



И.Т. Утепбергенов¹, Л.С. Исабекова², Ш.Ж.Тойбаева¹

¹Energo University, Алматы, Қазақстан

²Farabi University, Алматы, Қазақстан

E-mail: issabekova.lyazzatt@gmail.com

ГИБРИДТІ НЕЙРО-АНЫ ЕМЕС ЕМЕС БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІ НЕГІЗІНДЕ ӨНЕРКӘСӘПТІК НАН ПІСІРУ ПЕШІНІҢ ЦИФРЛЫҚ ЕГІЗІН ӘЗІРЛЕУ

Аңдатпа. Мақалада өнеркәсіптік өндірісті цифрландыру және зияткерлік басқару технологияларын енгізу жағдайында нан пісіру пешін басқару тиімділігін арттыру мәселесі қарастырылады. Мұндай технологиялық шешімдер өнеркәсіптік кәсіпорындармен қатар, тылдық қамтамасыз ету жүйелерінің, оның ішінде, әскери инфрақұрылымдағы азық-түлік өндірісі логистикасының цифрлық трансформациясы үшін де өзекті болып табылады. Зерттеудің мақсаты- температуралық тәртіптің тұрақтылығын қамтамасыз ететін және дайын өнім сапасын арттыратын зияткерлік басқару жүйесі негізінде, нан пісіру пешінің сандық егізін әзірлеу. Ұсынылған модель өнеркәсіптік шектеулер мен сараптамалық білімдерді ескере отырып, технологиялық күйлерді болжау әдістері мен үрдіс параметрлерін бейімдегіш реттеуді біріктіреді. Өнеркәсіптік деректердің үлкен көлемін талдау негізінде, нақты уақыт тәртібінде жабдықтың жұмыс тәртіптерін түзетуге мүмкіндік беретін шешім қабылдау жүйесі қалыптастырылады. Жүргізілген модельдеу нәтижелері басқару дәлдігінің артқанын, технологиялық параметрлер ауытқуының азайғанын және пеш жұмысының тұрақтылығының жақсартқанын көрсетті. Ұсынылған тәсіл анық емес логика мен көпқабатты перцептронды (MLP) біріктіруге негізделген. Имитациялық модель негізінде синтетикалық деректер жиынтығы қалыптастырылып, нейрондық желіні оқыту және сынақтан өткізу жүргізілді. Нәтижесінде 4-32-16-2 архитектуралы көпқабатты перцептрон үшін детерминация коэффициенті $R^2 = 0,87$, орташа абсолюттік қате $MAE = 1,92$ құрады. Модельдеу нәтижелері технологиялық параметрлердің рұқсат етілген шектерде сақталу уақытын 92,4%-ға дейін арттыру мүмкіндігін көрсетті.

Түйінді сөздер: сандық егіз, нан пісіру пеші, зияткерлік басқару, автоматтандыру, нейрондық желілік моделдеу, температуралық тәртіп, машиналық оқыту.



Кіріспе.

Төртінші өнеркәсіптік революция Industry 4.0 негізінде, технологиялық үрдістерді басқару арқылы өнеркәсіптік кәсіпорындардың бәсекеге бәсекеге қабілеттілігін арттырудың мүмкіндігі пайда болады. Қазіргі заманауи өндіріс желілері жоғарғы динамикалық болып табылып, сыртқы әсерлерге сезімталдығымен ерекшеленеді. Сарапшылардың бағалауы мен тәжірибелік сынықтарға негізделген дәстүрлі эмпирикалық түзету әдістердің тиімділігі төмендейді. Үрдістеге кіріс параметрлерінің шағын өзгерістеріне жедел әрекет ету мүмкіндігі азайып, өнеркәсіптік ақаулардың пайда болуына және үлкен материалдық шығындардың пайда болуына әсер етуі мүмкін.

Осы мәселелердің ең тиімді шешімдерінің бірі- модельдеу әдістерін қолдану арқылы сандық егіздерді (СЕ) пайдалану болып табылады. Физикалық объектінің математикалық моделін құру, зерттеу жұмыстарын виртуалды ортаға көшіру және нақты өндірісті тоқтатпай-ақ шексіз сынақ тәжірибелерін жүргізуге мүмкіндік береді. Имитациялық модельдер негізінде, өте үлкен көлемдегі синтетикалық деректер массивін қалыптастырудың маңызы артып келеді. Нақты өндірістегі датчиктерден жиналған сенімді әрі жеткілікті тарихи деректер жетіспеген жағдайда, көлемі 10^6 және одан да көп бақылаулардан тұратын деректер қорын жасау зияткерлік басқару жүйелерін, нейрондық желілерді және предиктивті талдау алгоритмдерін сапалы оқыту үшін аса қажет [1]. Қазақстандық зерттеушілердің еңбектерінде нан пісіру пешіндегі температура мен ылғалдылықты интеллектуалды басқару, сондай-ақ тамақ өндірісіндегі технологиялық үдерістерді цифрлық егіздер мен машиналық оқыту әдістері негізінде модельдеу және басқару тәсілдері қарастырылған [3-5].

Осы зерттеудің негізі мақсаты – гибриді нейро- анық емес басқару жүйесіне негізделген өнеркәсіптік нан пісіру пешінің сандық егізін (СЕ) әзірлеу. Бұл модель репрезентативтік деректер қорын қалыптастыруға, сондай-ақ температура мен ылғалдылық сияқты технологиялық үдерістердің басты параметрлерін оңтайландырып, кездейсоқ сыртқы әсерлер жағдайында, өнім сапасының ең жоғарғы көрсеткішіне қол жеткізуге мүмкіндік береді.

Нан және нан-тоқаш өнімдерін өндіру- сапасы тұрақты, қауіпсіз әрі нарықта бәсекеге қабілетті өнім алуға бағытталған өзара тығыз байланысты технологиялық операциялардың күрделі жиынтығы (1-сурет). Технологиялық үдеріс шикізатты қабылдау, сақтау, шикізатты дайындау, ашытқы қамырды дайындау, қамыр илеу, тындыру, қамыр бөлшектеу, алдын-ала толықсыту, өнімді пісіру, нанды суыту, сақтау, тасымалдау мен сауда орындарына өткізуден тұрады. Осы үрдіс ішіндегі ең маңыздысы- пісіру үрдісі. Бастапқы сатыларда, қамырдың қажетті реологиялық қасиеттерін қалыптастыруға және ашыту барысында, желімше құрылымының тұрақтылығын қамтамасыз етуге ерекше назар аударылады [6, 7]. Дегенмен, бұл өнеркәсіптік циклдегі ең маңызды кезең-жылумен өңдеу, яғни пісіру сатысы болып табылады [8,9].



Пісіру үрдісін басқарудың күрделілігі пісіру камерасындағы айнымалы микроклимат жағдайында жылу мен масса алмасу, ылғалдың қозғалысы, желімшенің түзелуі мен құрылымның қалыптасуы сияқты бірнеше үрдістердің бір мезгілде және сызықтық емес сипатта жүруімен байланысты. Нан пісірудің 3 негізгі тәртіпке бөлдік. 1 тәртіпте, ылғалдану деңгейі (w) 70-85%, қыздыру температурасы (T) 110-120°C, уақыт (t) 2-3 мин, 2 тәртіпте (w) 5-10%, қыздыру температурасы (T) 240-250°C, уақыт (t) 3 мин, ал 3 тәртіпте (w) 14-16%, қыздыру температурасы (T) 50-180°C, уақыт (t) 33 мин болған жөн. Жылумен өңдеудің әрбір кезеңі өзіне тән технологиялық міндеттермен және температуралық-ылғалдылық тәртіптерімен сипатталады. Ылғалдандыру кезеңінде қамыр дайындамасының қарқынды көтерілуі қамтамасыз етіліп, ферментативтік үдерістер белсендіріледі. Қарқынды қыздыру кезеңі өнімнің сыртқы қабатының қалыптасуын және қабықтың түзілуін бастайды. Өнім сапасының қалыптасу жылдамдығы дәл осы температура мен ылғалдылық градиенттеріне тәуелді болғандықтан, жылу және масса алмасу үдерістерін модельдеу аса маңызды болып табылады. Бұл байланыстардың сызықтық емес және кездейсоқ сипаты технологиялық ортадағы белгісіздік жағдайында тиімді жұмыс істей алатын интеллектуалды басқару әдістерін қолдануды қажет етеді.

Цифрлық егізді жүзеге асыру үшін басқарудың бірінші деңгейінде бұлыңғыр логика қолданылады. Фаззификация виртуалды датчиктерден келіп түсетін температура мен ылғалдылықтың нақты мәндерін «төмен температура», «артық ылғалдылық», «жеткіліксіз қыздыру» сияқты лингвистикалық санаттарға түрлендіруге мүмкіндік береді. Бұл жүйеге физикалық параметрлерді тек сандық тұрғыдан емес, сонымен қатар технолог-маманның тәжірибелік білімі тұрғысынан да бағалауға жағдай жасайды [10]. Зияткерлік басқару контуры Эбрахим Мамдами алгоритмі негізінде жүзеге асырылған [11]. Модель құрамына тиістілік функцияларын қалыптастыру, анық емес ережелер базасын синтездеу және қорытынды басқарушы сигналды алу үшін дефаззификация рәсімі енгізілген [12].

Материалдар мен тәсілдер.

Анық емес логикаға негізделген басқару жоғары түсініктілікпен және тұрақтылықпен ерекшеленгенімен, оның маңызды шектеуі бар — алдын ала құрылған сараптамалық ережелер (СЕ) қорына тәуелділігі және өздігінен үйрену қабілетінің болмауы. СЕ бейімделгіштігін арттыру және пісіру үдерісіндегі жасырын сызықтық емес байланыстарды дәлірек ескеру үшін жүйе құрылымына нейрондық желі моделі енгізілді.

Нейрондық желі басқару нысанының нақты математикалық сипаттамасын қажет етпей, технологиялық үдерістің ағымдағы күйіне сүйене отырып шешім қабылдайтын жоғарғы деңгейдегі зияткерлік контроллер ретінде қарастырылды. Мұндай тәсіл әсіресе нан пісіру өндірісінде тиімді, себебі жылу және масса алмасу, ылғалдың қозғалысы мен қамыр



құрылымының өзгеруі айқын сызықтық емес, тұрақсыз және формалды сипаттауға қиын үдерістер болып табылады.

Негізгі архитектура ретінде өнеркәсіптік автоматтандыру міндеттерінде кеңінен қолданылатын көпқабатты перцептрон (Multilayer Perceptron, MLP) таңдалды. Бұл модель оқыту тұрақтылығымен, есептеу тиімділігімен және жүйенің кіріс пен шығыс параметрлері арасындағы күрделі сызықтық емес тәуелділіктерді жуықтай алу қабілетімен ерекшеленеді [13].

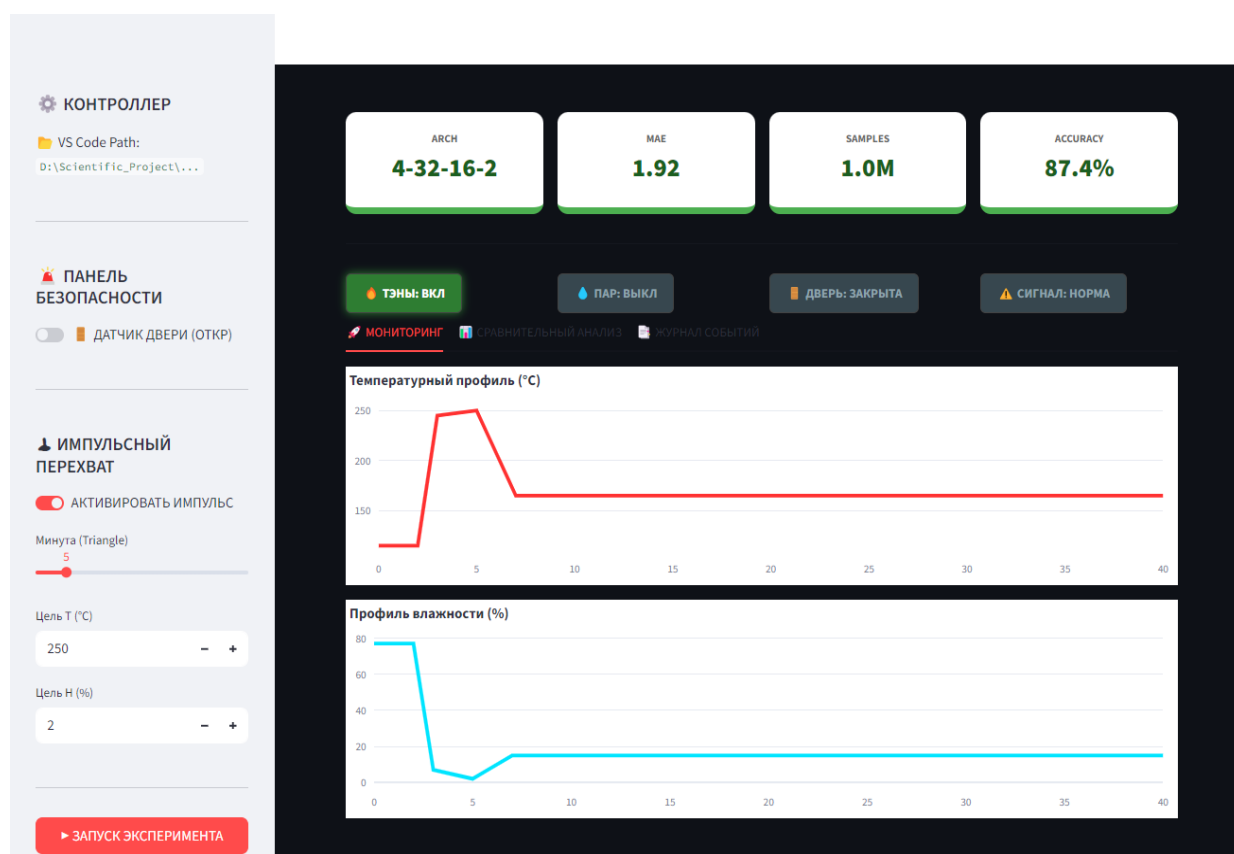
Нейрондық контроллердің шығыс параметрлері ретінде жылу электр қыздырғыш (ЭҚ) пен буландырғышқа берілетін басқарушы сигналдар алынды. Басқарушы әсерлер бинарлық сипатқа ие болды: «0» мәні атқарушы механизмнің өшірілген күйін, ал «1» мәні қосылған күйін білдіреді. Сынақ деректер массивін генерациялау және технологиялық үдерістің имитациялық моделін жүзеге асыру үшін Python бағдарламалау тілі қолданылды. Синтетикалық деректер пісіру үдерісінің үш технологиялық тәртібі үшін белгіленген температура, ылғалдылық және уақыт диапазондары шегінде қалыптастырылды. Генерациялау кезінде әрбір технологиялық кезең үшін мақалада қабылданған температуралық-ылғалдылық шектері сақталды.

Нәтижелер мен талқылау.

Гибридті нейро-анық емес басқару жүйесінің сандық егізін бағдарламалық жүзеге асыру.

Өнеркәсіптік нан пешінің гибридті нейро-анық емес басқару жүйесіне негізделген әзірленген сандық егізі Python бағдарламалау тілінде жүзеге асырылды. Жасалған бағдарламалық кешен нейрондық желілік болжау блогын, анық емес реттегішті және технологиялық параметрлерді бақылау жүйесін бірыңғай зияткерлік басқару платформасына біріктіреді. Жүйенің функционалдық құрылымы кіріс деректерін жинау мен өңдеуді, технологиялық ортаның күйін болжауды, басқарушы әсерлерді қалыптастыруды, пісіру параметрлерін нақты уақыт тәртібінде бақылауды қамтиды. Нейрондық желі моделі үрдістің ағымдағы күйін талдау мен жұмыс тәртіптерінің оңтайлы нұсқаларын болжау үшін пайдаланылады, ал анық емес контроллер сараптамалық ережелер мен температура және ылғалдылықтың ағымдағы мәндері негізінде, жедел шешім қабылдауды жүзеге асырады. Жүйенің бағдарламалық интерфейсі технологиялық үрдістің негізгі параметрлерін, атқарушы механизмдердің күйін, есептеу нәтижелерін және зияткерлік контроллердің жұмысын көрнекті түрде көрсетуге мүмкіндік береді. Соның арқасында оператор сандық егіздің жұмысын бақылып, параметрлердің өзгерту динамикасын талдай алады және жабдықтың жұмыс тәртіптерін дер кезінде түзете алады. Интерактивті басқару ортасы технологиялық үрдістің ашықтығын арттырып, оператор жіберетін қателер ықтималдығын төмендетеді және автоматты реттеу жүйесінің жалпы тиімділігін көтереді. Сандық егіздің жұмысын және модель параметрлерін нақты уақыт тәртібінде визуализациялау 1-суретте көрсетілген.

Бағдарламалық интерфейстің жоғарғы бөлігінде оқытылған нейрондық желі моделінің негізгі сипаттамалары көрсетіледі. Олардың қатарында желінің 4-32-16-2 архитектурасы, орташа абсолюттік қате мәне ($MAE=1,92$), оқыту іріктемесінің көлемі (1,0 млн бақылау) және аппроксимация дәлдігі (87,4%) берілген. Бұл көрсеткіштер модельді оқыту сапасын бағалауға және оның технологиялық үрдісін зияткерлік басқару міндеттерін шешуге қаншалықты жарамды екенін анықтауға мүмкіндік береді. Интерфейстің орталық бөлігі пісірудің негізгі параметрлерінің өзгерту динамикасын көрсетуге арналған. Мұнда толық технологиялық цикл бойындағы пісіру камерасындағы температура мен ылғалдылық деңгейінің өзгерту графиктері бейнеленген. Өтпелі үрдістің осындай көрнекті көрсетілімі операторға жүйенің ағымдағы жағдайын бақылауға, басқарушы әсерлердің дұрыс қалыптасуын талдауға және белгіленгін тәртіптен ауытқуларды дер кезінде анықтауға мүмкіндік береді.



1 сурет - Гибридті жүйенің сандық егізі бағдарламалық кешенінің интерфейсі

Интерфейстің сол жағында, тәжірибе параметрлерін орнатуға және қауіпсіздік жүйесінің күйін бақылауға арналған басқару панелі орналасқан. Пайдаланушы қажетті температура мен ылғалдықтың мақсатты мәндерін енгізе алады, импульстік қыздыру тәртібін іске қосады және технологиялық циклді моделдеу үрдісін бастайды. Зияткерлік жүйенің тиімділігі



мониторинг графиктерінде көрсетілген өтпелі үрдістің сипатынан айқын көрінеді. Уақыттың 0-5 минут аралығында «Импульстік ұстап қалу» модулі жұмыс істейді. Бастапқы температура 110°C олған кезде, оператор 250°C мақсатты мәнін орнатады, содан кейін жүйе автоматты түрде қарқынды қыздыру тәртібіне көшеді. Бұл кезеңде жылу электр қыздырғыш элементтерге максималды қуат беріледі, соның нәтижесінде температура жылдам жоғарылайды. Шекті мәнге жеткеннен кейін басқару гибриді контроллерге беріледі, соның нәтижесінде температура жылдам жоғарылайды. Шекті мәнге жеткеннен кейін, басқару гибридке беріледі. Температура графигінде, жылдам қыздыру кезеңінен тұрақтандыру сатысына өту байқалады. Нейрондық болжаушы пештің жылулық инерциясын ескере отырып, қыздырғыш элементтердің қуатын алдын-ала төмендетеді, ал анық емес реттегіш температураның артық ауытқусыз қажетті деңгейге бірқалыпты жетуін қамтамасыз етеді.

Алынған нәтижелер импульстік әрекет ету модулі, нейрондық болжаушы және анық емес түзеткіш бірге қолданылу жүйенің жұмыс тәртібіне шығу уақытын едәуір қысқартып, температура мен ылғалдылық параметрлерін жоғарғы дәлдікпен ұстап тұруға мүмкіндік беретінін көрсетті. Әзірленген бағдарламалық кешен басқарудың әртүрлі стратегиясын талдауға, реттеу алгоритмдерінің тиімділігін бағалауға және зияткерлік жүйенің параметрлерін нақты өндіріске араласпай-ақ сандық егіздің виртуалды ортасында баптауға мүмкіндік береді. СЕ нақты өндірістік жағдайда енгізу кезінде, талдау мүмкіндіктерін кеңейту мақсатында бағдарламалық кешкенде, технологиялық үрдісті басқару алгоритмдерін салыстырмалы бағалауға арналған арнайы модуль жүзеге асырылған. Бұл модуль классикалық PID-реттегішті, анық емес контроллерді және нейрондық болжаушысы бар әзірленген гибриді басқару жүйесін қоса алғанда, әртүрлі реттеу әдістерінің сипаттамаларын өзара салыстыруға мүмкіндік береді.

Интерфейсте салыстырылатын модельдердің негізгі параметрлері көрсетіледі: басқару алгоритмінің түрі, болжау қателігінің шамасы, технологиялық параметрлерді ұстап тұру дәлдігі және өтпелі үрдістің сипаты. Бұл пісірудің камерасындағы температуралық-ылғалдылық тәртіпті басқарудың әртүрлі тәсілдерінің тиімділігін көрнекті түрде талдауға және ең тиімді реттеу стратегиясын негіздеуге мүмкіндік береді.

Қорытынды.

Бұл жұмыста нан-тоқаш өнімдерінің сапа тұрақтылығын арттыруға арналған гибриді-анық емес зияткерлік басқару жүйесіне негізделген өнеркәсіптік нан пісіру пешінің сандық егізі әзірленіп, зерттелді. Ұсынылған архитектура пісіру камерасындағы температуралық-ылғалдылық тәртіпті реттеу және жылу мен масса алмасудың күрделі үрдістерін моделдеу үшін анық емес логика мен машиналық оқыту әдістерін біріктіреді. Зерттеу барысында көлемі 10^6 бақылаудан тұратын ауқымды деректер жиынтығы



қалыптастырылып, нейрондық желі моделін оқыту мен сынақтан өткізу үшін пайдаланылады. Нәтижесінде, 4-32-16-2 архитектуралы көпқабатты перцептронның болжау дәлдігі жоғары екені анықталды: детерминация коэффициенті $R^2=0,87$, ал орташа абсолюттік қате $MAE=1,92$ болды. Модельдеудің нәтижелері гибридті басқару жүйесін қолдану технологиялық үрдістің тұрақтылығын арттыратынын, параметрлердің рұқсат етілген шектерде болу уақытын 92,4%- ға дейін көбейтетінін және базалық анық емес реттегішпен салыстырғанда, атқарушы механизмдерге түсетін жүктемені азайтатынын көрсетеді. Әзірленген бағдарламалық кешен қолданыстағы нан пісіру өндірістерін жаңғыртуда және Industry 4.0 тұжырымдамасы аясында зияткерлік басқару жүйелерін одан әрі енгізуде тиімді қолданылуы мүмкін. Зерттеудің келесі кезеңінде әзірленген басқару алгоритмдерінің энергетикалық тиімділігін бағалау және электр энергиясын тұтыну көрсеткіштерін салыстырмалы талдау жоспарланады.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Dankar F. K., Ibrahim M. Fake it till you make it: Guidelines for effective synthetic data generation //Applied Sciences. – 2021. – Т. 11. – №. 5. – С. 2158.
2. Suchintita Das R., Tiwari B. K., Garcia-Vaquero M. The fundamentals of bread making: The science of bread //Traditional European breads: An illustrative compendium of ancestral knowledge and cultural heritage. – Cham: Springer International Publishing, 2023. – С. 1-40.
3. Cappelli A., Bettaccini L., Cini E. The kneading process: A systematic review of the effects on dough rheology and resulting bread characteristics, including improvement strategies //Trends in Food Science & Technology. – 2020. – Т. 104. – С. 91-101.
4. Feng Y. et al. Dynamic changes in glutenin macropolymer during different dough mixing and resting processes //Molecules. – 2021. – Т. 26. – №. 3. – С. 541.
5. Vidal L. M. et al. Micro-scale shear kneading—gluten network development under multiple stress–relaxation steps and evaluation via multiwave rheology //Polymers. – 2022. – Т. 14. – №. 4. – С. 846.
6. Issabekova L. et al. Temperature and Humidity Control System Based on Baking Ovens Using Fuzzy Logic //2023 IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST). – IEEE, 2023. – С. 573-578.
7. Абалдова С.Ю. Разработка нечеткой экспертной системы оценки управления качеством машиностроительного предприятия // Междунар. научн.-практ. конф. «Инновационное развитие экономики России: ключевые проблемы и решения» - Иваново: ГОУВПО Ивановский государственный химико-технологический университет, 2010. - С. 225-221
8. Valentine D. T., Hahn B. H. Essential MATLAB for engineers and scientists. – Academic Press, 2022.



9. Attaway D. C. Matlab: a practical introduction to programming and problem solving. – Butterworth-Heinemann, 2022.

10. Costa L. et al. Multilayer perception//Introduction to Computational Intelligence. – 2023. – T. 105.

REFERENCES

1. Dankar F. K., Ibrahim M. Fake it till you make it: Guidelines for effective synthetic data generation /Applied Sciences. – 2021. – T. 11. – №. 5. – S. 2158.

2. Suchintita Das R., Tiwari B. K., Garcia-Vaquero M. The fundamentals of bread making: The science of bread //Traditional European breads: An illustrative compendium of ancestral knowledge and cultural heritage. – Cham: Springer International Publishing, 2023. – S. 1-40.

3. Cappelli A., Bettaccini L., Cini E. The kneading process: A systematic review of the effects on dough rheology and resulting bread characteristics, including improvement strategies //Trends in Food Science & Technology. – 2020. – T. 104. – S. 91-101.

4. Feng Y. et al. Dynamic changes in glutenin macropolymer during different dough mixing and resting processes /Molecules. – 2021. – T. 26. – №. 3. – S. 541.

5. Vidal L. M. et al. Micro-scale shear kneading—gluten network development under multiple stress–relaxation steps and evaluation via multiwave rheology //Polymers. – 2022. – T. 14. – №. 4. – S. 846.

6. Issabekova L. et al. Temperature and Humidity Control System Based on Baking Ovens Using Fuzzy Logic //2023 IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST). – IEEE, 2023. – S. 573-578.

7. Abaldova S.Ju. Razrabotka nechetkoj jekspertnoj sistemy ocenki upravlenija kachestvom mashinostroitel'nogo predpriyatija // Mezhdunar. nauchn.-prakt. konf. «Innovacionnoe razvitie jekonomiki Rossii: kljuhevye problemy i reshenija» - Ivanovo: GOUVPO Ivanovskij gosudarstvennyj himiko-tehnologicheskij universitet, 2010. - S. 225-221

8. Valentine D. T., Hahn B. H. Essential MATLAB for engineers and scientists. – Academic Press, 2022.

9. Attaway D. C. Matlab: a practical introduction to programming and problem solving. – Butterworth-Heinemann, 2022.

10. Costa L. et al. Multilayer perception//Introduction to Computational Intelligence. – 2023. – T. 105.



Irbulat Utepbergenov, doctor of technical sciences, professor, Energo University, Almaty, Kazakhstan

Lyazzat Issabekova, doctoral student, Farabi University, Almaty, Kazakhstan, issabekova.lyazzatt@gmail.com

Shara Toybayeva, PhD, associate professor, Energo University, Almaty, Kazakhstan, sh.toibaeva@au.es.kz

DEVELOPMENT OF A DIGITAL TWIN OF AN INDUSTRIAL BAKERY OVEN BASED ON A HYBRID NEURO-FUZZY CONTROL SYSTEM

Abstract. The article considers the issue of increasing the efficiency of bread oven control in the context of digitalization of industrial production and the introduction of intelligent control technologies. Such technological solutions are relevant not only for industrial enterprises but also for the digital transformation of logistical support systems, including food production logistics within military infrastructure. The aim of the study is to develop a digital twin of a bread-baking oven based on an intelligent control system that ensures temperature stability and enhances the quality of the finished product. The proposed model integrates methods for predicting technological states with adaptive regulation of process parameters, while accounting for industrial constraints and expert knowledge. A decision-making system is established to enable real-time adjustment of equipment operating modes based on the analysis of large volumes of industrial data. The simulation results demonstrated increased control accuracy, reduced fluctuations in technological parameters, and improved stability of furnace operations. The proposed approach is based on combining fuzzy logic with a multilayer perceptron (MLP). A synthetic dataset was generated using the simulation model to train and test the neural network. The results showed a coefficient of determination (R^2) of 0.87 and a mean absolute error (MAE) of 1.92 for the multilayer perceptron with a 4-32-16-2 architecture. The simulation results indicated the potential to increase the time during which technological parameters remain within permissible limits to 92.4%.

Keywords: digital twin, baking oven, intelligent control, automation, neural network modeling, temperature behavior, machine learning.

Ирбулат Утепбергенов, д.т.н., профессор, Energo University, Алматы, Казахстан

Ляззат Исабекова, докторант, Farabi University, Алматы, Казахстан, issabekova.lyazzatt@gmail.com

Шара Тойбаева, PhD, ассоциированный профессор, Energo University, Алматы, Казахстан, sh.toibaeva@au.es.kz



РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ПРОМЫШЛЕННОЙ ХЛЕБОПЕКАРНОЙ ПЕЧИ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНОЙ НЕЙРО- НЕЧЕТКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Аннотация. В статье рассматривается проблема повышения эффективности управления хлебопекарной печью в контексте цифровизации промышленного производства и внедрения интеллектуальных технологий управления. Такие технологические решения актуальны не только для промышленных предприятий, но и для цифровой трансформации систем логистического обеспечения, включая логистику пищевой промышленности в военной инфраструктуре. Цель исследования – разработка цифрового двойника хлебопекарной печи на основе интеллектуальной системы управления, обеспечивающей стабильность температурного режима и повышающей качество готовой продукции. Предложенная модель сочетает в себе методы прогнозирования технологических состояний и адаптивного регулирования параметров процесса с учетом промышленных ограничений и экспертных знаний. Созданная система принятия решений позволяет корректировать режимы работы оборудования в режиме реального времени на основе анализа большого объема промышленных данных. Результаты моделирования показали повышение точности управления, снижение колебаний технологических параметров и улучшение стабильности работы печи. Предложенный подход основан на комбинации нечеткой логики и многослойного персептрона (MLP). На основе модели моделирования был сформирован синтетический набор данных, а нейронная сеть была обучена и протестирована. В результате коэффициент детерминации для многослойного персептрона с архитектурой 4-32-16-2 составил $R^2 = 0,87$, а средняя абсолютная ошибка $MAE = 1,92$. Результаты моделирования показали возможность увеличения времени поддержания технологических параметров в допустимых пределах до 92,4%.

Ключевые слова: цифровой двойник, печь для выпечки, интеллектуальное управление, автоматизация, моделирование нейронных сетей, температурный режим, машинное обучение.

Қабылданған күні: 10 қыркүйек 2026 ж.

Рецензиядан өткен күні: 21 қыркүйек 2026 ж.

Мақұлданған күні: 23 қыркүйек 2026 ж.