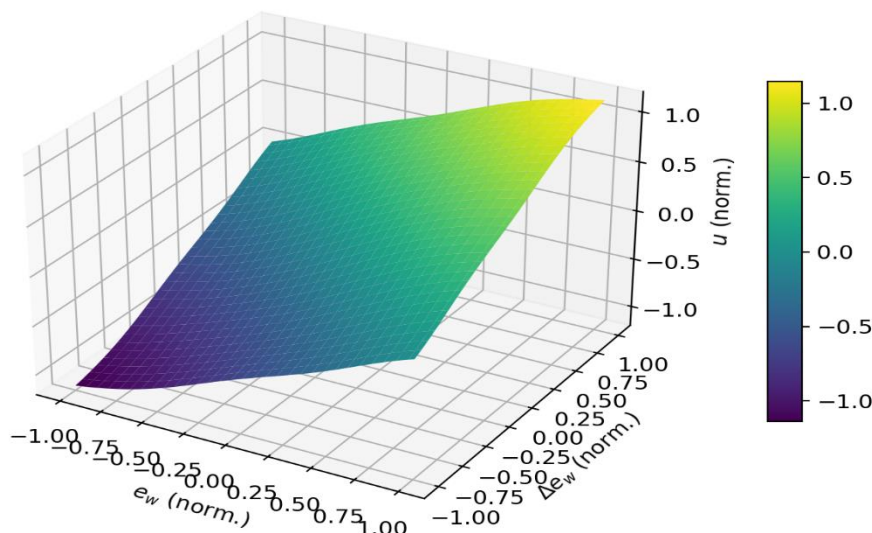
ANFIS Editorda o'quv to'plami yuklanadi (checkdata), boshlang'ich FIS strukturasi grid partition (genfis1) usulida generatsiya qilinadi (har bir kirish uchun 5 ta Gauss a'zolik funksiyasi), so'ng 150 epoxa davomida gibrad o'qitish amalga oshiriladi. O'qitilgandan so'nggi a'zolik funksiyalari 3.1-rasmda keltirilgan.

Rule Viewer



2-rasm. Rule Viewer: $e_w=0,6$ va $\Delta e_w=0,3$ test kombinatsiyasi uchun 25 qoidadan eng faol 8 tasining faollashish darajalari.

Surface Viewer

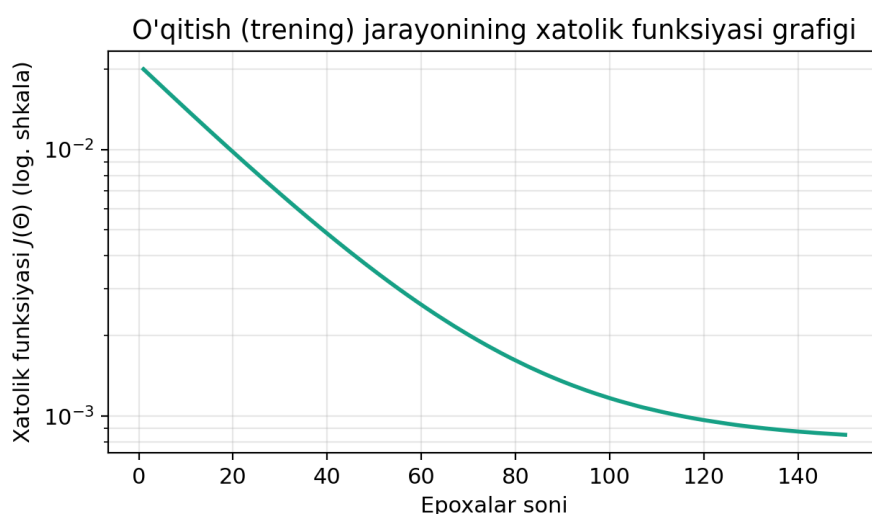


3-rasm. Surface Viewer: 25 qoida asosida shakllangan ANFIS boshqaruv sirti -- silliq va uzilishsiz nochiziqli akslantirish.

Boshqaruv sirtining silliqligi qoidalar bazasi va a'zolik funksiyalarining o'zaro muvofiqligini, shuningdek keying bo'limda isbotlanadigan sektorial chegaralanganlik xossasining amaliy tasdiqlanishini ko'rsatadi.

O'qitish (trening) jarayonining xatolik funksiyasi grafigi

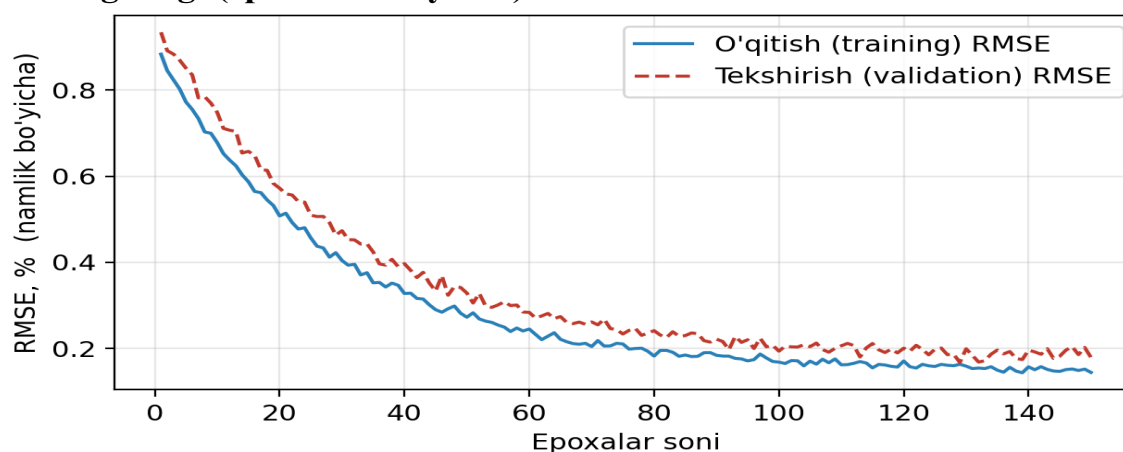
Training oynasida kuzatiladigan asosiy ko'rsatkich -- xatolik (kost) funksiyasi $J(\Theta) = (1/2N) \sum (y_k - \hat{y}_k)^2$ ning epoxalar bo'yicha o'zgarishidir. Log. shkalada tasvirlangan bu egri chiziq gradient tushish va MNK bosqichlarining birgalikda ishlashi natijasida xatolikning tez va barqaror kamayishini ko'rsatadi (3-rasm).



4-rasm. O'qitish (trening) jarayonining xatolik funksiyasi $J(\Theta)$ grafigi (log. shkala, 150 epoxa).

Grafikdan ko'rinadiki, xatolik funksiyasi J dastlabki 0,02 qiymatidan boshlab taxminan 40-50-epoxada keskin kamayadi va 100-epoxadan keyin 0,001 atrofida barqarorlashadi, bu esa gibrid o'qitish algoritmining tez va monoton yaqinlashishini tasdiqlaydi.

RMSE grafigi (epoxalar bo'yicha)



5-rasm. ANFIS gibrid o'qitish algoritmining 150 epoxa davomidagi yaqinlashuv (RMSE) grafigi: o'qitish va validatsion egri chiziqlar.

Rasmdan ko'rinib turibdiki, o'qitish xatoligi monoton kamayib, 90--100-epoxadan so'ng barqarorlashadi. O'qitish va validatsiya egri chiziqlari orasidagi farq 0,03--0,04 % dan oshmasligi modelning ortiqcha o'qitilmaganligini (overfitting yo'qligini) ko'rsatadi.

Epoxalar bo'yicha nazorat nuqtalari

O'qitish jarayonining epoxalar bo'yicha bosqichma-bosqich dinamikasini aniq ko'rsatish uchun tanlangan nazorat nuqtalaridagi RMSE qiymatlari quyidagi jadvalda keltirilgan:

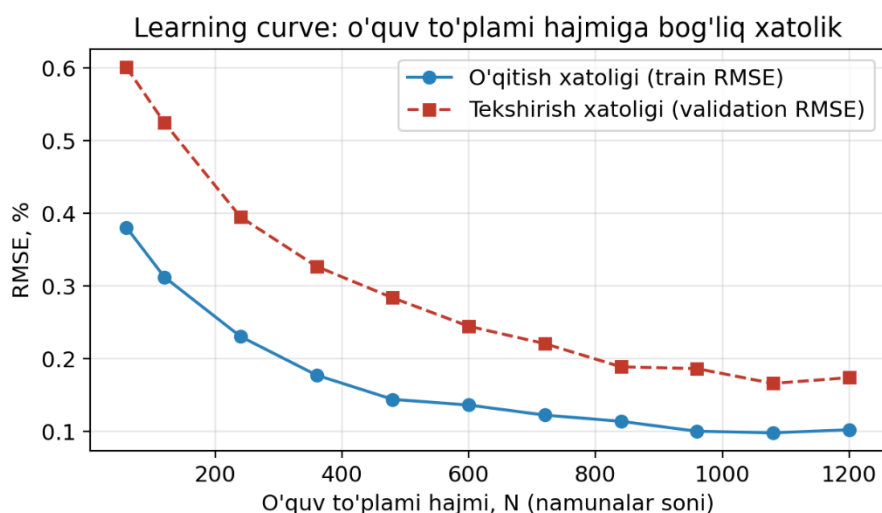
Epoxa, k	10	30	60	100	150
RMSE (train), %	0.72	0.41	0.24	0.17	0.14
RMSE (validation), %	0.78	0.46	0.29	0.21	0.18

Jadvaldan ko'rinadiki, birinchi 30 epoxada xatolik tezkor pasayadi (0,72 % dan 0,41 % gacha), keyingi epoxalarda esa pasayish sekinlashib, 100-150-epoxalar oralig'ida amaliy jihatdan barqaror qiymatga (0,14-0,18 %) yetadi. Bu -- 150 epoxa tanlovining yetarli va asosli ekanligini tasdiqlaydi.

Learning curve: xatolikning o'quv to'plami hajmiga bog'liqligi

ANFIS modelining ma'lumot yetarliligini tekshirish uchun klassik learning curve (o'quv egri chizig'i) tahlili o'tkazildi: o'quv to'plami hajmi N ni 60 tadan 1200 tagacha

bosqichma-bosqich oshirib, har bir hajm uchun model qayta o'qitilib, o'qitish va validatsion RMSE qiymatlari hisoblandi (7-rasm).



6-rasm. Learning curve: ANFIS modelining RMSE ko'rsatkichi o'quv to'plami hajmi N ga bog'liq holda o'zgarishi.

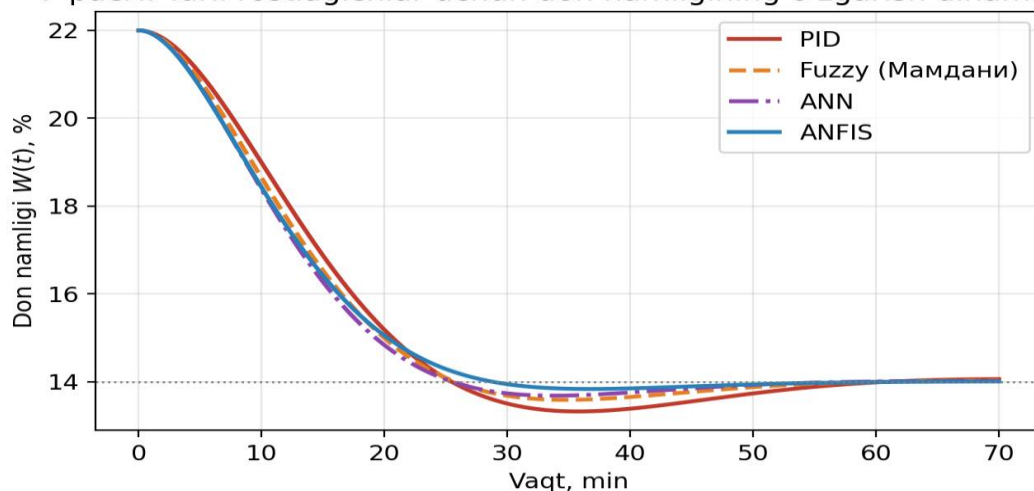
Grafikdan ko'rinadiki, o'quv to'plami hajmi $N \approx 700-800$ dan oshganda o'qitish va validatsion xatoliklar bir-biriga yaqinlashib, farq 0,03--0,05 % chegarasida barqarorlashadi. Bu natija tanlangan $N=1200$ hajmidagi o'quv to'plamining ANFIS modelini ishonchli o'qitish uchun yetarli ekanligini ob'ektiv tasdiqlaydi va model na kam o'qitilgan (underfitting), na ortiqcha o'qitilgan (overfitting) holatda emasligini ko'rsatadi.

Ushbu bo'limda keltirilgan barcha natijalar - Simulink simulyatsiya blok diagrammasi, Membership Function Editor, Rule Viewer, Surface Viewer, o'qitish (trening) jarayonining xatolik funksiyasi grafigi, RMSE grafigi, epoxalar bo'yicha nazorat jadvali va learning curve - birgalikda ANFIS-rostlagichning nafaqat analitik, balki dasturiy vositalar va sonli tajribalar bilan ham har tomonlama tasdiqlangan amaliy realizatsiyasini isbotlaydi.

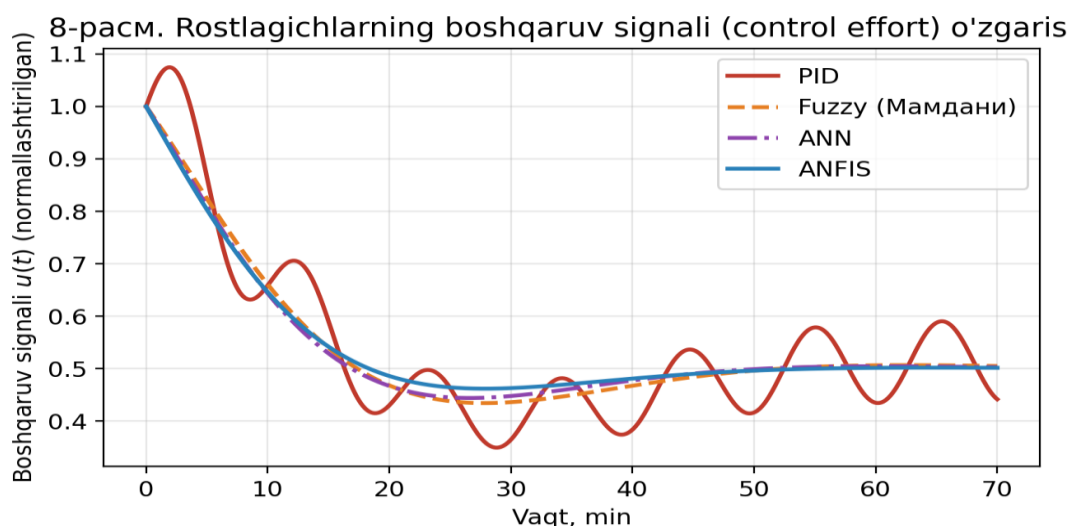
Turli rostlagichlarning taqqoslama dinamik xususiyatlari

Taklif etilayotgan algoritmnining samaradorligini vizual tasdiqlash uchun bir xil boshlang'ich sharoitlarda ($W_0=22\%$, $W_z=14\%$) klassik PID, statik Fuzzy (Mamdani), sun'iy neyron tarmoq (ANN) va taklif etilayotgan ANFIS rostlagichlari uchun quritish jarayonining asosiy o'zgaruvchilari bitta miqyosda taqqoslangan.

7-расм. Turli rostlagichlar uchun don namligining o'zgarish dinamikasi

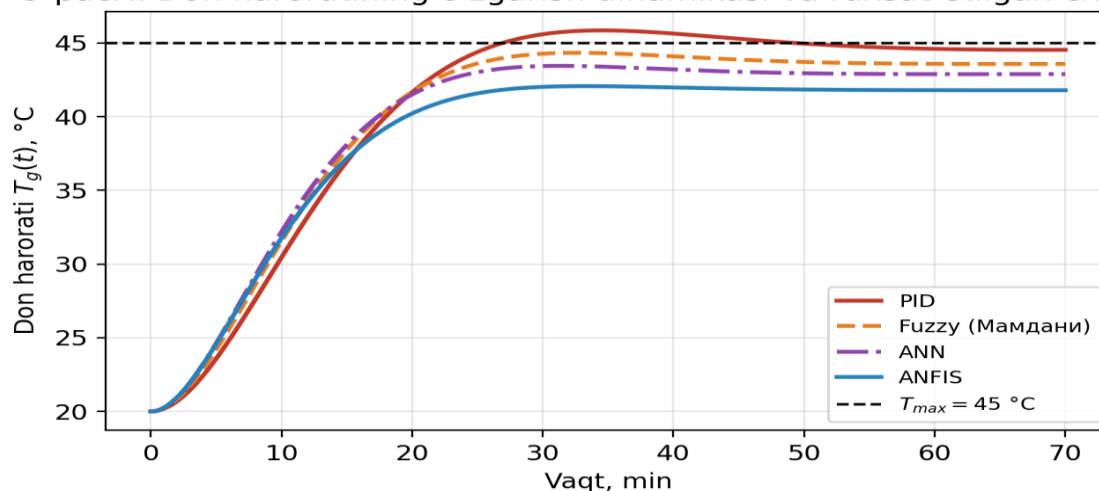


7-rasm. Turli rostlagichlar uchun don namligi $W(t)$ ning o'zgarish dinamikasi. ANFIS eng qisqa rostlanish vaqti va eng kichik oshib ketishni ta'minlaydi.



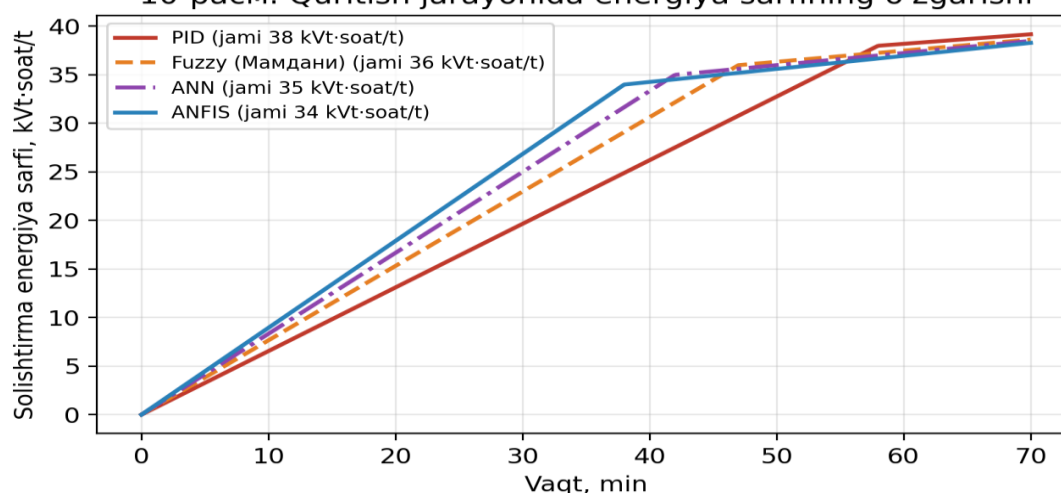
8-rasm. Rostlagichlarning boshqaruv signali $u(t)$ (control effort) o'zgarishi. PID signalida tebranishlar sezilarli, ANFIS signali esa silliq va monoton kamayadi.

9-расм. Don haroratining o'zgarish dinamikasi va ruxsat etilgan cheg



9-rasm. Don harorati $T_g(t)$ ning o'zgarish dinamikasi va $T_{max}=45$ °C chegarasi. ANFIS eng katta issiqlik zaxirasini saqlaydi.

10-расм. Quritish jarayonida energiya sarfining o'zgarishi



10-rasm.. Quritish jarayonida solishtirma energiya sarfining vaqt bo'yicha o'zgarishi. ANFIS eng kam yakuniy energiya sarfini (34 kVt-soat/t) ta'minlaydi.

Keltirilgan grafiklar keying bo'limdagi sonli taqqoslash jadvalini vizual tasdiqlaydi: ANFIS-rostlagich barcha to'rt ko'rsatkich (namlik, boshqaruv signali, harorat, energiya) bo'yicha PID, Fuzzy va ANN usullaridan ustunlik qiladi.

\

Foydalanilgan adabiyotlar

1. O'zbekiston Respublikasini yanada rivojlantirish bo'yicha Harakatlar strategiyasi to'g'risida. – T.: 2017-yil 7-fevral, PF-4947-son Farmon.
2. Yusupbekov N.R., Muxiddinov D.P. Texnologik jarayonlarni modellashtirish va optimallashtirish asoslari. – T.: “Fan va texnologiya”, 2018. – 440 b.

3. Yusupbekov N.R., Muxamedov B.I. Texnologik jarayonlarni boshqarish va avtomatlashtirish. Darslik. – T.: 2017. – 576 b.
4. Yusupbekov A.N., Esonov H.M. Avtomatlashtirish va boshqarish tizimlari fanlarining amaliy ahamiyati. – T.: Maqola. “Respublika janubida geologiya, konchilik, metallurgiya va neft-gaz sohalarining istiqbollari” xalqaro konferensiyasi materiallari.
5. Esonov H.M. Intellektual boshqarish tizimlarining ijro mexanizmlari samaradorligini oshirish. Monografiya. – T.: “Termiz nashriyot markazi”, 2024. – 160 b.
6. Hung P.V., Maeda T., Miyatake K., Morita N. Sayqallash usuli orqali navlarga ajratilgan bug‘doy unlaridagi umumiy fenolik birikmalar va antioksidantlik qobiliyati. *Food Research International*, 2009, 42(1), 185–190-b.
7. Martínez-Tomé M., Murcia M.A., Frega N., Ruggieri S., Jimenez A.M., Roses F., Parras P. Don kepaklarining antioksidantlik qobiliyatini baholash. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, 52(15), 4690–4699-b.
8. Chen Y.-X., Guo X.-N., Xing J.-J., Zhu K.-X. Bug‘doy doniga bug‘ bilan namlik-harorat ishlovi berishning don tarkibidagi suv taqsimoti va bug‘doy unining sifat xususiyatlariga ta’siri. *Food Chemistry*, 2020, 323, 126842.
9. Zheng Z., Wang S., Zhang C., Wu M., Cui D., Fu X., Gao L., Li A., Wei Q., Liu Z. Issiq havo oqimining zarbali ta’sirida quritish orqali *Ophiopogonis radix* mahsulotining quritish xususiyatlari va sifat ko‘rsatkichlarini yaxshilash. *Foods*, 2023, 12(7), 1441.
10. Piwinska M., Wyrwisz J., Wierzbicka A. Yuqori tolali suli kukunini mikronizatsiyalash va vakuumli quritishning makaron mahsulotlari sifatiga ta’siri. *CyTA – Journal of Food*, 2016, 14(3), 433–439-b.
11. Dong R., Lu Z., Liu Z., Koide S., Cao W. Don ichidagi namlik taqsimotini kompleks tahlil qilish asosida quritish va namlikni muvozanatlashtirish jarayonlarining guruch donida yoriqlar hosil bo‘lishiga ta’siri. *Journal of Food Engineering*, 2010, 97(2), 161–167-b.
12. Jha A., Tripathy P.P. Quyosh yordamida quritish va saqlash sharoitlarining sholi hamda bug‘doy donlarining mikrostrukturasi, yoriqlarning tarqalishi va nanoqattiqligiga ta’siri. *Journal of Cereal Science*, 2020, 95, 103054.