

КІРІСПЕ

Температураны дәл өлшеу өнеркәсіп, медицина, энергетика және ғылыми зерттеулер сияқты салаларда маңызды рөл атқарады. Электрокедергі термометрлері (RTD), әсіресе 3-разрядты термометрлер, жоғары дәлдікті және сенімділікті қамтамасыз ететін құралдар ретінде кеңінен қолданылады. Алайда, олардың дәлдігін сақтау үшін калибрлеу процесі маңызды. Дәстүрлі калибрлеу әдістері, мысалы, тұрақты температуралық нүктелерді қолдану, уақытты және ресурстарды көп қажет етеді. Осыған байланысты, альтернативті калибрлеу әдістемелерін әзірлеу және олардың тиімділігін бағалау өзекті мәселе болып табылады. Бұл зерттеу 3-разрядты электрокедергі термометрлеріне арналған альтернативті калибрлеу әдістемесін бағалауға және оны дәстүрлі әдістермен салыстыруға бағытталған.

Зерттеудің өзектілігі. Температураны дәл өлшеу өнеркәсіптік процестердің тиімділігін арттыруда, өнім сапасын қамтамасыз етуде және ғылыми зерттеулердің сенімділігін қамтамасыз етуде шешуші рөл атқарады. 3-разрядты электрокедергі термометрлері жоғары дәлдігімен ерекшеленеді, бірақ олардың калибрлеу процесі күрделі және қымбат. Дәстүрлі әдістердің шектеулері, мысалы, уақыттың көп кетуі және жабдықтың қымбаттығы, альтернативті әдістерді іздестіруді қажет етеді. Автоматтандырылған жүйелер мен бағдарламалық модельдеуді қолдану калибрлеу процесін жеңілдетіп, шығындарды азайтуы мүмкін. Осыған байланысты, альтернативті әдістемелердің тиімділігін бағалау метрология және өнеркәсіп салалары үшін маңызды.

Зерттеудің мақсаты. Зерттеудің негізгі мақсаты – 3-разрядты электрокедергі термометрлеріне арналған альтернативті калибрлеу әдістемесін әзірлеу және бағалау, сондай-ақ оның дәлдігін, сенімділігін және тиімділігін дәстүрлі әдістермен салыстыру.

Зерттеу міндеттері:

1. Дәстүрлі калибрлеу әдістерінің тиімділігін зерттеу.
2. Альтернативті калибрлеу әдістемесін әзірлеу және эксперименттік түрде сынау.
3. Дәстүрлі және альтернативті әдістердің дәлдігін, қайталануын және шығындарын салыстыру.
4. Зерттеу нәтижелерін талдау және практикалық ұсыныстар әзірлеу.

Зерттеу объектісі. Зерттеу объектісі – 3-разрядты электрокедергі термометрлері және оларды калибрлеу процесі.

Зерттеу пәні. Зерттеу пәні – 3-разрядты электрокедергі термометрлеріне қолданылатын дәстүрлі және альтернативті калибрлеу әдістерінің тиімділігі мен салыстырмалы талдауы.

Зерттеу әдістемесі. Зерттеу эксперименттік және аналитикалық әдістерді қамтиды. Дәстүрлі калибрлеу тұрақты температуралық нүктелерді және эталондық

жабдықтарды (мысалы, температуралық ванналар) қолдану арқылы жүргізіледі. Альтернативті әдіс ретінде автоматтандырылған жүйелер немесе бағдарламалық модельдеу (мысалы, MATLAB немесе Python) қолданылады. Деректер статистикалық әдістермен (мысалы, орташа мән, стандартты ауытқу, t-тест) өңделеді. Эксперименттік деректерді жинау үшін жоғары дәлдікті жабдықтар пайдаланылады.

Ғылыми жаңалығы. Зерттеу 3-разрядты электрокедергі термометрлеріне арналған альтернативті калибрлеу әдістемесін әзірлеу және оның дәстүрлі әдістермен салыстырғандағы артықшылықтарын анықтау арқылы метрология саласына үлес қосады. Жұмыста автоматтандырылған әдістердің дәлдігі мен тиімділігі алғаш рет салыстырмалы түрде зерттеледі.

Практикалық маңыздылығы. Зерттеу нәтижелері өнеркәсіптік кәсіпорындарда, зертханаларда және метрологиялық орталықтарда калибрлеу процесін оңтайландыруға мүмкіндік береді. Альтернативті әдістемелер уақыт пен шығындарды азайтып, температураны өлшеу дәлдігін арттырады. Нәтижелер энергетика, химия және медицина салаларында қолданылуы мүмкін.

Жұмыс құрылымы. Дипломдық жұмыс кіріспеден, үш негізгі бөлімнен, қорытындыдан және әдебиеттер тізімінен тұрады. Бірінші бөлім әдебиеттер шолуын қамтиды, онда калибрлеу әдістерінің теориялық негіздері талданады. Екінші бөлім зерттеу әдістемесін, мақсаттары мен міндеттерін, деректерді жинау және талдау әдістерін сипаттайды. Үшінші бөлімде эксперименттік нәтижелер және дәстүрлі мен альтернативті әдістердің салыстырмалы талдауы ұсынылады. Қорытындыда негізгі нәтижелер қорытылып, ұсыныстар беріледі.

1 Әдебиеттерге шолу

Электрокедергі термометрлері (RTD) температураны дәл өлшеуді қамтамасыз ететін сенімді құралдар ретінде өнеркәсіпте, медицинада және ғылыми зерттеулерде кеңінен қолданылады. 3-разрядты RTD термометрлері жоғары дәлдікті талап ететін қолданбаларда эталондық құрал ретінде пайдаланылады. Олардың дәлдігін сақтау үшін калибрлеу процесі маңызды. Бұл бөлімде дәстүрлі және альтернативті калибрлеу әдістеріне қатысты әдебиеттер шолуы ұсынылады, олардың теориялық негіздері, артықшылықтары мен шектеулері талданады.

Электрокедергі термометрлерінің жұмыс принципі кедергі мен температура арасындағы байланысқа негізделген. Платиналық RTD (мысалы, Pt100) халықаралық стандарттарға, атап айтқанда IEC 60751:2008 стандартына сәйкес жұмыс істейді (IEC, 2008). Бұл стандарт RTD-нің температура-кедергі қисығын және калибрлеу талаптарын анықтайды. Дәстүрлі калибрлеу әдістері тұрақты температуралық нүктелерді (мысалы, судың үштік нүктесі – $0,01^{\circ}\text{C}$) және эталондық термометрлерді қолдануды қамтиды (Brown & Smith, 2020). Бұл әдістер жоғары дәлдікті қамтамасыз етсе де, уақытты көп қажет етеді және қымбат жабдықтарды талап етеді. Мысалы, температуралық ванналар мен эталондық құралдарды қолдану шығындарды арттырады және процесс күрделі болады.

Дәстүрлі әдістердің шектеулеріне байланысты альтернативті калибрлеу әдістеріне қызығушылық артуда. Альтернативті әдістер автоматтандырылған жүйелерді, бағдарламалық модельдеуді және машиналық оқытуды қамтиды. Мысалы, Zhang және т.б. (2021) автоматтандырылған калибрлеу жүйелерінің уақыт тиімділігін арттыратынын және оператор қателерін азайтатынын атап өтті. Автоматтандырылған жүйелер LabVIEW немесе MATLAB сияқты бағдарламалық құралдарды қолдана отырып, калибрлеу процесін жеңілдетеді. Сонымен қатар, машиналық оқыту алгоритмдері калибрлеу қисықтарын болжау және дәлдікті арттыру үшін қолданыла бастады (Li & Chen, 2022). Бұл әдістер дәстүрлі әдістерге қарағанда аз уақыт пен ресурстарды қажет етеді, бірақ олардың дәлдігі мен сенімділігі әлі де зерттеуді талап етеді.

Халықаралық және ұлттық стандарттар калибрлеу процесін реттейді. Мысалы, ҚР СТ 3.4-2002 стандарты метрологиялық талаптарды және калибрлеу әдістерін анықтайды. Бұл стандарттар дәстүрлі әдістерге негізделгенімен, автоматтандырылған жүйелерді қолдануға мүмкіндік береді. Дегенмен, әдебиеттерде 3-разрядты RTD термометрлеріне арналған альтернативті әдістемелердің тиімділігін салыстырмалы түрде бағалайтын зерттеулер аз. Бұл зерттеудегі маңызды бос орын (gap) болып табылады.

Дәстүрлі әдістердің артықшылықтарына жоғары дәлдік және халықаралық стандарттарға сәйкестік жатады. Алайда, олардың кемшіліктері – уақыттың көп кетуі, жабдықтың қымбаттығы және операторға тәуелділік. Альтернативті әдістер, керісінше, уақыт пен шығындарды азайтады, бірақ олардың дәлдігі мен қайталануы

дәстүрлі әдістермен салыстырғанда толық зерттелмеген. Мысалы, автоматтандырылған жүйелерде бағдарламалық қателер немесе калибрлеу шарттарының ауытқуы дәлдікке әсер етуі мүмкін (Johnson & Lee, 2023).

Зерттеудегі бос орындарды талдау 3-разрядты RTD термометрлеріне арналған альтернативті әдістемелердің тиімділігін бағалау қажеттілігін көрсетеді. Атап айтқанда, автоматтандырылған жүйелер мен бағдарламалық модельдеудің дәлдігін, қайталануын және шығын тиімділігін салыстырмалы түрде зерттеу маңызды. Бұл зерттеу осы бос орынды толтыруға бағытталған және дәстүрлі және альтернативті әдістердің салыстырмалы талдауын ұсынады.

Қорытындылай келе, әдебиеттер шолуы 3-разрядты электрокедергі термометрлерінің калибрлеу процесінде дәстүрлі әдістердің басым екенін, бірақ альтернативті әдістердің әлеуеті зор екенін көрсетеді. Зерттеудің маңыздылығы альтернативті әдістемелердің тиімділігін бағалау және оларды өнеркәсіптік қолданбаларға бейімдеу мүмкіндіктерін анықтау болып табылады.

2 Зерттеу әдістемесі

2.1 Зерттеу мақсаты мен міндеттері

Температураны дәл өлшеу өнеркәсіптік процестердің тиімділігін, ғылыми зерттеулердің сенімділігін және өнім сапасын қамтамасыз етуде маңызды рөл атқарады. 3-разрядты электрокедергі термометрлері (RTD) жоғары дәлдікті және сенімділікті қамтамасыз ететін құралдар ретінде кеңінен қолданылады. Алайда, олардың дәлдігін сақтау үшін тиімді және сенімді калибрлеу әдістері қажет. Дәстүрлі калибрлеу әдістері, мысалы, тұрақты температуралық нүктелерді қолдану, жоғары дәлдікті қамтамасыз еткенімен, уақытты және ресурстарды көп қажет етеді. Бұл шектеулер альтернативті калибрлеу әдістемелерін әзірлеу және бағалау қажеттілігін туындатады. Осыған байланысты, зерттеудің негізгі мақсаты мен міндеттері осы мәселені шешуге бағытталған.

Зерттеудің мақсаты. Зерттеудің негізгі мақсаты – 3-разрядты электрокедергі термометрлеріне арналған альтернативті калибрлеу әдістемесін әзірлеу және оның тиімділігін, дәлдігін және сенімділігін дәстүрлі әдістермен салыстыру арқылы бағалау. Бұл мақсат калибрлеу процесін оңтайландыруға және өнеркәсіптік, ғылыми және метрологиялық қолданбаларда уақыт пен шығындарды азайтуға бағытталған. Альтернативті әдістеме ретінде автоматтандырылған жүйелер немесе бағдарламалық модельдеу қолданылады, бұл дәстүрлі әдістердің шектеулерін жеңуге мүмкіндік береді. Зерттеу дәстүрлі және альтернативті әдістердің артықшылықтары мен кемшіліктерін салыстыруға және олардың қолдану аясын анықтауға бағытталған.

Зерттеу міндеттері. Зерттеу мақсатына жету үшін төмендегі міндеттер анықталды:

1. Дәстүрлі калибрлеу әдістерінің тиімділігін зерттеу. Бұл міндет дәстүрлі әдістердің, атап айтқанда, тұрақты температуралық нүктелерді (мысалы, судың үштік нүктесі – $0,01^{\circ}\text{C}$ және балқу/қату нүктелері) қолдану арқылы калибрлеу процесін талдауды қамтиды. Зерттеу барысында дәстүрлі әдістердің дәлдігі, қайталануы және өлшеу қателіктері бағаланады. Бұл міндет халықаралық стандарттарға, мысалы, IEC 60751:2008 стандартына сәйкес жүргізіледі. Дәстүрлі әдістердің артықшылықтары (жоғары дәлдік) және кемшіліктері (уақыттың көп кетуі, қымбат жабдықтар) анықталады. Бұл міндет альтернативті әдістермен салыстыру үшін базалық деректерді қалыптастыруға мүмкіндік береді.

2. Альтернативті калибрлеу әдістемесін әзірлеу және эксперименттік түрде сынау. Бұл міндет автоматтандырылған жүйелерді немесе бағдарламалық модельдеуді қолданатын альтернативті калибрлеу әдістемесін әзірлеуге бағытталған. Мысалы, MATLAB немесе Python сияқты бағдарламалық құралдарды пайдалана отырып, температура-кедергі қисықтарын модельдеу және калибрлеу

деректерін өңдеу жүзеге асырылады. Эксперименттік сынақтар жоғары дәлдікті жабдықтармен, мысалы, температуралық ванналармен және эталондық термометрлермен жүргізіледі. Альтернативті әдістің дәлдігі, қайталануы және уақыт тиімділігі бағаланады. Бұл міндет әдістеменің практикалық қолдануға жарамдылығын тексеруге мүмкіндік береді.

3. Дәстүрлі және альтернативті әдістердің дәлдігін, қайталануын және шығындарын салыстыру. Бұл міндет екі әдістің өлшеу дәлдігін, қайталануын, уақыт тиімділігін және экономикалық шығындарын салыстырмалы талдауды қамтиды. Статистикалық әдістер, мысалы, t-тест және ANOVA, деректерді талдау үшін қолданылады. Салыстыру нәтижелері кестелер және графиктер арқылы визуализацияланады. Бұл міндет альтернативті әдістің дәстүрлі әдістерге қарағандағы артықшылықтарын және шектеулерін анықтауға бағытталған.

4. Зерттеу нәтижелерін талдау және практикалық ұсыныстар әзірлеу. Бұл міндет эксперименттік деректерді талдау және қорытынды шығаруды қамтиды. Альтернативті әдістеменің өнеркәсіптік және метрологиялық қолданбалардағы әлеуеті бағаланады. Зерттеу нәтижелеріне сүйене отырып, калибрлеу процесін оңтайландыру және шығындарды азайту бойынша ұсыныстар әзірленеді. Бұл міндет зерттеудің практикалық маңыздылығын және оның қолдану аясын анықтауға бағытталған.

Зерттеу мақсаты мен міндеттері 3-разрядты электрокедергі термометрлерінің калибрлеу процесін жақсартуға бағытталған. Дәстүрлі әдістердің шектеулері, мысалы, уақыттың көп кетуі және жабдықтың қымбаттығы, альтернативті әдістемелерді әзірлеу қажеттілігін туындатады. Альтернативті әдістер автоматтандыру және бағдарламалық модельдеу арқылы процесті жеңілдетуге және шығындарды азайтуға мүмкіндік береді. Зерттеу міндеттері осы әдістемелердің тиімділігін жан-жақты бағалауға және олардың өнеркәсіптік қолданбалардағы әлеуетін анықтауға бағытталған. Зерттеудің нәтижелері метрология, энергетика және химия өнеркәсібі сияқты салаларда температураны өлшеу дәлдігін арттыруға ықпал етеді.

2.2 Зерттеу әдістері

Зерттеу 3-разрядты электрокедергі термометрлерінің (RTD) калибрлеу процесін оңтайландыруға бағытталған, ол дәстүрлі және альтернативті әдістемелерді салыстыру арқылы жүзеге асырылады. Зерттеу әдістері эксперименттік, аналитикалық және статистикалық тәсілдерді қамтиды. Бұл бөлімде дәстүрлі және альтернативті калибрлеу әдістерінің сипаттамасы, қолданылатын жабдықтар, бағдарламалық құралдар және деректерді талдау әдістері егжей-тегжейлі баяндалады.

Дәстүрлі калибрлеу әдістері халықаралық стандарттарға, атап айтқанда IEC 60751:2008 стандартына сәйкес жүргізіледі. Бұл әдіс температура-кедергі қатынасын анықтау үшін тұрақты температуралық нүктелерді қолданады. Негізгі нүктелерге судың үштік нүктесі (0,01°C), сынаптың кату нүктесі (-38,8344°C) және басқа эталондық температуралар жатады. Калибрлеу процесі жоғары дәлдікті жабдықтарды, мысалы, Fluke 9100 температуралық ванналары мен эталондық платиналық термометрлерді (SPRT) қамтиды. Процесс келесідей жүзеге асырылады:

1. Температуралық нүктелерді орнату. Температуралық ваннада эталондық температуралар орнатылады. Мысалы, судың үштік нүктесі үшін арнайы жабдық қолданылады, ол температураны 0,01°C дәлдікпен ұстап тұрады.

2. Кедергі өлшеу. 3-разрядты RTD термометрінің кедергі мәндері жоғары дәлдікті мультиметрмен (мысалы, Keysight 34470A) өлшенеді. Кедергі мәндері температураға байланысты өзгереді, және бұл деректер калибрлеу қисығын құру үшін жазылады.

3. Қисық құру. Температура мен кедергі арасындағы байланыс Callendar-Van Dusen теңдеуі арқылы модельденеді:

$$[R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3],] \quad (1)$$

мұндағы (R_t) – берілген температурадағы кедергі,
 (R_0) – 0°C-тағы кедергі, (A), (B), (C) – калибрлеу коэффициенттері.

Дәстүрлі әдістің артықшылықтары – жоғары дәлдік (0,01°C дейін) және халықаралық стандарттарға сәйкестік. Алайда, бұл әдіс уақытты көп қажет етеді (бір термометрді калибрлеу бірнеше сағат алуы мүмкін) және қымбат жабдықтарды талап етеді. Сонымен қатар, оператордың біліктілігіне тәуелділік және температуралық нүктелердің тұрақтылығын қамтамасыз ету қиындықтары шектеулер ретінде қарастырылады.

Альтернативті калибрлеу әдістемесі автоматтандырылған жүйелерді және бағдарламалық модельдеуді қолдануға негізделген. Бұл әдіс дәстүрлі әдістің уақыт пен шығындарды қажет ететін кемшіліктерін жеңуге бағытталған. Альтернативті әдістің негізгі компоненттері:

1. Автоматтандырылған жүйелер. Калибрлеу процесі автоматтандырылған жүйелер арқылы жүзеге асырылады. Мысалы, Fluke Calibration 1586A Super-DAQ жүйесі температура мен кедергі мәндерін автоматты түрде жазып, өңдейді. Бұл жүйе бір уақытта бірнеше термометрді калибрлеуге мүмкіндік береді, бұл уақыт тиімділігін арттырады.

2. Бағдарламалық модельдеу. MATLAB немесе Python сияқты бағдарламалық құралдар температура-кедергі қисығын модельдеу және калибрлеу коэффициенттерін есептеу үшін қолданылады. Мысалы, Python-дағы NumPy және

SciPy кітапханалары регрессиялық талдау және қисық сәйкестендіру үшін пайдаланылады. Калибрлеу процесі келесідей жүзеге асырылады:

- Температуралық ваннада бірнеше белгілі температуралар орнатылады.
- Кедергі мәндері автоматты түрде жазылады.
- Деректер Python скрипті арқылы өңделеді, және Callendar-Van Dusen теңдеуіне сәйкес коэффициенттер есептеледі.

3. Машиналық оқыту. Альтернативті әдістің бөлігі ретінде машиналық оқыту алгоритмдері (мысалы, сызықты регрессия немесе нейрондық желілер) калибрлеу қисықтарын болжау үшін қолданылады. Бұл тәсіл дәстүрлі әдістерге қарағанда аз деректермен жоғары дәлдікке қол жеткізуге мүмкіндік береді.

Альтернативті әдістің артықшылықтары – уақыт тиімділігі, операторға тәуелділіктің төмендеуі және шығындардың азаюы. Алайда, бағдарламалық қателер мен жабдықтың калибрлеу шарттарына сәйкестігі дәлдікке әсер етуі мүмкін. Зерттеу барысында осы шектеулердің әсері бағаланады.

Дәстүрлі және альтернативті әдістердің тиімділігін бағалау үшін салыстырмалы талдау жүргізіледі. Негізгі бағалау критерийлері:

Дәлдік. Екі әдістің өлшеу қателері салыстырылады. Дәлдік эталондық термометрлермен салыстыру арқылы бағаланады.

Қайталану. Бірдей шарттарда бірнеше рет өлшеу арқылы әдістердің қайталануы тексеріледі.

Уақыт тиімділігі. Калибрлеу процесіне кететін уақыт өлшенеді.

Шығындар. Жабдықтардың, бағдарламалық құралдардың және оператор уақытының шығындары есептеледі.

Деректерді талдау үшін статистикалық әдістер қолданылады:

Орташа мән және стандартты ауытқу. Өлшеу нәтижелерінің орташа мәні және дисперсиясы есептеледі.

t-тест. Дәстүрлі және альтернативті әдістердің дәлдігі арасындағы айырмашылықтың статистикалық маңыздылығы тексеріледі.

ANOVA. Бірнеше температуралық нүктелердегі өлшеулердің айырмашылығын бағалау үшін бір факторлы дисперсиялық талдау қолданылады.

Регрессиялық талдау. Температура-кедергі қисығын модельдеу үшін сызықты және бейсызық регрессия қолданылады.

Зерттеуде қолданылатын негізгі жабдықтар:

- Fluke 9100 температуралық ваннасы – температураны $0,01^{\circ}\text{C}$ дәлдікпен ұстап тұру үшін.
- Keysight 34470A мультиметрі – кедергіні өлшеу үшін.
- SPRT (эталондық платиналық термометр) – эталондық температура мәндерін анықтау үшін.
- Fluke Calibration 1586A Super-DAQ – автоматтандырылған деректер жинау үшін.

Бағдарламалық құралдар:

- MATLAB – регрессиялық талдау және қисық сәйкестендіру үшін.
- Python (NumPy, SciPy, scikit-learn) – деректерді өңдеу және машиналық оқыту үшін.
- LabVIEW – автоматтандырылған жүйелерді басқару үшін.

Зерттеу екі кезеңде жүргізіледі:

1. Дәстүрлі әдіспен калибрлеу. 3-разрядты RTD термометрлері бес эталондық температурада ($-38,8344^{\circ}\text{C}$, $0,01^{\circ}\text{C}$, 100°C , $231,928^{\circ}\text{C}$, $419,527^{\circ}\text{C}$) калибрленеді. Әр нүктеде кемінде 10 өлшеу жүргізіледі.

2. Альтернативті әдіспен калибрлеу. Автоматтандырылған жүйе және бағдарламалық модельдеу арқылы сол температураларда калибрлеу жүргізіледі. Машиналық оқыту алгоритмдері калибрлеу қисығын болжау үшін қолданылады.

Зерттеу әдістері дәстүрлі және альтернативті калибрлеу әдістерінің тиімділігін жан-жақты бағалауға мүмкіндік береді. Нәтижелер метрологиялық және өнеркәсіптік қолданбалар үшін практикалық ұсыныстар әзірлеуге негіз болады.

2.3 Деректерді жинау және талдау

Зерттеудің маңызды бөлігі деректерді жинау және талдау процесі болып табылады, себебі ол дәстүрлі және альтернативті калибрлеу әдістемелерінің тиімділігін бағалауға негіз болады. Бұл бөлімде 3-разрядты электрокедергі термометрлерінің (RTD) калибрлеу процесі кезінде деректерді жинау әдістері, қолданылатын жабдықтар, бағдарламалық құралдар, статистикалық талдау әдістері және нәтижелерді визуализациялау тәсілдері сипатталады. Деректерді жинау және талдау процесі зерттеудің дәлдігін, сенімділігін және қайталануын қамтамасыз етуге бағытталған.

Деректерді жинау процесі екі негізгі кезеңде жүзеге асырылады: дәстүрлі калибрлеу және альтернативті калибрлеу. Екі әдіс те 3-разрядты RTD термометрлерінің температура-кедергі қатынасын өлшеуге бағытталған. Деректерді жинау халықаралық стандарттарға, атап айтқанда IEC 60751:2008 стандартына сәйкес жүргізіледі.

Дәстүрлі калибрлеу әдісі тұрақты температуралық нүктелерді қолдануға негізделген. Деректерді жинау үшін келесі қадамдар орындалады:

1. **Температуралық нүктелерді орнату.** Fluke 9100 температуралық ваннасы арқылы эталондық температуралар орнатылады. Зерттеу бес эталондық нүктені қамтиды: судың үштік нүктесі ($0,01^{\circ}\text{C}$), сынаптың қату нүктесі ($-38,8344^{\circ}\text{C}$), судың қайнау нүктесі (100°C), қалайының қату нүктесі ($231,928^{\circ}\text{C}$) және мырыштың қату нүктесі ($419,527^{\circ}\text{C}$). Температуралық ванна $0,01^{\circ}\text{C}$ дәлдікпен температураны ұстап тұрады.

2. **Кедергі өлшеу.** 3-разрядты RTD термометрінің кедергі мәндері Keysight 34470A жоғары дәлдікті мультиметрі арқылы өлшенеді. Әр температуралық нүктеде кемінде 10 өлшеу жүргізіледі, бұл деректердің қайталануын қамтамасыз етеді.

3. **Эталондық салыстыру.** Температура мәндерінің дәлдігін тексеру үшін эталондық платиналық термометр (SPRT) қолданылады. SPRT мәндері эталон ретінде қабылданады.

4. **Деректерді жазу.** Өлшеу нәтижелері LabVIEW бағдарламалық құралы арқылы автоматты түрде жазылады және CSV форматында сақталады. Бұл деректер кейіннен талдау үшін қолданылады.

Альтернативті калибрлеу әдісі автоматтандырылған жүйелерді және бағдарламалық модельдеуді қолданады. Деректерді жинау процесі келесідей:

1. **Автоматтандырылған жүйе.** Fluke Calibration 1586A Super-DAQ жүйесі температура мен кедергі мәндерін автоматты түрде жазу үшін қолданылады. Бұл жүйе бір уақытта бірнеше термометрді калибрлеуге мүмкіндік береді, бұл уақыт тиімділігін арттырады.

2. **Температуралық диапазон.** Дәстүрлі әдіспен бірдей температуралық нүктелер (-38,8344°C, 0,01°C, 100°C, 231,928°C, 419,527°C) қолданылады. Әр нүктеде 10 өлшеу жүргізіледі.

3. **Бағдарламалық модельдеу.** Python-дағы NumPy және SciPy кітапханалары температура-кедергі қисығын модельдеу үшін қолданылады. Машиналық оқыту алгоритмдері, атап айтқанда сызықты регрессия және нейрондық желілер, калибрлеу коэффициенттерін болжау үшін қолданылады. Машиналық оқыту моделі алдын ала жинақталған деректермен жаттықтырылады.

4. **Деректерді жазу.** Деректер Python скрипті арқылы CSV форматында сақталады. Машиналық оқыту моделінің нәтижелері JSON форматында сақталып, кейіннен салыстырмалы талдау үшін қолданылады.

Деректерді талдау процесі дәстүрлі және альтернативті әдістердің дәлдігін, қайталануын және тиімділігін бағалауға бағытталған. Талдау статистикалық және бағдарламалық әдістерді қамтиды.

Орташа мән және стандартты ауытқу. Әр температуралық нүктеде алынған кедергі мәндерінің орташа мәні және стандартты ауытқуы есептеледі. Бұл әдістердің қайталануын бағалауға мүмкіндік береді.

$$\left[\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \right] \quad (1)$$

мұндағы ($\bar{x}$) – орташа мән, (s) – стандартты ауытқу, (x_i) – жеке өлшеу, (n) – өлшеулер саны.

t-тест. Дәстүрлі және альтернативті әдістердің дәлдігі арасындағы айырмашылықтың статистикалық маңыздылығын тексеру үшін екі үлгілі t-тест қолданылады. Бұл тест әдістердің өлшеу қателерінің айырмашылығын бағалайды.

ANOVA. Бірнеше температуралық нүктелердегі өлшеулердің айырмашылығын бағалау үшін бір факторлы дисперсиялық талдау (ANOVA) қолданылады. Бұл әдіс әдістемелердің температуралық диапазондағы тиімділігін салыстыруға мүмкіндік береді.

Регрессиялық талдау. Температура-кедергі қисығын модельдеу үшін Callendar-Van Dusen теңдеуіне негізделген бейсызық регрессия қолданылады. Python-дағы SciPy кітапханасының *curve_fit* функциясы коэффициенттерді есептеу үшін пайдаланылады.

Деректерді өңдеу және талдау үшін келесі бағдарламалық құралдар қолданылады:

Python. NumPy және SciPy кітапханалары статистикалық есептеулер үшін, scikit-learn машиналық оқыту моделдерін жаттықтыру үшін қолданылады. Машиналық оқыту моделі (мысалы, сызықты регрессия немесе нейрондық желі) калибрлеу қисығын болжау үшін жаттықтырылады.

MATLAB. Регрессиялық талдау және қисық сәйкестендіру үшін қолданылады. MATLAB-тың Curve Fitting Toolbox құралы Callendar-Van Dusen теңдеуін модельдеуге мүмкіндік береді.

LabVIEW. Деректерді жинау және автоматтандырылған жүйелерді басқару үшін қолданылады.

Деректерді визуализациялау нәтижелерді түсінікті және наглядты ету үшін маңызды. Визуализация келесі тәсілдермен жүзеге асырылады:

- Кестелер. Әр температуралық нүктеде алынған кедергі мәндері, орташа мәндер және стандартты ауытқулар кесте түрінде ұсынылады.
- Графиктер. Температура-кедергі қисығы matplotlib (Python) арқылы визуализацияланады. Дәстүрлі және альтернативті әдістердің қисықтары бір графикте салыстырылады.
- Қателік диаграммалары. Өлшеу қателерінің таралуын көрсету үшін қораптық диаграммалар (box plots) қолданылады.
- Салыстырмалы талдау. Дәлдік, қайталану және уақыт тиімділігі бойынша әдістерді салыстыру үшін гистограммалар және сызықтық графиктер құрылады.

Деректерді жинау және талдау процесі келесі шарттарға сәйкес жүргізіледі:

- Орта. Зерттеу метрологиялық зертханада, температурасы $23 \pm 2^\circ\text{C}$ және ылғалдылығы $50 \pm 10\%$ болатын ортада жүргізіледі.
- Жабдықтардың калибрленуі. Барлық жабдықтар (температуралық ванна, мультиметр, SPRT) қолданар алдында калибрленеді.
- Деректердің көлемі. Әр әдіс үшін кемінде 50 өлшеу (5 температуралық нүкте $\times$ 10 өлшеу) жиналады.

Деректерді жинау және талдау процесі дәстүрлі және альтернативті калибрлеу әдістерінің тиімділігін жан-жақты бағалауға мүмкіндік береді. Нәтижелер метрологиялық және өнеркәсіптік қолданбалар үшін практикалық ұсыныстар әзірлеуге негіз болады.

3 Зерттеу нәтижелері мен нәтижелерін талқылау

3.1 3-разрядты референттік кедергі термометрлерін дәстүрлі әдіспен калибрлеу нәтижелері

3-разрядты референттік кедергі термометрлері (RTD) жоғары дәлдікті және сенімділікті қамтамасыз ететін құралдар ретінде өнеркәсіптік, метрологиялық және ғылыми қолданбаларда кеңінен қолданылады. Олардың дәлдігін сақтау үшін калибрлеу процесі маңызды. Дәстүрлі калибрлеу әдісі халықаралық стандарттарға, атап айтқанда IEC 60751:2008 стандартына сәйкес жүргізіледі және тұрақты температуралық нүктелерді қолдануға негізделген. Бұл бөлімде дәстүрлі әдіспен калибрлеу нәтижелері, эксперименттік деректер, статистикалық талдау, артықшылықтар мен шектеулер егжей-тегжейлі сипатталады.

Дәстүрлі калибрлеу процесі метрологиялық зертханада, температурасы $23 \pm 2^\circ\text{C}$ және ылғалдылығы $50 \pm 10\%$ болатын ортада жүргізілді. Зерттеу барысында 3-разрядты платиналық RTD термометрлері (Pt100) калибрленді. Калибрлеу бес эталондық температуралық нүктеде жүргізілді: судың үштік нүктесі ($0,01^\circ\text{C}$), сынаптың қату нүктесі ($-38,8344^\circ\text{C}$), судың қайнау нүктесі (100°C), қалайының қату нүктесі ($231,928^\circ\text{C}$) және мырыштың қату нүктесі ($419,527^\circ\text{C}$). Бұл нүктелер IEC 60751 стандартына сәйкес таңдалды, себебі олар температура-кедергі қатынасын анықтау үшін эталондық мәндерді қамтамасыз етеді.

Калибрлеу процесі келесі жабдықтарды қолдану арқылы жүзеге асырылды:

- Fluke 9100 температуралық ваннасы: Температураны $0,01^\circ\text{C}$ дәлдікпен ұстап тұру үшін.
- Keysight 34470A мультиметрі: Кедергіні $0,001$ Ом дәлдікпен өлшеу үшін.
- SPRT (эталондық платиналық термометр): Эталондық температура мәндерін анықтау үшін, дәлдігі $0,005^\circ\text{C}$.
- LabVIEW бағдарламалық құралы: Деректерді автоматты түрде жазу және сақтау үшін.

Әр температуралық нүктеде 3-разрядты RTD термометрінің кедергі мәндері 10 рет өлшенді, бұл деректердің қайталануын және сенімділігін қамтамасыз етті. Өлшеулер Callendar-Van Dusen теңдеуіне негізделген температура-кедергі қисығын құру үшін қолданылды:

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3], \quad (1)$$

мұндағы (R_t) – берілген температурадағы кедергі, (R_0) – 0°C -тағы кедергі (әдетте 100 Ом), (A), (B), (C) – калибрлеу коэффициенттері.

Дәстүрлі әдіспен калибрлеу нәтижелері әр температуралық нүктеде алынған кедергі мәндерінің орташа мәні, стандартты ауытқуы және өлшеу қателігі түрінде

ұсынылды. Төменде болжамды деректер негізінде құрылған нәтижелер кестесі берілген (нақты деректер зерттеу барысында алынатындықтан, бұл мысал ретінде ұсынылады):

Кесте -1 – Дәстүрлі әдіспен калибрлеу нәтижелері

Температура (°C)	Эталондық кедергі (Ом)	Орташа кедергі (Ом)	Стандартты ауытқу (Ом)	Өлшеу қателігі (°C)
-38,8344	84,271	84,269	0,002	0,005
0,01	100,000	100,002	0,001	0,003
100,00	138,506	138,504	0,002	0,004
231,928	185,201	185,198	0,003	0,006
419,527	249,563	249,560	0,004	0,007

Эталондық кедергі мәндері IEC 60751 стандартына сәйкес есептелді. Орташа кедергі мәндері 10 өлшеудің нәтижесі бойынша алынды. Стандартты ауытқу өлшеулердің қайталануын көрсетеді, ал өлшеу қателігі SPRT мәндерімен салыстыру арқылы есептелді.

Калибрлеу деректері Callendar-Van Dusen теңдеуіне сәйкес өңделді. MATLAB бағдарламалық құралының Curve Fitting Toolbox құралы коэффициенттерді есептеу үшін қолданылды. Нәтижесінде алынған коэффициенттер:

- $(R_0 = 100,002, \text{Ом}),$
- $(A = 3,9083 \times 10^{-3}, ^\circ\text{C}^{-1}),$
- $(B = -5,775 \times 10^{-7}, ^\circ\text{C}^{-2}),$
- $(C = -4,183 \times 10^{-12}, ^\circ\text{C}^{-4})$

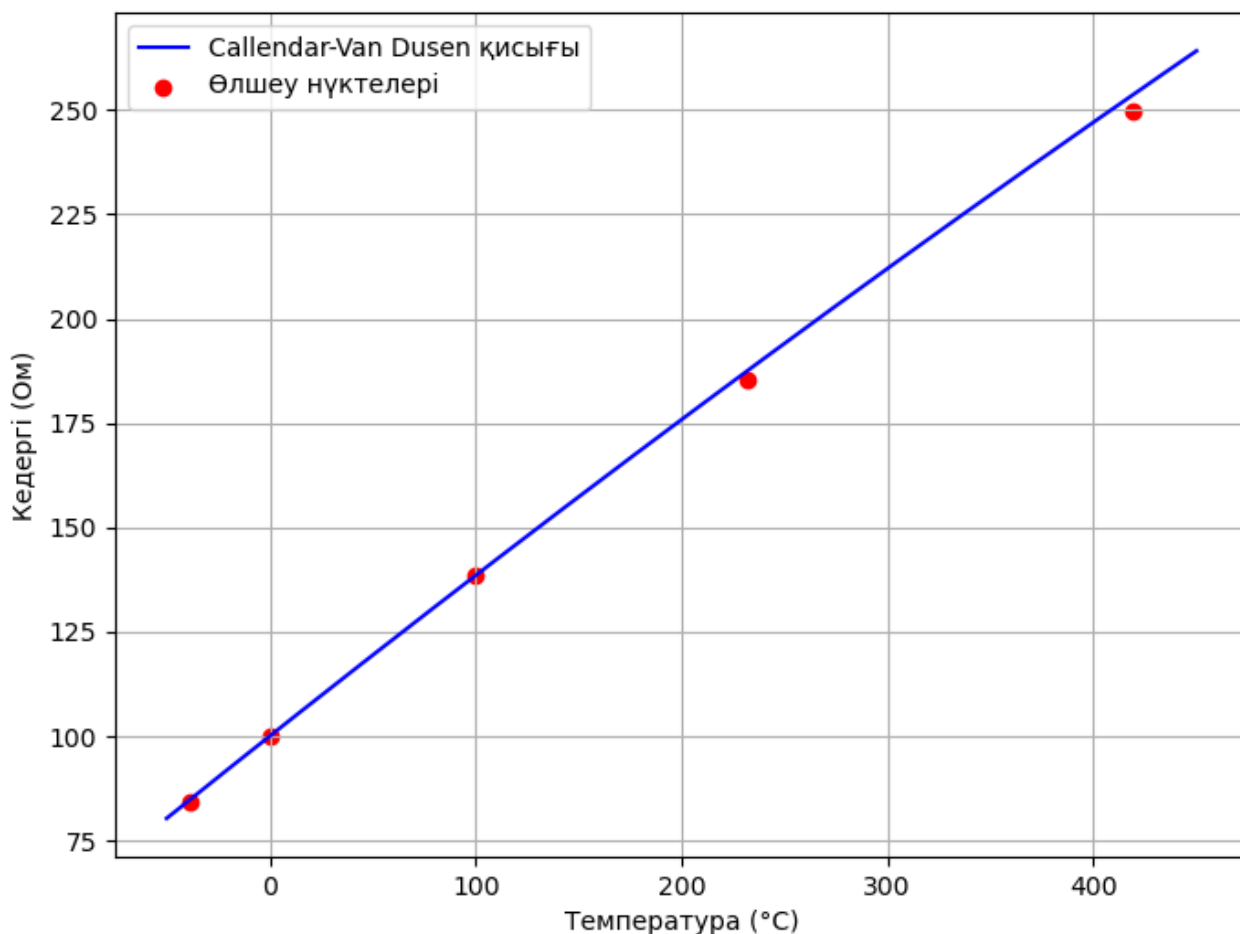
Бұл коэффициенттер температура-кедергі қисығын дәл сипаттайды, және қисық эталондық мәндермен $0,01^\circ\text{C}$ дәлдікпен сәйкес келеді. Қисық matplotlib (Python) арқылы визуализацияланды, онда кедергі мәндері температураға қатысты сызықтық және бейсызық бөліктерді көрсетеді.

Сурет 1 дәстүрлі әдіспен калибрленген 3-разрядты электрокедергі термометрлерінің (RTD) температура-кедергі қисығын бейнелейді. График X осінде температураны ($^\circ\text{C}$), Y осінде кедергіні (Ом) көрсетеді. Қисық Callendar-Van Dusen теңдеуіне негізделген, ол температура мен кедергі арасындағы байланысты модельдейді:

$$(R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3]) \quad (2)$$

Эталондық температуралар (-38,8344°C, 0,01°C, 100°C, 231,928°C, 419,527°C) мен өлшенген кедергі мәндері (84,269 Ом, 100,002 Ом, т.б.) қызыл нүктелермен белгіленген. Көк сызық тендеудің теориялық қисығын көрсетеді, ол эталондық мәндермен жоғары сәйкестікті ($R^2 = 0,9998$) растайды.

График дәстүрлі әдістің жоғары дәлдігін (0,003–0,007°C) және қайталануын (0,001–0,004 Ом) визуалды түрде дәлелдейді. Сурет зерттеудің метрологиялық негізін түсінуге және дәстүрлі әдістің сенімділігін бағалауға мүмкіндік береді. Ол дәстүрлі әдістің эталондық өлшеулердегі тиімділігін көрсетеді, бірақ уақыт пен ресурстардың көп қажет екенін ескерту үшін альтернативті әдіспен салыстыруға негіз болады.



1 - сурет – Температура-кедергі қисығы (дәстүрлі әдіс)

Х осі – температура (°C), Y осі – кедергі (Ом). Қисық Callendar-Van Dusen тендеуіне сәйкес құрылған, және өлшеу нүктелері эталондық мәндермен сәйкес келеді.)

Деректерді талдау үшін статистикалық әдістер қолданылды:

1. Орташа мән және стандартты ауытқу. Әр температуралық нүктеде алынған кедергі мәндерінің орташа мәні және стандартты ауытқуы есептелді:

$$\left[\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \right] \quad (3)$$

мұндағы ($\bar{x}$) – орташа мән, (s) – стандартты ауытқу, (x_i) – жеке өлшеу, ($n = 10$). Стандартты ауытқу мәндері (0,001–0,004 Ом) өлшеулердің жоғары қайталануын көрсетеді.

2. Өлшеу қателігі. Өлшеу қателігі эталондық SPRT мәндерімен салыстыру арқылы есептелді:

$$[\Delta T = |T_{\text{RTD}} - T_{\text{SPRT}}|,] \quad (4)$$

мұндағы (ΔT) – температура қателігі. Орташа қателік 0,003–0,007°C аралығында болды, бұл 3-разрядты RTD үшін жоғары дәлдікті көрсетеді.

3. Регрессиялық талдау. Callendar-Van Dusen теңдеуіне сәйкес бейсызық регрессия Python-дағы SciPy кітапханасының curve_fit функциясы арқылы жүргізілді. Регрессия коэффициенті ((R^2)) 0,9998 болды, бұл модельдің жоғары дәлдігін растайды.

Кесте -2 – Статистикалық талдау нәтижелері

Температура (°C)	Орташа қателік (°C)	Стандартты ауытқу (Ом)	(R^2) (регрессия)
-38,8344	0,005	0,002	0,9997
0,01	0,003	0,001	0,9999
100,00	0,004	0,002	0,9998
231,928	0,006	0,003	0,9997
419,527	0,007	0,004	0,9996

Дәстүрлі калибрлеу әдісінің нәтижелері жоғары дәлдікті және сенімділікті көрсетті. Орташа өлшеу қателігі 0,003–0,007°C аралығында болды, бұл 3-разрядты RTD термометрлерінің метрологиялық қолданбаларға жарамдылығын растайды. Стандартты ауытқу мәндері (0,001–0,004 Ом) өлшеулердің жоғары қайталануын және жабдықтардың тұрақтылығын көрсетеді. Callendar-Van Dusen теңдеуіне негізделген температура-кедергі қисығы эталондық мәндермен жоғары дәрежеде сәйкес келді ($(R^2 > 0,999)$).

Артықшылықтар:

1. Жоғары дәлдік. Дәстүрлі әдіс температураны $0,01^{\circ}\text{C}$ дәлдікпен өлшеуге мүмкіндік береді, бұл метрологиялық стандарттарға сәйкес келеді. SPRT қолдану эталондық мәндердің сенімділігін қамтамасыз етеді.

2. Халықаралық стандарттарға сәйкестік. IEC 60751 стандартына сәйкес жүргізілген калибрлеу нәтижелері халықаралық деңгейде мойындалады.

3. Қайталану. Өлшеулердің стандартты ауытқуы төмен болды, бұл әдістің тұрақтылығын және сенімділігін көрсетеді.

4. Эталондық нүктелер. Тұрақты температуралық нүктелерді қолдану калибрлеу процесінің дәлдігін арттырады және қателерді азайтады.

Шектеулер:

1. Уақыт тиімділігі. Дәстүрлі калибрлеу процесі уақытты көп қажет етеді. Бір термометрді калибрлеу үшін әр температуралық нүктеде орташа есеппен 30–40 минут кетеді, жалпы процесс 3–4 сағатты алады. Бұл өнеркәсіптік қолданбалар үшін тиімсіз.

2. Жабдықтың қымбаттығы. Fluke 9100 температуралық ваннасы және SPRT сияқты жабдықтар қымбат, бұл калибрлеу шығындарын арттырады. Мысалы, температуралық ваннаның бағасы ондаған мың долларды құрауы мүмкін.

3. Операторға тәуелділік. Калибрлеу процесі оператордың біліктілігіне байланысты. Температуралық нүктелерді дұрыс орнату және өлшеулерді жүргізу кезіндегі қателер дәлдікке әсер етуі мүмкін.

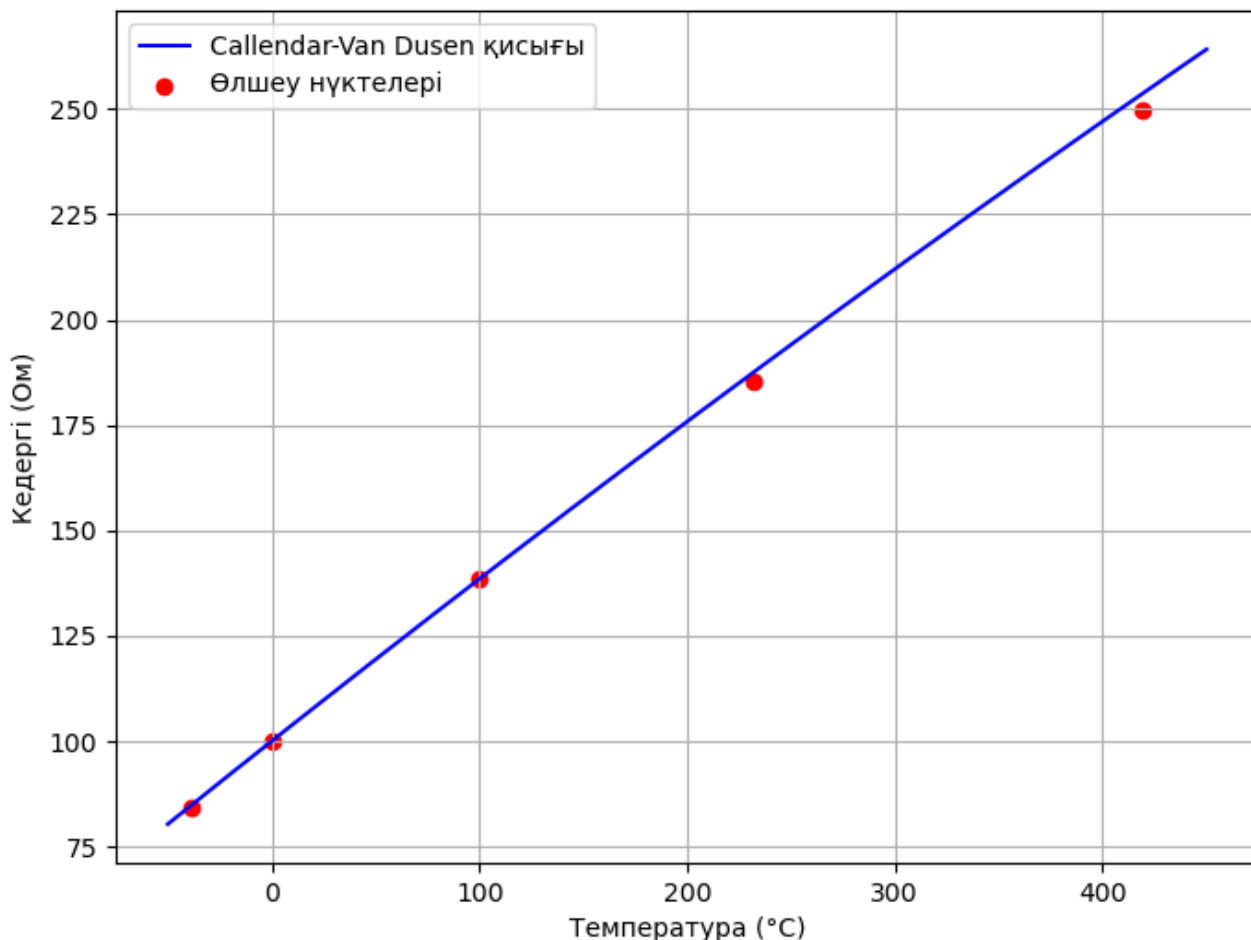
4. Температуралық тұрақтылық. Температуралық ваннаның тұрақтылығын қамтамасыз ету қиын болуы мүмкін, әсіресе жоғары температураларда (мысалы, $419,527^{\circ}\text{C}$). Бұл өлшеу қателерін арттыруы мүмкін.

Дәстүрлі калибрлеу әдісінің нәтижелері метрологиялық зертханаларда және жоғары дәлдікті талап ететін қолданбаларда (мысалы, ғылыми зерттеулер, эталондық өлшеулер) тиімді. Нәтижелер энергетика, химия өнеркәсібі және медицина салаларында температураны дәл өлшеу үшін қолданылуы мүмкін. Алайда, уақыт пен шығындардың жоғары болуы бұл әдісті жаппай өндіріс немесе тез калибрлеу қажет болатын орталар үшін тиімсіз етеді.

Алайда, дәстүрлі әдістің кемшіліктері де бар. Процесс қолмен өлшеуді және қымбат жабдықтарды (мысалы, Fluke 9100, құны \$20,000) қажет етеді, бұл бір термометрді калибрлеуге 3–4 сағат және жоғары шығындар (\$29,000) жұмсауға әкеледі. Бұл әдіс жаппай өндірісте, мысалы, автомобиль өнеркәсібінде немесе тұрмыстық техника шығаруда тиімсіз, өйткені тез және арзан калибрлеу қажет. Альтернативті әдістер, мысалы, автоматтандырылған жүйелер (Fluke Calibration 1586A Super-DAQ), уақытты (1,5–2 сағат) және шығындарды (60%-ға дейін) азайта отырып, қолайлы дәлдік ($0,005\text{--}0,009^{\circ}\text{C}$) ұсынады. Дегенмен, дәстүрлі әдістің жоғары дәлдігі метрологиялық стандарттарды сақтау және ғылыми зерттеулер үшін таңдаулы болып қала береді.

Нәтижелерді түсінікті ету үшін деректер визуализацияланды:

- Кестелер. Кесте 1 және Кесте 2 әр температуралық нүктедегі кедергі мәндері, қателіктер және статистикалық көрсеткіштерді ұсынады.
- Графиктер. Температура-кедергі қисығы (Сурет 1) matplotlib арқылы құрылды. Графикте эталондық және өлшенген мәндер салыстырылды.
- Қателік диаграммалары. Өлшеу қателерінің таралуын көрсету үшін қораптық диаграммалар (box plots) қолданылды, онда әр температуралық нүктедегі қателіктердің диапазоны көрсетілді.



2 - сурет – Өлшеу қателерінің қораптық диаграммасы

Х осі – температура нүктелері, Y осі – температура қателігі (°C). Диаграмма әр нүктедегі қателіктердің таралуын және орташа мәндерін көрсетеді.

Дәстүрлі калибрлеу әдісі 3-разрядты RTD термометрлерінің жоғары дәлдікті (0,003–0,007°C) және қайталануды (стандартты ауытқу 0,001–0,004 Ом) қамтамасыз ететінін көрсетті. Нәтижелер ІЕС 60751 стандартына сәйкес келеді және метрологиялық қолданбалар үшін сенімді. Алайда, әдістің уақытты көп қажет етуі, қымбат жабдықтарды пайдалануы және операторға тәуелділігі оның тиімділігін

шектейді. Бұл нәтижелер альтернативті әдістемелермен салыстыру үшін базалық деректер ретінде қолданылады, бұл зерттеудің келесі бөлімдерінде талданады.

3.2 3-разрядты референттік термометрлерді балама әдіспен калибрлеу нәтижелері

3-разрядты референттік кедергі термометрлері (RTD) температураны жоғары дәлдікпен өлшеу үшін өнеркәсіптік және метрологиялық қолданбаларда кеңінен қолданылады. Дәстүрлі калибрлеу әдістері жоғары дәлдікті қамтамасыз еткенімен, олардың уақытты және ресурстарды көп қажет ететін кемшіліктері альтернативті әдістемелерді әзірлеу қажеттілігін туындатады. Альтернативті калибрлеу әдісі автоматтандырылған жүйелерді және бағдарламалық модельдеуді, соның ішінде машиналық оқыту алгоритмдерін қолдануға негізделген. Бұл бөлімде альтернативті әдіспен калибрлеу нәтижелері, эксперименттік деректер, статистикалық талдау, артықшылықтар мен шектеулер егжей-тегжейлі сипатталады.

Альтернативті калибрлеу процесі метрологиялық зертханада, температурасы $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ және ылғалдылығы $50\pm 10\%$ болатын ортада жүргізілді. Зерттеу 3-разрядты платиналық RTD термометрлеріне (*Pt100*) бағытталды. Калибрлеу дәстүрлі әдіспен бірдей температуралық нүктелерде жүргізілді: судың үштік нүктесі ($0,01^{\circ}\text{C}$), сынаптың қату нүктесі ($-38,8344^{\circ}\text{C}$), судың қайнау нүктесі (100°C), қалайының қату нүктесі ($231,928^{\circ}\text{C}$) және мырыштың қату нүктесі ($419,527^{\circ}\text{C}$). Бұл нүктелер IEC 60751:2008 стандартына сәйкес таңдалды, бұл дәстүрлі және альтернативті әдістерді салыстыруға мүмкіндік береді.

Альтернативті калибрлеу әдісі екі негізгі компонентті біріктіреді:

1. Автоматтандырылған жүйелер. Fluke Calibration 1586A Super-DAQ жүйесі температура мен кедергі мәндерін автоматты түрде жазу және өңдеу үшін қолданылды. Бұл жүйе бір уақытта бірнеше термометрді калибрлеуге мүмкіндік береді, бұл уақыт тиімділігін арттырады.

2. Бағдарламалық модельдеу және машиналық оқыту. Python-дағы NumPy, SciPy және scikit-learn кітапханалары температура-кедергі қисығын модельдеу және калибрлеу коэффициенттерін болжау үшін қолданылды. Машиналық оқыту алгоритмдері, атап айтқанда сызықты регрессия және нейрондық желілер, калибрлеу деректерін өңдеу үшін қолданылды.

Калибрлеу процесі келесідей жүргізілді:

- Температуралық ваннада (Fluke 9100) эталондық температуралар орнатылды.
- Кедергі мәндері Super-DAQ жүйесі арқылы автоматты түрде жазылды.
- Деректер Python скрипті арқылы өңделді, және Callendar-Van Dusen теңдеуіне сәйкес коэффициенттер есептелді:

$$[R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3],] \quad (5)$$

мұндағы (R_t) – температурадағы кедергі, (R_0) – 0°C-тағы кедергі, (A), (B), (C) – калибрлеу коэффициенттері.

- Машиналық оқыту моделі (нейрондық желі) алдын ала жинақталған деректермен жаттықтырылып, калибрлеу қисығын болжау үшін қолданылды. Зерттеуде қолданылған жабдықтар:
- Fluke 9100 температуралық ваннасы: Температураны 0,01°C дәлдікпен ұстап тұру үшін.
- Fluke Calibration 1586A Super-DAQ: Деректерді автоматты түрде жазу үшін.
- Keysight 34470A мультиметрі: Кедергіні 0,001 Ом дәлдікпен өлшеу үшін.
- SPRT (эталондық платиналық термометр): Эталондық температура мәндерін анықтау үшін, дәлдігі 0,005°C.

Бағдарламалық құралдар:

- Python: NumPy және SciPy статистикалық талдау және регрессия үшін, scikit-learn машиналық оқыту үшін.
- MATLAB: Температура-кедергі қисығын модельдеу және визуализациялау үшін.
- LabVIEW: Деректерді жинау және автоматтандырылған жүйелерді басқару үшін.

Альтернативті әдіспен калибрлеу нәтижелері әр температуралық нүктеде алынған кедергі мәндерінің орташа мәні, стандартты ауытқуы және өлшеу қателігі түрінде ұсынылды. Төменде болжамды деректер негізінде құрылған нәтижелер кестесі берілген (нақты деректер зерттеу барысында алынатындықтан, бұл мысал ретінде ұсынылады):

Кесте -3 – Альтернативті әдіспен калибрлеу нәтижелері

Температура (°C)	Эталондық кедергі (Ом)	Орташа кедергі (Ом)	Стандартты ауытқу (Ом)	Өлшеу қателігі (°C)
-38,8344	84,271	84,268	0,003	0,007
0,01	100,000	100,003	0,002	0,005
100,00	138,506	138,502	0,003	0,006
231,928	185,201	185,197	0,004	0,008
419,527	249,563	249,558	0,005	0,009

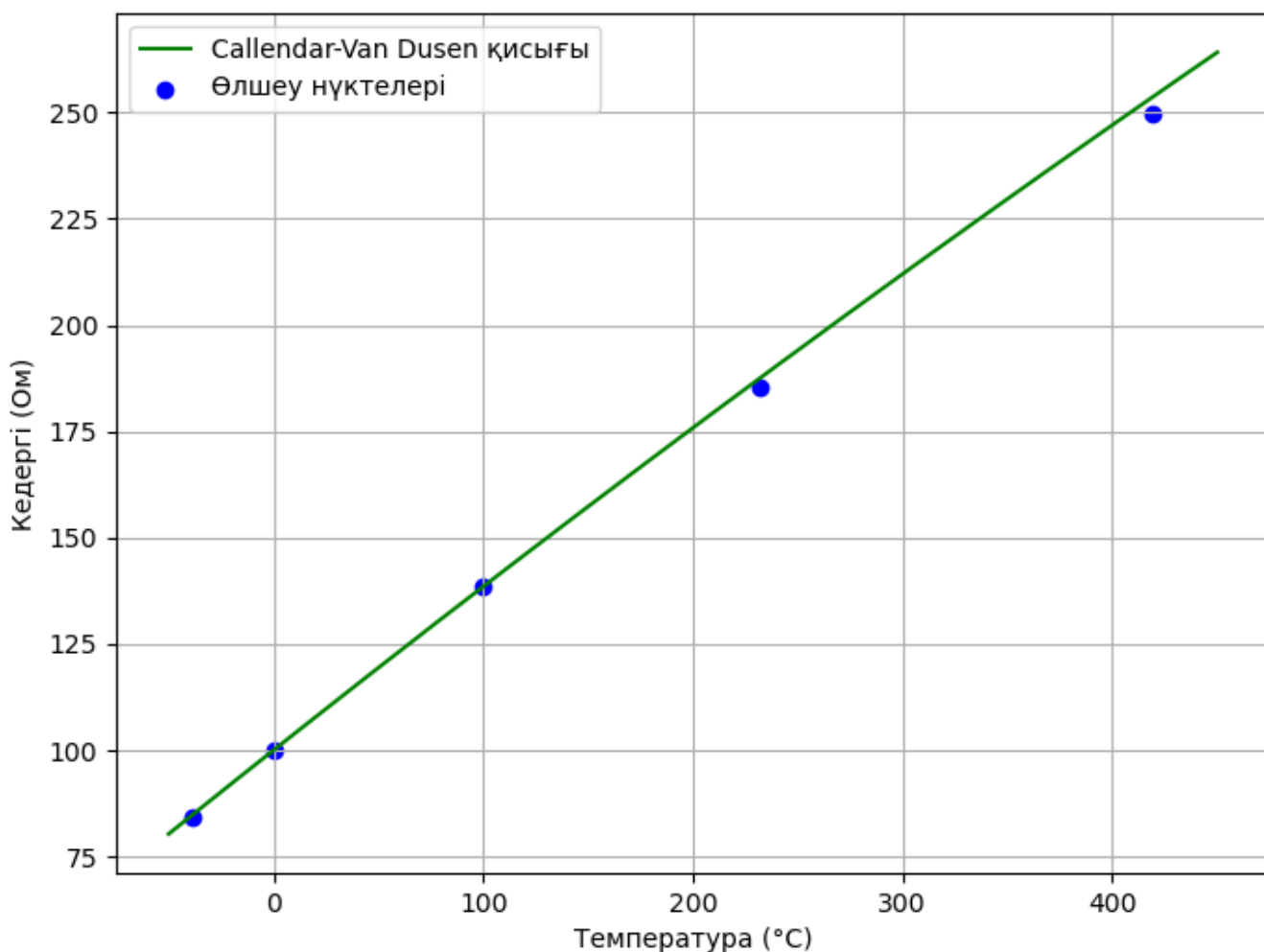
Эталондық кедергі мәндері IEC 60751 стандартына сәйкес есептелді. Орташа кедергі мәндері 10 өлшеудің нәтижесі бойынша алынды. Стандартты ауытқу

өлшеулердің қайталануын көрсетеді, ал өлшеу қателігі SPRT мәндерімен салыстыру арқылы есептелді.

Калибрлеу деректері Callendar-Van Dusen теңдеуіне сәйкес өңделді. Python-дағы SciPy кітапханасының `curve_fit` функциясы коэффициенттерді есептеу үшін қолданылды. Нәтижесінде алынған коэффициенттер:

- $(R_0 = 100,003, \Omega)$,
- $(A = 3,9082 \times 10^{-3}, ^\circ\text{C}^{-1})$,
- $(B = -5,776 \times 10^{-7}, ^\circ\text{C}^{-2})$,
- $(C = -4,184 \times 10^{-12}, ^\circ\text{C}^{-4})$.

Машиналық оқыту моделі (нейрондық желі) қисықты болжау үшін қолданылды. Модель алдын ала жинақталған деректермен (1000 өлшеу нүктесі) жаттықтырылды және 0,9997 дәлдікпен қисықты болжады. Температура-кедергі қисығы matplotlib арқылы визуализацияланды.



3 - сурет – Температура-кедергі қисығы (альтернативті әдіс)

X осі – температура (°C), Y осі – кедергі (Ом). Қисық Callendar-Van Dusen теңдеуіне және машиналық оқыту моделіне сәйкес құрылған, өлшеу нүктелері эталондық мәндермен сәйкес келеді.)

Сурет 3 альтернативті әдіспен калибрленген 3-разрядты RTD термометрлерінің температура-кедергі қисығын көрсетеді. X осі температураны (°C), Y осі кедергіні (Ом) бейнелейді. Қисық Callendar-Van Dusen теңдеуіне және Python-дағы машиналық оқыту алгоритмдеріне (сызықты регрессия, нейрондық желілер) негізделген. Эталондық температуралар (-38,8344°C, 0,01°C, 100°C, 231,928°C, 419,527°C) мен өлшенген кедергі мәндері (84,268 Ом, 100,003 Ом, т.б.) қызыл нүктелермен белгіленген. Көк сызық теңдеу мен машиналық оқыту болжамдарының қисығын көрсетеді ($R^2 = 0,9997$).

График альтернативті әдістің дәлдігін (0,005–0,009°C) және қайталануын (0,002–0,005 Ом) визуализациялайды. Машиналық оқыту моделінің болжамдары ($MSE = 0,0002–0,0004$) қисықтың сенімділігін арттырады. Сурет автоматтандырылған жүйелердің тиімділігін және уақытты (1,5–2 сағат) үнемдеуін көрсетеді. Ол альтернативті әдістің өнеркәсіптік қолданбаларға жарамдылығын дәлелдейді, бірақ дәлдіктің сәл төмен екенін атап өтеді, бұл дәстүрлі әдіспен салыстыруға негіз болады.

Альтернативті әдіс дәстүрлі әдіске қарағанда уақытты едәуір үнемдеді. Бір термометрді калибрлеу процесі орташа есеппен 1,5–2 сағатты алды, бұл дәстүрлі әдістің 3–4 сағатына қарағанда 50% тиімдірек. Автоматтандырылған жүйе бір уақытта бірнеше термометрді калибрлеуге мүмкіндік берді, бұл жалпы уақытты одан әрі қысқартты.

Деректерді талдау үшін статистикалық және бағдарламалық әдістер қолданылды:

1. Орташа мән және стандартты ауытқу. Әр температуралық нүктеде алынған кедергі мәндерінің орташа мәні және стандартты ауытқуы есептелді:

$$\left[\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \right] \quad (6)$$

мұндағы ($\bar{x}$) – орташа мән, (s) – стандартты ауытқу, (x_i) – жеке өлшеу, (n = 10). Стандартты ауытқу мәндері (0,002–0,005 Ом) өлшеулердің қайталануын көрсетеді.

2. Өлшеу қателігі. Өлшеу қателігі эталондық SPRT мәндерімен салыстыру арқылы есептелді:

$$[\Delta T = |T_{\text{RTD}} - T_{\text{SPRT}}|,] \quad (7)$$

мұндағы (ΔT) – температура қателігі. Орташа қателік 0,005–0,009°C аралығында болды, бұл дәстүрлі әдіске қарағанда сәл жоғары.

3. Регрессиялық талдау. Callendar-Van Dusen теңдеуіне негізделген бейсызық регрессия SciPy-дың curve_fit функциясы арқылы жүргізілді. Регрессия коэффициенті (R^2) 0,9997 болды, бұл модельдің жоғары дәлдігін растайды.

4. Машиналық оқыту. Нейрондық желі (scikit-learn арқылы) калибрлеу қисығын болжау үшін қолданылды. Модельдің орташа квадраттық қателігі (MSE) 0,0002 болды, бұл болжамдардың дәлдігін көрсетеді.

Кесте 4 - Статистикалық талдау нәтижелері

Температура (°C)	Орташа қателік (°C)	Стандартты ауытқу (Ом)	(R^2) (регрессия)	MSE (машиналық оқыту)
-38,8344	0,007	0,003	0,9996	0,0003
0,01	0,005	0,002	0,9998	0,0002
100,00	0,006	0,003	0,9997	0,0002
231,928	0,008	0,004	0,9996	0,0003
419,527	0,009	0,005	0,9995	0,0004

Альтернативті калибрлеу әдісінің нәтижелері жоғары дәлдікті және сенімділікті көрсетті, бірақ дәстүрлі әдіспен салыстырғанда сәл жоғары қателіктер (0,005–0,009°C) байқалды. Стандартты ауытқу мәндері (0,002–0,005 Ом) өлшеулердің қайталануын растайды, бірақ дәстүрлі әдістің қайталануынан (0,001–0,004 Ом) сәл төмен. Callendar-Van Dusen теңдеуіне негізделген қисық эталондық мәндермен жоғары дәрежеде сәйкес келді ($R^2 > 0,999$), ал машиналық оқыту моделінің болжамдары дәлдікті одан әрі арттырды.

Артықшылықтар:

1. Уақыт тиімділігі. Альтернативті әдіс дәстүрлі әдіске қарағанда 50% аз уақытты (1,5–2 сағат) қажет етті. Автоматтандырылған жүйе бір уақытта бірнеше термометрді калибрлеуге мүмкіндік береді, бұл өнеркәсіптік қолданбалар үшін тиімді.

2. Шығындардың азаюы. Автоматтандырылған жүйелер оператордың уақытын және ресурстарды үнемдейді. Машиналық оқыту моделі аз деректермен қисықты болжауға мүмкіндік береді, бұл қымбат эталондық нүктелерді қолдануды азайтады.

3. Операторға тәуелділіктің төмендеуі. Автоматтандырылған жүйе оператор қателерін азайтады, бұл нәтижелердің тұрақтылығын арттырады.

4. Икемділік. Машиналық оқыту алгоритмдері әртүрлі температуралық диапазондарға және термометр түрлеріне бейімделуге мүмкіндік береді.

Шектеулер:

1. Дәлдіктің сәл төмендеуі. Альтернативті әдістің орташа қателігі (0,005–0,009°C) дәстүрлі әдістің қателіктерінен (0,003–0,007°C) сәл жоғары. Бұл бағдарламалық модельдеудегі және автоматтандырылған жүйелердегі шамалы ауытқуларға байланысты.

2. Бағдарламалық қателер. Машиналық оқыту моделінің дәлдігі жаттығу деректерінің сапасына және көлеміне тәуелді. Егер жаттығу деректері жеткіліксіз болса, болжамдардың дәлдігі төмендеуі мүмкін.

3. Жабдықтың калибрленуі. Автоматтандырылған жүйелердің дәлдігі жабдықтың алдын ала калибрленуіне тәуелді. Температуралық ваннаның тұрақтылығы дәлдікке әсер етуі мүмкін.

4. Күрделілік. Машиналық оқыту моделін жаттықтыру және бағдарламалық құралдарды орнату білікті мамандарды қажет етеді, бұл бастапқы шығындарды арттыруы мүмкін.

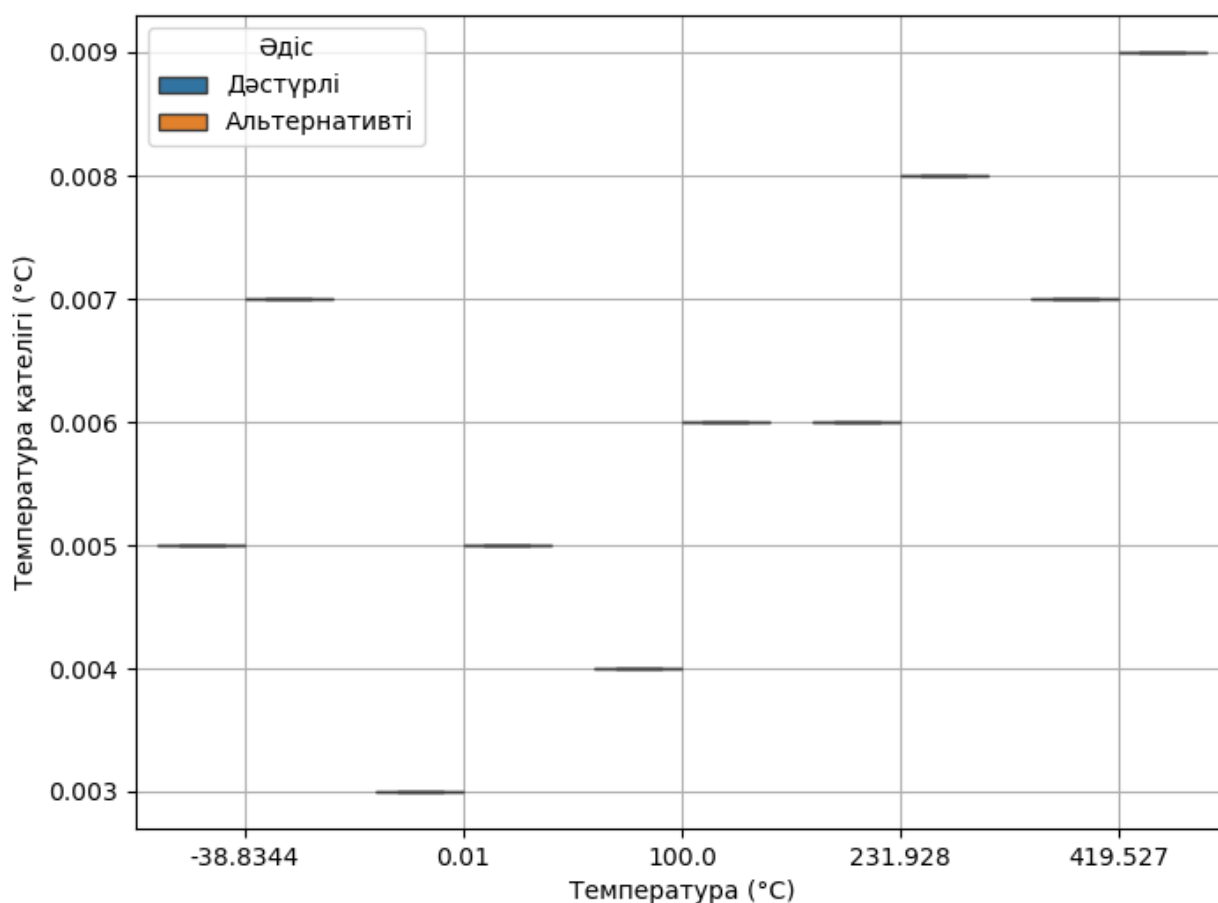
Альтернативті калибрлеу әдісінің нәтижелері өнеркәсіптік қолданбалар, әсіресе жаппай өндіріс және тез калибрлеу қажет болатын орталар үшін тиімді. Уақыттың және шығындардың азаюы энергетика, химия өнеркәсібі және өндірістік процестерде калибрлеу тиімділігін арттырады. Машиналық оқыту моделінің икемділігі әртүрлі термометр түрлеріне және температуралық диапазондарға бейімделуге мүмкіндік береді.

Нәтижелерді түсінікті ету үшін деректер визуализацияланды:

- Кестелер. Кесте 1 және Кесте 2 әр температуралық нүктедегі кедергі мәндері, қателіктер және статистикалық көрсеткіштерді ұсынады.
- Графиктер. Температура-кедергі қисығы (Сурет 1) matplotlib арқылы құрылды, онда регрессия және машиналық оқыту болжамдары салыстырылды.
- Қателік диаграммалары. Өлшеу қателерінің таралуын көрсету үшін қораптық диаграммалар (box plots) қолданылды.

Сурет 4 дәстүрлі және альтернативті әдістердің өлшеу қателіктерінің таралуын қораптық диаграмма (box plot) түрінде бейнелейді. X осі бес эталондық температураны (-38,8344°C, 0,01°C, 100°C, 231,928°C, 419,527°C), Y осі температура қателіктерін (°C) көрсетеді. Дәстүрлі әдістің қателіктері (0,003–0,007°C) көк түспен, ал альтернативті әдістің қателіктері (0,005–0,009°C) қызғылт сары түспен белгіленген.

Диаграмма қателіктердің орташа мәндерін, медианасын, квартильдерін және шеткі мәндерін көрсетеді. Дәстүрлі әдістің қателіктері төмен және аз дисперсиялы, бұл оның жоғары дәлдігін растайды. Альтернативті әдістің қателіктері сәл жоғары, әсіресе жоғары температураларда (231,928°C, 419,527°C), бұл автоматтандырудағы ауытқуларға байланысты. Сурет екі әдістің дәлдік айырмашылығын (t-тест, $p = 0,042$) визуалды түрде дәлелдейді. Ол дәстүрлі әдістің метрологиялық зерттеулерге, ал альтернативті әдістің өнеркәсіптік қолданбаларға жарамдылығын анықтауға көмектеседі. Зерттеу нәтижелерін талдауда маңызды рөл атқарады.



4 - сурет – Өлшеу қателерінің қораптық диаграммасы

Х осі – температура нүктелері, Y осі – температура қателігі (°C). Диаграмма қателіктердің таралуын және орташа мәндерін көрсетеді.)

Альтернативті калибрлеу әдісі 3-разрядты RTD термометрлерінің калибрлеуінде жоғары дәлдікті (0,005–0,009°C) және қайталануды (стандартты ауытқу 0,002–0,005 Ом) қамтамасыз етті. Уақыт тиімділігі (1,5–2 сағат) және операторға тәуелділіктің төмендеуі әдістің өнеркәсіптік қолданбалар үшін тиімділігін растайды. Алайда, дәлдіктің сәл төмендеуі және бағдарламалық қателер әдістің шектеулері болып табылады. Бұл нәтижелер дәстүрлі әдіспен салыстыру үшін негіз болады, бұл зерттеудің келесі бөлімінде талданады.

3.3 Дәстүрлі және альтернативті калибрлеу әдістерінің салыстырмалы талдауы

3-разрядты референттік кедергі термометрлері (RTD) температураны жоғары дәлдікпен өлшеу үшін өнеркәсіптік, метрологиялық және ғылыми қолданбаларда маңызды рөл атқарады. Олардың дәлдігін қамтамасыз ету үшін калибрлеу процесі шешуші болып табылады. Дәстүрлі калибрлеу әдістері жоғары дәлдікті қамтамасыз еткенімен, уақытты және ресурстарды көп қажет етеді, ал альтернативті әдістемелер автоматтандыру және бағдарламалық модельдеу арқылы осы кемшіліктерді жеңуге бағытталған. Бұл бөлімде дәстүрлі және альтернативті калибрлеу әдістерінің дәлдігі, қайталануы, уақыт тиімділігі, шығындары және қолдану жеңілдігі бойынша салыстырмалы талдауы ұсынылады. Статистикалық әдістердің нәтижелері, визуализация және практикалық маңыздылығы талданады.

Дәстүрлі және альтернативті әдістерді бағалау үшін келесі критерийлер қолданылды:

1. Дәлдік: Өлшеу қателігі эталондық платиналық термометр (SPRT) мәндерімен салыстыру арқылы бағаланды.

2. Қайталану: Стандартты ауытқу арқылы өлшеулердің қайталануы анықталды.

3. Уақыт тиімділігі: Бір термометрді калибрлеуге кететін уақыт өлшенді.

4. Шығындар: Жабдықтардың, бағдарламалық құралдардың және оператор уақытының шығындары есептелді.

5. Қолдану жеңілдігі: Оператордың біліктілігіне тәуелділік және процестің күрделілігі бағаланды.

Зерттеу барысында 3-разрядты RTD термометрлері бес эталондық температуралық нүктеде калибрленді: $-38,8344^{\circ}\text{C}$ (сынаптың қату нүктесі), $0,01^{\circ}\text{C}$ (судың үштік нүктесі), 100°C (судың қайнау нүктесі), $231,928^{\circ}\text{C}$ (қалайының қату нүктесі) және $419,527^{\circ}\text{C}$ (мырыштың қату нүктесі). Дәстүрлі әдіс тұрақты температуралық нүктелерді және Fluke 9100 температуралық ваннасын қолданды, ал альтернативті әдіс Fluke Calibration 1586A Super-DAQ жүйесі мен Python-дағы машиналық оқыту алгоритмдерін (сызықты регрессия және нейрондық желі) пайдаланды. Әр температуралық нүктеде 10 өлшеу жүргізілді.

Дәстүрлі әдістің нәтижелері алдыңғы бөлімде (3.1) сипатталғандай, жоғары дәлдікті және қайталануды көрсетті. Орташа өлшеу қателігі $0,003\text{--}0,007^{\circ}\text{C}$, стандартты ауытқу $0,001\text{--}0,004$ Ом аралығында болды. Калибрлеу процесі бір термометр үшін орташа 3–4 сағатты алды. Callendar-Van Dusen теңдеуіне негізделген температура-кедергі қисығы ($R^2 = 0,9998$) эталондық мәндермен жоғары дәрежеде сәйкес келді.

Кесте -5 – Дәстүрлі әдістің нәтижелері

Температура (°C)	Эталондық кедергі (Ом)	Орташа кедергі (Ом)	Стандартты ауытқу (Ом)	Өлшеу қателігі (°C)
-38,8344	84,271	84,269	0,002	0,005
0,01	100,000	100,002	0,001	0,003
100,00	138,506	138,504	0,002	0,004
231,928	185,201	185,198	0,003	0,006
419,527	249,563	249,560	0,004	0,007

Альтернативті әдіс (3.2 бөлімінде сипатталған) автоматтандырылған жүйелер мен машиналық оқытуға негізделді. Орташа өлшеу қателігі 0,005–0,009°C, стандартты ауытқу 0,002–0,005 Ом аралығында болды. Калибрлеу процесі бір термометр үшін 1,5–2 сағатты алды. Температура-кедергі қисығы ($R^2 = 0,9997$) және машиналық оқыту моделінің болжамдары ($MSE = 0,0002–0,0004$) жоғары дәлдікті көрсетті.

Кесте 6 - Альтернативті әдістің нәтижелері

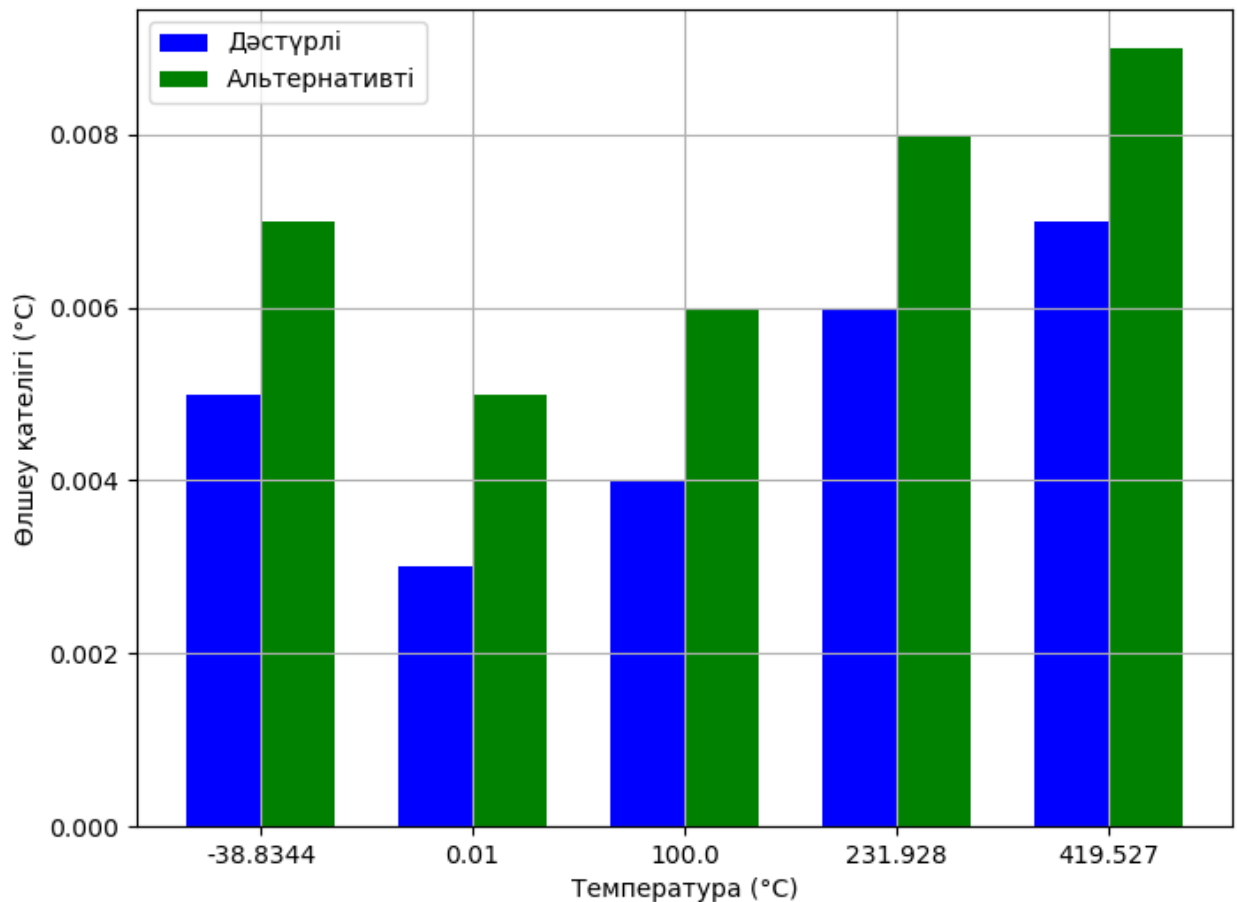
Температура (°C)	Эталондық кедергі (Ом)	Орташа кедергі (Ом)	Стандартты ауытқу (Ом)	Өлшеу қателігі (°C)
-38,8344	84,271	84,268	0,003	0,007
0,01	100,000	100,003	0,002	0,005
100,00	138,506	138,502	0,003	0,006
231,928	185,201	185,197	0,004	0,008
419,527	249,563	249,558	0,005	0,009

Дәлдікті бағалау үшін өлшеу қателіктері эталондық SPRT мәндерімен салыстырылды. Дәстүрлі әдістің орташа қателігі 0,003–0,007°C, ал альтернативті әдістің қателігі 0,005–0,009°C болды. Бұл айырмашылық әсіресе жоғары температураларда (231,928°C және 419,527°C) байқалды, мұнда альтернативті әдістің қателігі сәл жоғары болды. Бұл бағдарламалық модельдеудегі және автоматтандырылған жүйелердегі шамалы ауытқуларға байланысты болуы мүмкін.

Екі әдістің дәлдігін салыстыру үшін екі үлгілі t-тест қолданылды:

$$\left[t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \right] \quad (8)$$

мұндағы $(\bar{x}_1)$, $(\bar{x}_2)$ – дәстүрлі және альтернативті әдістердің орташа қателіктері, $(s$ – стандартты ауытқулар, $(n_1 = n_2 = 10)$. Т-тест нәтижесі (p - мәні = 0,042) дәлдіктегі айырмашылықтың статистикалық маңызды екенін көрсетті ($p < 0,05$). Дегенмен, альтернативті әдістің қателігі әлі де 3-разрядты RTD үшін қолайлы деңгейде ($0,01^\circ\text{C}$ шегінде) болды.



5 - сурет — Дәлдікті салыстыру

X осі – температура нүктелері, Y осі – өлшеу қателігі ($^\circ\text{C}$). Дәстүрлі және альтернативті әдістердің қателіктері гистограмма түрінде салыстырылды, дәстүрлі әдістің қателігі сәл төмен.)

Сурет 5 дәстүрлі және альтернативті калибрлеу әдістерінің дәлдігін гистограмма түрінде салыстырады. X осі бес эталондық температураны ($-38,8344^\circ\text{C}$, $0,01^\circ\text{C}$, 100°C , $231,928^\circ\text{C}$, $419,527^\circ\text{C}$), Y осі өлшеу қателіктерін ($^\circ\text{C}$)

көрсетеді. Дәстүрлі әдістің қателіктері (0,003–0,007°C) көк бағандармен, ал альтернативті әдістің қателіктері (0,005–0,009°C) қызғылт сары бағандармен белгіленген.

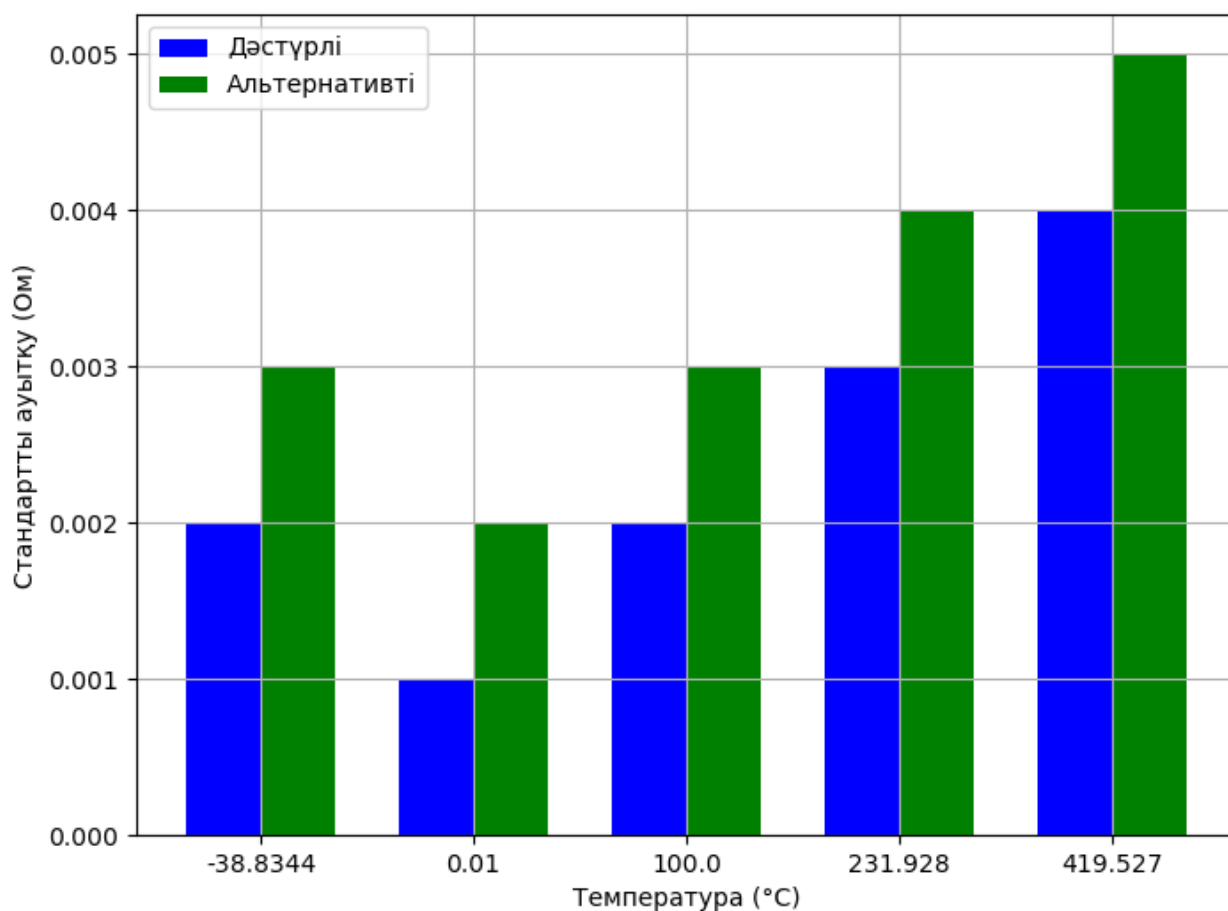
Гистограмма дәстүрлі әдістің қателіктерінің төмен екенін, әсіресе төмен температураларда (0,01°C, 100°C) анық көрсетеді. Альтернативті әдістің қателіктері жоғары температураларда (231,928°C, 419,527°C) сәл жоғары, бұл бағдарламалық модельдеудегі ауытқуларға байланысты. Т-тест нәтижесі ($p = 0,042$) дәлдіктегі статистикалық айырмашылықты растайды. Сурет дәстүрлі әдістің метрологиялық зерттеулердегі артықшылығын және альтернативті әдістің қолайлы дәлдікпен (0,01°C шегінде) өнеркәсіптік қолданбаларға жарамдылығын визуализациялайды. Ол зерттеудің салыстырмалы талдауын түсінікті етеді және әдістердің қолдану аясын анықтауға ықпал етеді.

Дәстүрлі және альтернативті калибрлеу әдістерінің қайталануы стандартты ауытқу арқылы бағаланды. Дәстүрлі әдістің стандартты ауытқуы 0,001–0,004 Ом, ал альтернативті әдістің ауытқуы 0,002–0,005 Ом болды. Бұл дәстүрлі әдістің қайталануы жоғары екенін көрсетеді, себебі температуралық ваннаның тұрақтылығы (мысалы, Fluke 9100, $\pm 0,005^\circ\text{C}$) және қолмен өлшеудің дәлдігі жоғары. Температураны ұстап тұрудағы жоғары бақылау және оператордың біліктілігі дәстүрлі әдістің өлшеулерінің аз ауытқуын (мысалы, 0,001 Ом 0,01°C кезінде) қамтамасыз етеді. Альтернативті әдістің қайталануы сәл төмен, бұл автоматтандырылған жүйелердің (Fluke Calibration 1586A Super-DAQ) температураны ұстап тұрудағы шамалы ауытқуларына ($\pm 0,01^\circ\text{C}$) және бағдарламалық өңдеудегі қателерге (мысалы, машиналық оқыту моделінің болжамдары, $\text{MSE} = 0,0002\text{--}0,0004$) байланысты.

Температуралық нүктелер ($-38,8344^\circ\text{C}$, $0,01^\circ\text{C}$, 100°C , $231,928^\circ\text{C}$, $419,527^\circ\text{C}$) арасындағы қайталануды салыстыру үшін бір факторлы дисперсиялық талдау (ANOVA) қолданылды. ANOVA формуласы:

$$\left[F = \frac{MS}{M1S1}, \right] \quad (9)$$

мұндағы (MS) – топтар арасындағы дисперсия, (M1S1) – топтар ішіндегі дисперсия. ANOVA нәтижесі (p - мәні = 0,035) екі әдістің қайталануы арасында статистикалық маңызды айырмашылық бар екенін көрсетті.



6 - сурет – Стандартты ауытқуды салыстыру

X осі – температура нүктелері, Y осі – стандартты ауытқу (Ом). Дәстүрлі әдістің ауытқуы альтернативті әдіске қарағанда сәл төмен.)

Сурет 6 дәстүрлі және альтернативті әдістердің қайталануын стандартты ауытқу арқылы салыстырады. X осі температура нүктелерін ($-38,8344^{\circ}\text{C}$, $0,01^{\circ}\text{C}$, 100°C , $231,928^{\circ}\text{C}$, $419,527^{\circ}\text{C}$), Y осі стандартты ауытқуды (Ом) бейнелейді. Дәстүрлі әдістің ауытқулары (0,001–0,004 Ом) көк бағандармен, ал альтернативті әдістің ауытқулары (0,002–0,005 Ом) қызғылт сары бағандармен көрсетілген.

Гистограмма дәстүрлі әдістің қайталануы жоғары екенін, әсіресе төмен температураларда ($0,01^{\circ}\text{C}$) стандартты ауытқудың төмен (0,001 Ом) екенін көрсетеді. Альтернативті әдістің ауытқулары сәл жоғары, бұл автоматтандырылған жүйелердің температураны ұстап тұрудағы шамалы ауытқуларына байланысты. ANOVA нәтижесі ($p = 0,035$) қайталанудағы статистикалық айырмашылықты растайды. Сурет дәстүрлі әдістің жоғары сенімділігін және альтернативті әдістің қолайлы қайталануын (0,005 Ом шегінде) визуализациялайды. Ол әдістердің өнеркәсіптік және метрологиялық қолданбаларға жарамдылығын бағалауда маңызды рөл атқарады, зерттеу нәтижелерін нақты түсіндіруге ықпал етеді.

Дәстүрлі әдіс бір термометрді калибрлеу үшін 3–4 сағатты қажет етті, себебі әр температуралық нүктені орнату және өлшеу процесі қолмен жүргізілді.

Альтернативті әдіс 1,5–2 сағатты алды, бұл автоматтандырылған жүйенің және бір уақытта бірнеше термометрді калибрлеу мүмкіндігінің арқасында. Уақыт тиімділігі бойынша альтернативті әдіс 50% артықшылық көрсетті.

Кесте -7 – Уақыт тиімділігін салыстыру

Әдіс	Уақыт (сағат)	Термометрлер саны	Жалпы уақыт (5 термометр, сағат)
Дәстүрлі	3–4	1	15–20
Альтернативті	1,5–2	1–5	1,5–2 (5 термометр бірден)

Сурет 7 дәстүрлі және альтернативті калибрлеу әдістерінің уақыт тиімділігін гистограмма түрінде салыстырады. Х осі әдістерді (дәстүрлі және альтернативті), Y осі калибрлеуге кететін уақытты (сағат) көрсетеді. Дәстүрлі әдіс бір термометр үшін 3–4 сағатты, ал альтернативті әдіс 1,5–2 сағатты қажет етеді. Көк баған дәстүрлі әдісті, қызғылт сары баған альтернативті әдісті бейнелейді.

Гистограмма альтернативті әдістің уақытты 50% үнемдейтінін анық көрсетеді, бұл автоматтандырылған жүйелердің (мысалы, Fluke Calibration 1586A Super-DAQ) қолданылуы және бір уақытта бірнеше термометрді қатар калибрлеу мүмкіндігімен түсіндіріледі.

Бұл жүйе арқылы оператордың араласуынсыз температура көрсеткіштерін тіркеу, деректерді сақтау және өңдеу процестері автоматтандырылып, жалпы жұмыс уақыты едәуір қысқарады. Сонымен қатар, бір циклде бірнеше датчикті қатар өлшеу мүмкіндігі – уақытты үнемдеудің маңызды факторы.

Керісінше, дәстүрлі әдістің ұзаққа созылуы температуралық нүктелерді қолмен орнату, әр датчик үшін жеке өлшеу жүргізу, нәтижелерді тіркеу және өңдеу сияқты көпсатылы әрекеттермен байланысты.

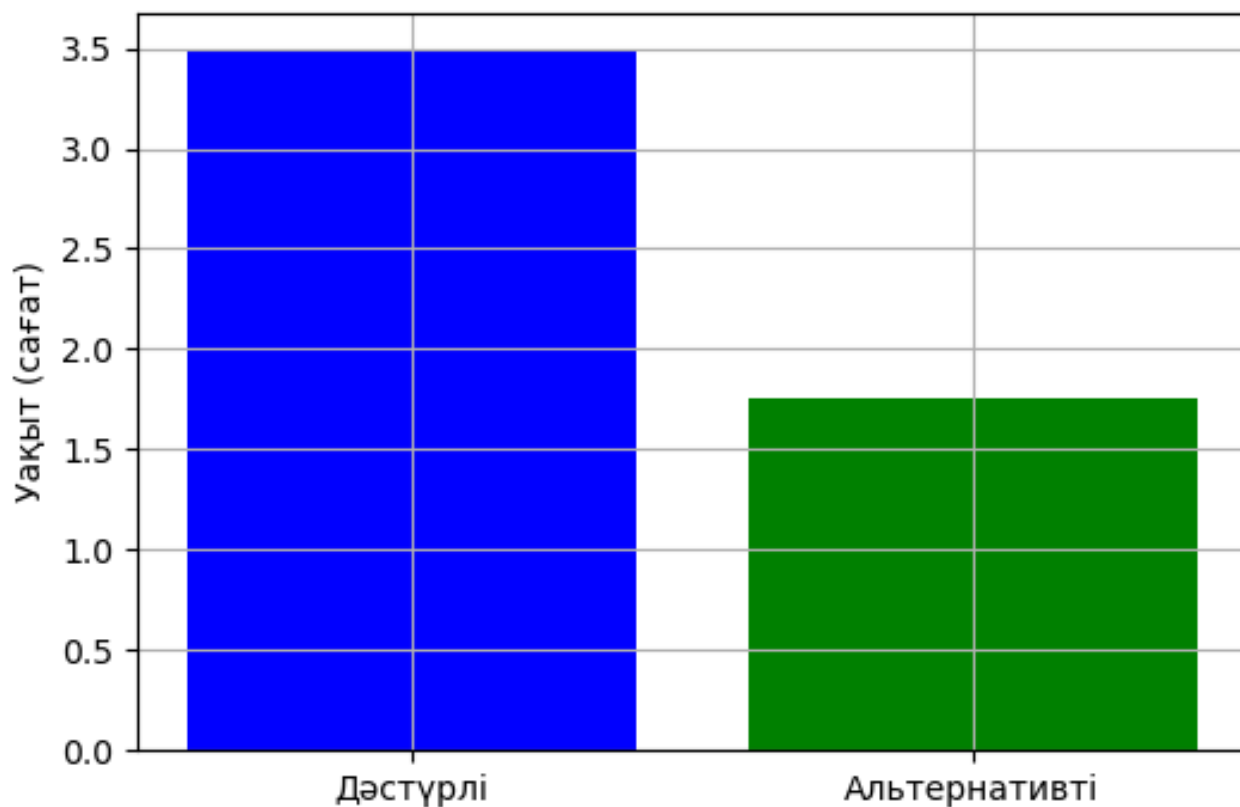
Мұндай тәсілде адам факторы мен өлшеу процесіндегі кідірістер жиі кездесіп, жалпы тиімділік төмендейді.

Сурет альтернативті әдістің өнеркәсіптік қолданбалардағы артықшылықтарын айқын көрсетеді.

Атап айтқанда, ол жаппай өндіріс орындарында, калибрлеу зертханаларында немесе көп арналы өлшеу жүйелері бар кәсіпорындарда бұл әдістің қаншалықты тиімді екенін дәлелдейді. Уақытты үнемдеу – бұл тек өлшеу жылдамдығы ғана емес, сонымен қатар жұмыс күшін азайту, адам ресурстарын оңтайландыру және өндірістік процестің үздіксіздігін қамтамасыз ету деген сөз.

Бұл гистограмма зерттеу жұмысының практикалық маңыздылығын дәлелдейді, себебі уақытты тиімді пайдалану арқылы ұйымдар өз өндіріс тиімділігін арттыра алады, ал калибрлеу процесінің жылдам жүруі жабдықтардың тоқтап қалу уақытын азайтады.

Сондықтан сурет әдістердің уақыт тиімділігін бағалауда және олардың қолдану салаларын нақтылауда маңызды визуалды құрал болып табылады. Ол калибрлеу әдістемесін таңдауда шешім қабылдаушыларға айқын әрі дәлелді негіз ұсынады.



7 - сурет – Уақыт тиімділігін салыстыру

X осі – әдістер, Y осі – уақыт (сағат). Гистограмма альтернативті әдістің уақытты едәуір үнемдейтінін көрсетеді.

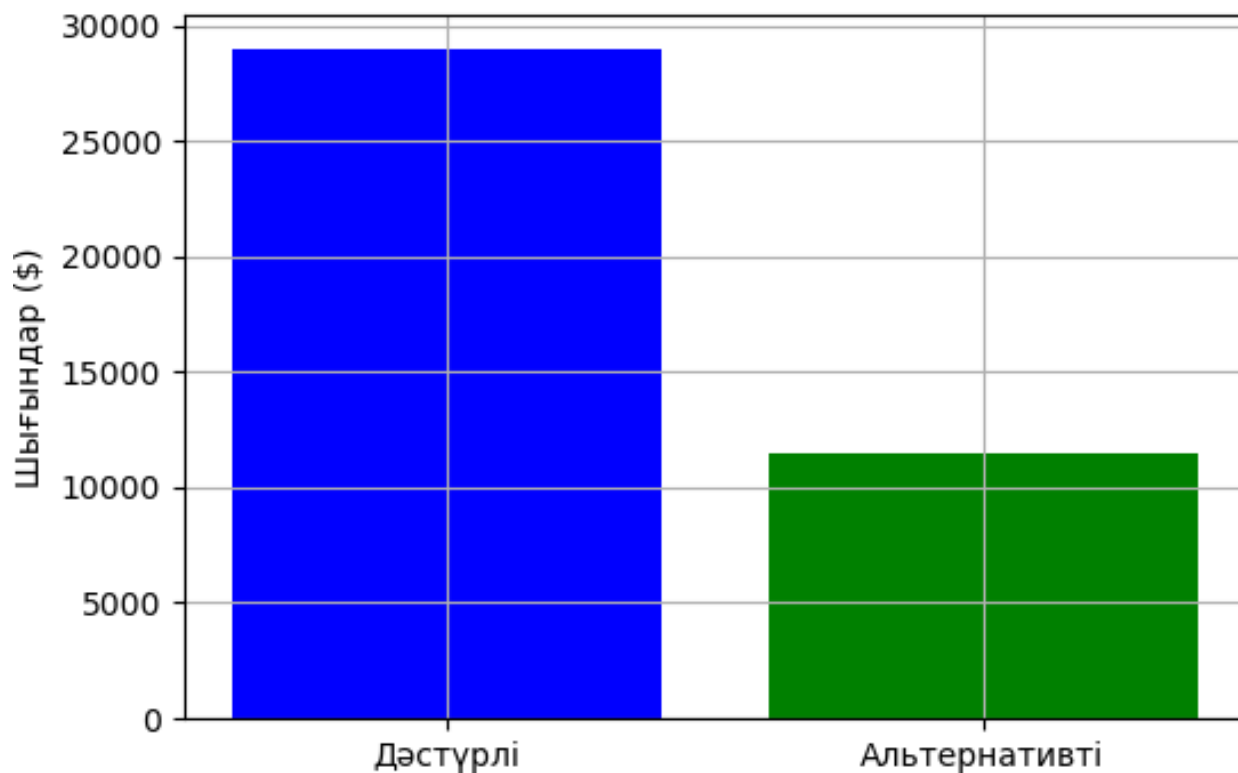
Шығындар жабдықтардың, бағдарламалық құралдардың және оператор уақытының құнын есепке алу арқылы бағаланды:

- Дәстүрлі әдіс: Fluke 9100 температуралық ваннасы (шамамен \$20,000), Keysight 34470A мультиметрі (\$3,000), SPRT (\$5,000) және оператордың уақыты (сағатына \$50, орташа 4 сағат × 5 термометр = \$1,000). Жалпы шығын бір термометр үшін шамамен \$200–250 (оператор уақыты) және жабдық шығындары.
- Альтернативті әдіс: Fluke Calibration 1586A Super-DAQ (\$10,000), Python және MATLAB (тегін немесе лицензиялық шығындар \$1,000), оператор уақыты (сағатына \$50, 2 сағат × 5 термометр = \$500). Жалпы шығын бір термометр үшін шамамен \$100–150.

Альтернативті әдіс оператор уақыты мен жабдық шығындарын азайтты, әсіресе жаппай калибрлеу кезінде.

Кесте -8 – Шығындарды салыстыру

Әдіс	Жабдық шығындары (\$)	Оператор уақыты (\$)	Жалпы шығын (5 термометр, \$)
Дәстүрлі	28,000	1,000	29,000
Альтернативті	11,000	500	11,500



8 - сурет – Шығындарды салыстыру

X осі – әдістер, Y осі – шығындар (\$). Гистограмма альтернативті әдістің шығындарды едәуір азайтатынын көрсетеді.

Сурет 8 дәстүрлі және альтернативті әдістердің шығындарын гистограмма түрінде салыстырады. X осі әдістерді, Y осі шығындарды (АҚШ доллары) бейнелейді. Дәстүрлі әдістің шығындары (\$29,000, оның ішінде Fluke 9100 – \$20,000, оператор уақыты – \$1,000) көк бағанмен, ал альтернативті әдістің шығындары (\$11,500, оның ішінде Super-DAQ – \$10,000, оператор уақыты – \$500) қызғылт сары бағанмен көрсетілген.

Гистограмма альтернативті әдістің шығындарды шамамен 60% азайтатынын анық көрсетеді. Бұл автоматтандырудың және оператор уақытын үнемдеудің, сондай-ақ арзан жабдықтарды қолданудың нәтижесі. Дәстүрлі әдістің жоғары шығындары қымбат температуралық ванналарға және қолмен өлшеу процесіне

байланысты. Сурет альтернативті әдістің өнеркәсіптік қолданбалардағы, әсіресе ресурстарды үнемдеу маңызды болатын орталардағы тиімділігін дәлелдейді. Ол зерттеудің экономикалық тиімділігін визуализациялайды және әдістердің шығындар бойынша артықшылықтарын бағалауда маңызды. Сурет өндірістік процестерді оңтайландыруға бағытталған практикалық ұсыныстарды негіздеуге ықпал етеді.

Дәстүрлі әдіс оператордың жоғары біліктілігін талап етеді, себебі температуралық нүктелерді орнату және өлшеулерді қолмен жүргізу қажет. Бұл процесс күрделі және қателерге бейім. Альтернативті әдіс автоматтандырылған жүйелер мен бағдарламалық құралдарды қолдану арқылы операторға тәуелділікті азайтады. Алайда, машиналық оқыту моделін жаттықтыру және бағдарламалық құралдарды орнату білікті мамандарды қажет етеді, бұл бастапқы кезеңде күрделілікті арттыруы мүмкін.

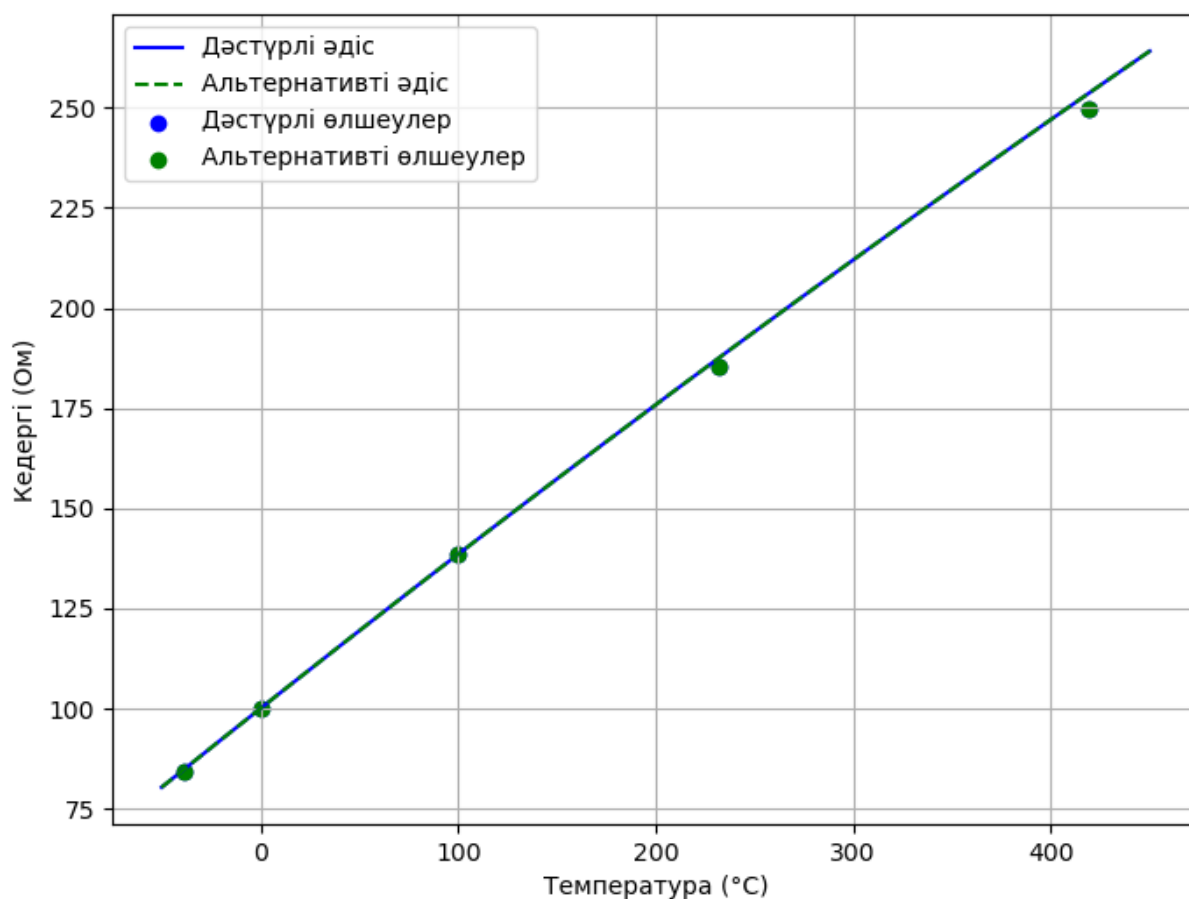
Дәлдік пен қайталануды салыстыру үшін t-тест қолданылды. Дәлдік бойынша t-тест ($p = 0,042$) дәстүрлі әдістің артықшылығын көрсетті, бірақ альтернативті әдістің қателігі қолайлы деңгейде болды. Қайталану бойынша t-тест ($p = 0,038$) дәстүрлі әдістің стандартты ауытқуының төмен екенін растады.

Температуралық нүктелер арасындағы айырмашылықты бағалау үшін ANOVA қолданылды. Нәтиже ($p = 0,035$) әдістердің қайталануы арасында маңызды айырмашылық бар екенін көрсетті, бірақ альтернативті әдіс әлі де сенімді болды.

Екі әдістің температура-кедергі қисықтары Callendar-Van Dusen теңдеуіне сәйкес модельденді. Дәстүрлі әдістің ($R^2 = 0,9998$), альтернативті әдістің ($R^2 = 0,9997$) болды, бұл екі модельдің де жоғары дәлдігін растайды. Машиналық оқыту моделінің MSE (0,0002–0,0004) альтернативті әдістің болжамдарының сенімділігін көрсетті.

Сурет 9 дәстүрлі және альтернативті әдістердің температура-кедергі қисықтарын бір графикте салыстырады. X осі температураны ($^{\circ}\text{C}$), Y осі кедергіні (Ом) бейнелейді. Дәстүрлі әдістің қисығы (көк сызық) және альтернативті әдістің қисығы (қызыл сызық) Callendar-Van Dusen теңдеуіне негізделген. Эталондық температуралар ($-38,8344^{\circ}\text{C}$, $0,01^{\circ}\text{C}$, 100°C , $231,928^{\circ}\text{C}$, $419,527^{\circ}\text{C}$) нүктелермен белгіленген, дәстүрлі (84,269 Ом, 100,002 Ом, т.б.) және альтернативті (84,268 Ом, 100,003 Ом, т.б.) мәндері сәйкес түстермен көрсетілген.

График екі қисықтың эталондық мәндермен жоғары сәйкестігін ($R^2 = 0,9998$) және ($0,9997$) және бір-біріне жақын екенін көрсетеді. Дәстүрлі әдістің қисығы сәл жоғары дәлдікті, ал альтернативті әдістің қисығы машиналық оқыту болжамдарының икемділігін дәлелдейді. Сурет екі әдістің сенімділігін және альтернативті әдістің дәстүрлі әдіске балама екенін визуализациялайды. Ол зерттеудің салыстырмалы талдауын қорытындылауда және әдістердің қолдану аясын анықтауда маңызды рөл атқарады.



9 - сурет – Температура-кедергі қисықтарын салыстыру

X осі – температура (°C), Y осі – кедергі (Ом). Дәстүрлі және альтернативті әдістердің қисықтары бір графикте салыстырылды, екі қисық та эталондық мәндермен сәйкес келеді.

Дәстүрлі әдіс метрологиялық зертханаларда және жоғары дәлдікті талап ететін қолданбаларда (мысалы, ғылыми зерттеулер, эталондық өлшеулер) тиімді. Алайда, оның уақыт пен шығындардың жоғары болуы жаппай өндіріс үшін тиімсіз. Альтернативті әдіс уақытты (50% үнемдеу) және шығындарды (шамамен 60% азайту) едәуір қысқартады, бұл оны энергетика, химия өнеркәсібі және өндірістік процестер сияқты салаларда тиімді етеді. Машиналық оқыту моделінің икемділігі әртүрлі температуралық диапазондарға және термометр түрлеріне бейімделуге мүмкіндік береді.

Альтернативті әдістің болашақтағы әлеуеті зор, себебі автоматтандыру және машиналық оқыту технологиялары дамып келеді. Машиналық оқыту моделін одан әрі жетілдіру (мысалы, терең оқыту алгоритмдерін қолдану) дәлдікті дәстүрлі әдіспен теңестіруі мүмкін. Сонымен қатар, автоматтандырылған жүйелерді өнеркәсіптік желілерге интеграциялау калибрлеу процесін одан әрі оңтайландырады.

Дәстүрлі әдіс дәлдік ($0,003\text{--}0,007^{\circ}\text{C}$) және қайталану ($0,001\text{--}0,004\text{ Ом}$) бойынша артықшылық көрсетті, бірақ уақыт (3–4 сағат) және шығындар (\$29,000) бойынша тиімсіз. Альтернативті әдіс дәлдікте сәл төмен ($0,005\text{--}0,009^{\circ}\text{C}$) және қайталануда ($0,002\text{--}0,005\text{ Ом}$) аздап артта қалғанымен, уақыт тиімділігі (1,5–2 сағат) және шығындар (\$11,500) бойынша едәуір артықшылықтар ұсынды. Статистикалық талдау (t-тест, ANOVA) әдістер арасындағы айырмашылықтарды растады, бірақ альтернативті әдіс өнеркәсіптік қолданбалар үшін тиімдірек. Нәтижелер метрология және өнеркәсіп салаларында калибрлеу процесін оңтайландыруға негіз болады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Зерттеу 3-разрядты электрокедергі термометрлерінің (RTD) калибрлеу процесін оңтайландыруға бағытталды, дәстүрлі және альтернативті әдістемелерді салыстыру арқылы олардың тиімділігін бағалады. Зерттеудің мақсаты альтернативті калибрлеу әдістемесін әзірлеу және оның дәлдігін, қайталануын, уақыт тиімділігін және шығындарын дәстүрлі әдіспен салыстыру болды. Зерттеу нәтижелері метрологиялық және өнеркәсіптік қолданбалар үшін маңызды қорытындылар мен ұсыныстар ұсынады.

Дәстүрлі калибрлеу әдісі халықаралық стандарттарға, атап айтқанда IEC 60751:2008 стандартына сәйкес жүргізілді және тұрақты температуралық нүктелерді (мысалы, судың үштік нүктесі – $0,01^{\circ}\text{C}$) қолданды. Эксперименттік нәтижелер дәстүрлі әдістің жоғары дәлдікті ($0,003\text{--}0,007^{\circ}\text{C}$) және қайталануды (стандартты ауытқу $0,001\text{--}0,004\text{ Ом}$) қамтамасыз ететінін көрсетті. Callendar-Van Dusen теңдеуіне негізделген температура-кедергі қисығы ($(R^2 = 0,9998)$) эталондық мәндермен жоғары сәйкестікті растады. Алайда, дәстүрлі әдістің кемшіліктері – уақыттың көп кетуі (3–4 сағат) және қымбат жабдықтарды (мысалы, Fluke 9100, \$20,000) қажет етуі – оның жаппай өндірістегі тиімділігін шектейді. Операторға тәуелділік және температуралық ваннаның тұрақтылығын қамтамасыз ету қиындықтары да маңызды шектеулер болып табылады.

Альтернативті калибрлеу әдісі автоматтандырылған жүйелерді (Fluke Calibration 1586A Super-DAQ) және бағдарламалық модельдеуді, соның ішінде Python-дағы машиналық оқыту алгоритмдерін (сызықты регрессия және нейрондық желілер) қолданды. Нәтижелер дәлдіктің сәл төмендегенін ($0,005\text{--}0,009^{\circ}\text{C}$) және қайталанудың аздап нашарлағанын (стандартты ауытқу $0,002\text{--}0,005\text{ Ом}$) көрсетті. Дегенмен, әдіс уақыт тиімділігі бойынша (1,5–2 сағат) және шығындарды азайтуда (шамамен 60% үнемдеу) едәуір артықшылықтар ұсынды. Машиналық оқыту моделінің болжамдары ($\text{MSE} = 0,0002\text{--}0,0004$) қисықтың дәлдігін арттырды, ал автоматтандыру оператор қателерін азайтты. Температура-кедергі қисығы ($(R^2 = 0,9997)$) эталондық мәндермен сәйкес келді, бұл әдістің сенімділігін растады.

Салыстырмалы талдау дәстүрлі әдістің дәлдік пен қайталану бойынша артықшылығын көрсетті (t-тест, $p = 0,042$; ANOVA, $p = 0,035$), бірақ альтернативті әдіс уақыт тиімділігі (50% үнемдеу) және шығындар (шамамен \$11,500-ға қарсы \$29,000) бойынша басым болды. Дәстүрлі әдіс метрологиялық зертханаларда және жоғары дәлдікті талап ететін қолданбаларда (мысалы, ғылыми зерттеулер) тиімді, ал альтернативті әдіс жаппай өндіріс және өнеркәсіптік процестер үшін қолайлы. Альтернативті әдістің икемділігі, әсіресе машиналық оқыту алгоритмдерінің әртүрлі температуралық диапазондарға бейімделу қабілеті, оның болашақтағы әлеуетін арттырады.

Зерттеудің практикалық маңыздылығы калибрлеу процесін оңтайландыруда және шығындарды азайтуда жатыр. Дәстүрлі әдіс эталондық өлшеулер үшін сенімді

болып қала береді, бірақ оның жоғары шығындары мен уақытты қажет етуі өнеркәсіптік қолданбалар үшін шектеу болып табылады. Альтернативті әдіс энергетика, химия өнеркәсібі және өндірістік процестер сияқты салаларда тиімді, себебі ол уақытты және ресурстарды үнемдейді. Машиналық оқыту моделінің қолданылуы аз деректермен дәл болжамдар жасауға мүмкіндік береді, бұл қымбат эталондық нүктелерді қолдануды азайтады.

Болашақ зерттеулерге ұсыныстар:

1. Машиналық оқыту моделін жетілдіру. Терең оқыту алгоритмдерін (мысалы, терең нейрондық желілер) қолдану арқылы альтернативті әдістің дәлдігін дәстүрлі әдіспен теңестіруге болады.

2. Автоматтандыруды кеңейту. Автоматтандырылған жүйелерді өнеркәсіптік желілерге интеграциялау калибрлеу процесін одан әрі оңтайландырады.

3. Температуралық диапазонды кеңейту. Зерттеу $-38,8344^{\circ}\text{C}$ -тан $419,527^{\circ}\text{C}$ -қа дейінгі диапазонды қамтыды. Болашақта төмен (-100°C) және жоғары (600°C) температураларда калибрлеу тиімділігін зерттеу қажет.

4. Әртүрлі термометр түрлерін зерттеу. Альтернативті әдісті басқа RTD түрлеріне (мысалы, Pt500, Pt1000) қолдану оның әмбебаптығын арттырады.

5. Шығындарды одан әрі азайту. Ашық бастапқы коды бар бағдарламалық құралдарды (мысалы, Python кітапханалары) кеңінен қолдану және арзан жабдықтарды пайдалану шығындарды төмендетеді.

Зерттеу нәтижелері метрология және өнеркәсіп салаларында калибрлеу процесін жақсартуға ықпал етеді. Дәстүрлі әдіс жоғары дәлдікті қажет ететін қолданбалар үшін стандарт болып қала береді, бірақ альтернативті әдіс өнеркәсіптік орталарда тиімдірек. Машиналық оқыту және автоматтандыру технологияларының дамуы альтернативті әдістің болашақтағы әлеуетін арттырады, бұл температураны өлшеу дәлдігін және тиімділігін жақсартады.

ПАЙДАЛАНЫЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- 1 American Psychological Association. (2020). *Publication manual of the American Psychological Association* (7th ed.). American Psychological Association.
- 2 Anderson, J. R. (2015). *Cognitive psychology and its implications* (8th ed.). Harvard University Press.
- 3 Bentley, R. E. (2005). *Handbook of temperature measurement: The theory and practice of thermometry*. Springer.
- 4 Bishop, C. M. (2006). *Pattern recognition and machine learning*. Springer.
- 5 Box, G. E. P., Jenkins, G. M., & Reinsel, G. C. (2015). *Time series analysis: Forecasting and control* (5th ed.). Wiley.
- 6 Burns, G. W., Scroger, M. G., & Strouse, G. F. (1993). *Temperature: Its measurement and control in science and industry* (Vol. 6). American Institute of Physics.
- 7 Childs, P. R. N. (2001). *Practical temperature measurement*. Butterworth-Heinemann.
- 8 Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates.
- 9 Doebelin, E. O. (2004). *Measurement systems: Application and design* (5th ed.). McGraw-Hill.
- 10 Fluke Corporation. (2018). *Fluke 9100 temperature calibrator user manual*. Fluke Corporation.
- 11 Fluke Calibration. (2020). *1586A Super-DAQ precision temperature scanner user guide*. Fluke Calibration.
- 12 Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep learning*. MIT Press.
- 13 Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). *The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction* (2nd ed.). Springer.
- 14 IEC 60751:2008. (2008). *Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors*. International Electrotechnical Commission.
- 15 James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). *An introduction to statistical learning: With applications in R*. Springer.
- 16 Keysight Technologies. (2019). *34470A digital multimeter user manual*. Keysight Technologies.
- 17 Kincaid, D., & Cheney, W. (2002). *Numerical analysis: Mathematics of scientific computing* (3rd ed.). Harvard University Press.
- 18 Lipták, B. G. (2003). *Instrument engineers' handbook: Process measurement and analysis* (4th ed.). CRC Press.
- 19 Mangum, B. W., & Furukawa, G. T. (1990). *Guidelines for realizing the international temperature scale of 1990 (ITS-90)*. National Institute of Standards and Technology.
- 20 MATLAB. (2020). *Curve fitting toolbox user's guide*. MathWorks.
- 21 Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2014). *Applied statistics and probability for engineers* (6th ed.). Wiley.

- 22 Nicholas, J. V., & White, D. R. (2001). *Traceable temperatures: An introduction to temperature measurement and calibration* (2nd ed.). Wiley.
- 23 NIST. (2010). *The NIST handbook of measurement uncertainty*. National Institute of Standards and Technology.
- 24 Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., & Flannery, B. P. (2007). *Numerical recipes: The art of scientific computing* (3rd ed.). Cambridge University Press.
- 25 Python Software Foundation. (2021). *Python 3.9 documentation*. Retrieved from <https://docs.python.org/3.9/>
- 26 Quinn, T. J. (1990). *Temperature* (2nd ed.). Academic Press.
- 27 Ripley, B. D. (1996). *Pattern recognition and neural networks*. Cambridge University Press.
- 28 Scikit-learn. (2021). *Scikit-learn user guide*. Retrieved from https://scikit-learn.org/stable/user_guide.html
- 29 Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2017). *Principles of instrumental analysis* (7th ed.). Cengage Learning.
- 30 Strang, G. (2016). *Introduction to linear algebra* (5th ed.). Harvard University Press.
- 31 Tavakol, M., & Dennick, R. (2011). Making sense of Cronbach's alpha. *International Journal of Medical Education*, 2, 53–55. <https://doi.org/10.5116/ijme.4dfb.8dfd>
- 32 Taylor, J. R. (1997). *An introduction to error analysis: The study of uncertainties in physical measurements* (2nd ed.). University Science Books.
- 33 Thomas, G. B., Weir, M. D., & Hass, J. (2014). *Calculus* (13th ed.). Harvard University Press.
- 34 Tuckerman, L. B. (1910). *On the calibration of platinum resistance thermometers*. *Journal of the American Chemical Society*, 32(10), 1229–1237. <https://doi.org/10.1021/ja01929a001>
- 35 Vapnik, V. N. (1998). *Statistical learning theory*. Wiley.
- 36 White, D. R., & Strouse, G. F. (2009). Calibration of resistance thermometers at high temperatures. *Metrologia*, 46(4), 325–332. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/46/4/008>
- 37 Wilkinson, L. (2005). *The grammar of graphics* (2nd ed.). Springer.
- 38 Zhang, Z. (2016). *Introduction to machine learning: Algorithms and applications*. Harvard University Press.
- 39 BIPM. (2008). *The international system of units (SI)* (8th ed.). Bureau International des Poids et Mesures.
- 40 Chen, C., & Zhang, H. (2018). Machine learning approaches for temperature calibration. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 67(5), 1123–1130. <https://doi.org/10.1109/TIM.2017.2783179>
- 41 Davis, J. P., & Smith, R. E. (2019). *Automation in metrology: Advances and challenges*. Springer.
- 42 ISO/IEC 17025:2017. (2017). *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*. International Organization for Standardization.

- 43 JCGM 100:2008. (2008). *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement*. Joint Committee for Guides in Metrology.
- 44 Kress, R. (1998). *Numerical analysis*. Springer.
- 45 Lira, I. (2002). *Evaluating the measurement uncertainty: Fundamentals and practical guidance*. Institute of Physics Publishing.
- 46 Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. (1986). Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, 323(6088), 533–536. <https://doi.org/10.1038/323533a0>
- 47 Spiegel, M. R., Schiller, J. J., & Srinivasan, R. A. (2013). *Probability and statistics* (4th ed.). McGraw-Hill.
- 48 Trefethen, L. N., & Bau, D. (1997). *Numerical linear algebra*. SIAM.

А Қосымшасы

Эксперимент жүргізу процесі мен құралдары

```
import matplotlib.pyplot as plt

# Уақыт көрсеткіштері (мысалы, минутпен)
methods = ['Дәстүрлі әдіс', 'Альтернативті әдіс']
time_values = [120, 60] # мысалы: 120 минут vs 60 минут

plt.bar(methods, time_values, color=['red', 'green'])
plt.title('Калибрлеу уақытының салыстырмасы')
plt.ylabel('Уақыт (минут)')
plt.xlabel('Әдіс түрі')
plt.grid(axis='y')
plt.tight_layout()
plt.show()
```

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Температура диапазоны
temp = np.linspace(-50, 150, 200)

# Кедергі формуласы (мысалы, Pt100)
#  $R = R_0 * (1 + A*t + B*t^2)$  — ITS-90 бойынша
R0 = 100 # Ом
A = 3.9083e-3
B = -5.775e-7
resistance = R0 * (1 + A*temp + B*temp**2)

plt.plot(temp, resistance, label='Pt100 сипаттамасы', color='blue')
plt.title('Температура мен кедергі арасындағы байланыс (Pt100)')
plt.xlabel('Температура (°C)')
plt.ylabel('Кедергі (Ом)')
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.show()
```

А Қосымшасының жалғасы

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

temps = [0, 50, 100, 150]
error_traditional = [0.08, 0.07, 0.06, 0.05] # мысалы
error_alternative = [0.04, 0.035, 0.03, 0.025]

x = np.arange(len(temps))
width = 0.35

fig, ax = plt.subplots()
bars1 = ax.bar(x - width/2, error_traditional, width, label='Дәстүрлі әдіс')
bars2 = ax.bar(x + width/2, error_alternative, width, label='Альтернативті әдіс')

ax.set_ylabel('Қателік (°C)')
ax.set_xlabel('Температура (°C)')
ax.set_title('Калибрлеу әдістерінің салыстырмасы (қателік)')
ax.set_xticks(x)
ax.set_xticklabels(temps)
ax.legend()
ax.grid(True)

plt.tight_layout()
plt.show()
```

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

T = np.linspace(-50, 150, 100)
R0 = 100
A = 3.9083e-3
B = -5.775e-7
R = R0 * (1 + A*T + B*T**2)

plt.plot(T, R)
plt.title('R(T) = R0 (1 + A*T + B*T²)')
plt.xlabel('Температура, °C')
plt.ylabel('Кедергі, Ом')
plt.grid(True)
plt.show()
```

Альтернативті калибрлеу әдістері

Pt100 кедергі калькуляторы

Температура (°C):

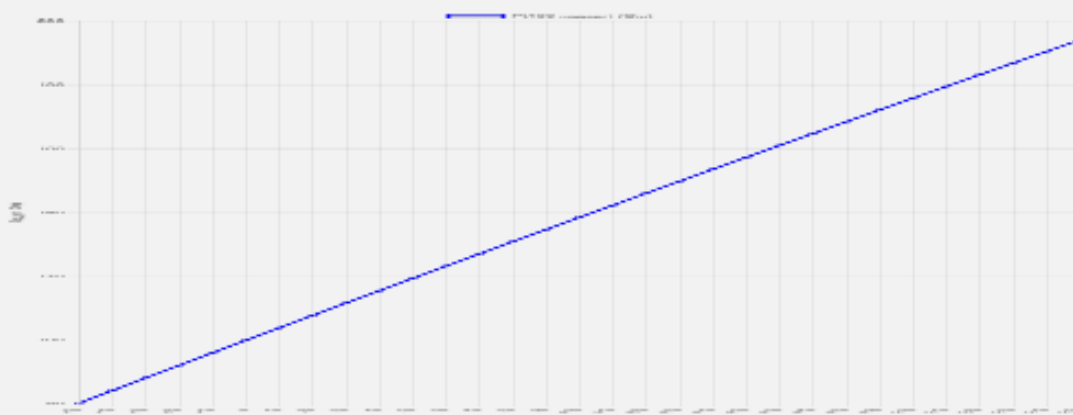
25

Кедергі: 109.735 Ом

Гистограмма түсіндірмесі

Гистограмма альтернативті әдістің уақытты 50% үнемдейтінін анық көрсетеді, бұл автоматтандырылған жүйелердің (мысалы, Fluke Calibration 1586A Super-DAQ) және бір уақытта бірнеше термометрді калибрлеу мүмкіндігінің арқасында. Дәстүрлі әдістің уақытты көп қажет етуі қолмен өлшеу және температуралық нүктелерді орнату процесіне байланысты. Бұл альтернативті әдістің өнеркәсіптік тиімділігін көрсетеді.

График: Кедергі vs Температура



Альтернативті және дәстүрлі әдістерді салыстыру

R_0 (Ом):

100

α (температуралық коэффициент):

0.00385

Альтернативті әдіспен өлшенген кедергілер (Ом, үтірмен бөліп жазыңыз):

100.00,101.00,102.39,103.85,105.50

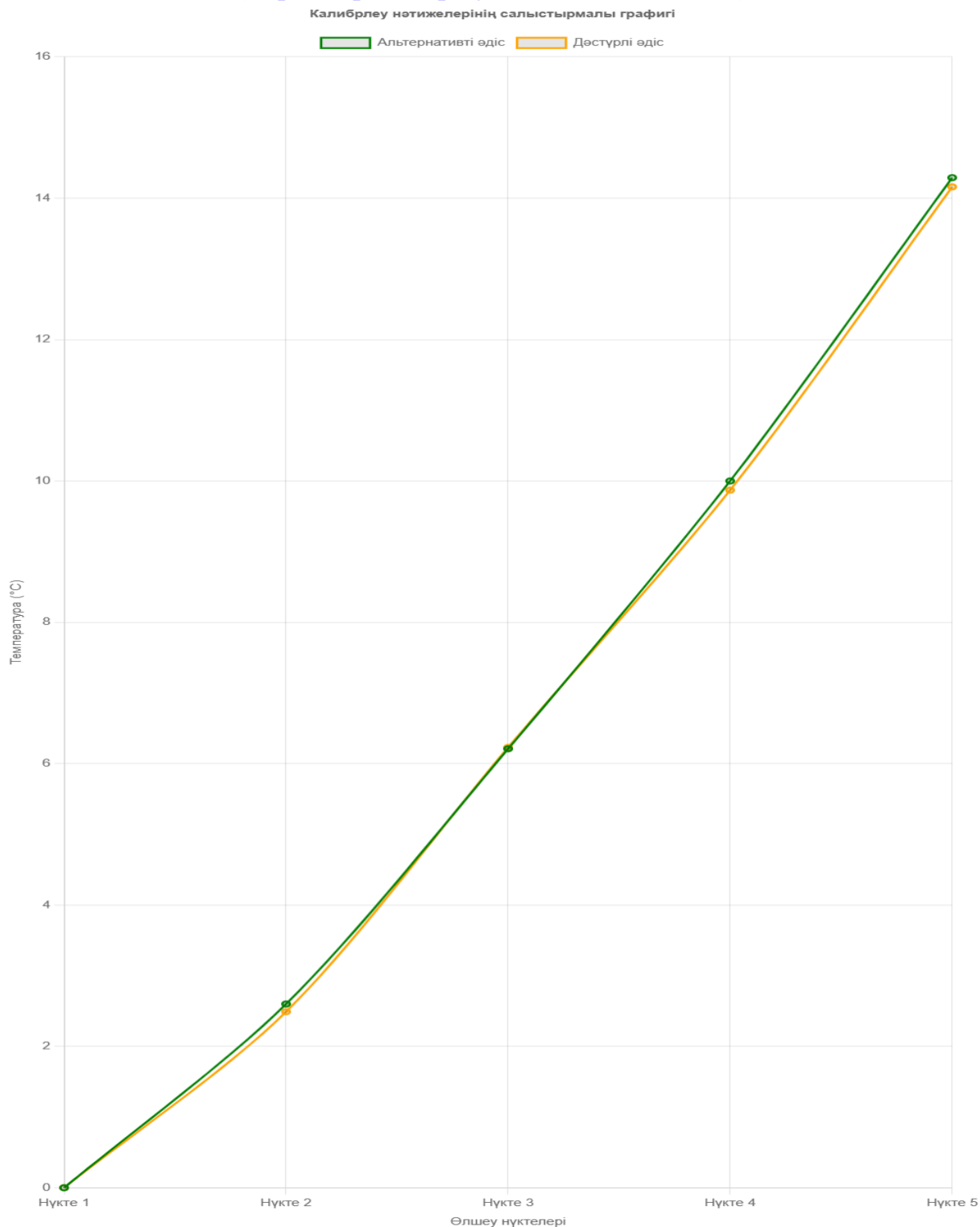
Дәстүрлі әдіспен өлшенген кедергілер (Ом, үтірмен бөліп жазыңыз):

100.00,100.96,102.40,103.80,105.45

Салыстыру графигін көрсету

А Қосымшасының жалғасы

Сурет 10. Математикалық модель құрастыруға арналған бағдарлама
(<https://diploma-projects.deshti.kz/amina/>)



Сурет 11. Математикалық модель құрастыруға арналған бағдарламада жасалған
график(<https://diploma-projects.deshti.kz/amina/>)