

**Aiym Leonidova\*** – PhD student in the specialty «Technical Physics», Shakarim University, Research School of Physical and Chemical Sciences, Department of Technical Physics and Heat Power Engineering, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: aiymleonidova1994@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2981-2041>.

**Ainur Zhassulan** – PhD student in the specialty «Technical Physics», Shakarim University, Research School of Physical and Chemical Sciences, Department of Technical Physics and Heat Power Engineering, Semey, Republic of Kazakhstan, Senior Researcher, Engineering Center; e-mail: ainur.99.99@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5887-0135>.

**Aibek Shynarbek** – PhD student, Engineering Center, Shakarim University, Semey, Kazakhstan; e-mail: Shinarbekov16@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2877-5178>.

**Zhangabay Turar** – Master's student in Physics, Sakarya University, Sakarya, Turkey; e-mail: turarjanabay@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6202-112X>.

Received 30.01.2026

Revised 12.03.2026

Accepted 17.03.2026

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2\(22\)-55](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-55)



FTAXP: 44.29.31; 44.31.29; 50.41.29

**А.Ж. Сағындықова<sup>1</sup>, Н.А. Заец<sup>2</sup>, Р.А. Жамашева<sup>3</sup>, Н.Н. Нұрғалиев<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Гумарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті,  
050013, Қазақстан Республикасы, Алматы, Байтұрсынов көшесі, 127

<sup>2</sup>Берлин қолданбалы ғылымдар университеті,  
10963, Германия, Берлин, Дессауэр көшесі, 3/5

<sup>3</sup>Алматы технологиялық университеті,  
050012, Қазақстан Республикасы, Алматы, Төле би көшесі, 100

<sup>4</sup>Шәкәрім университеті,  
071412, Қазақстан Республикасы, Семей, Глинка көшесі, 20

\*e-mail: n.nurgaliyev@shakarim.kz

## **ИНДУКЦИЯЛЫҚ ҚЫЗДЫРУ ЖҮЙЕЛЕРІНЕ АРНАЛҒАН ЖИІЛІК ТҮРЛЕНДІРГІШІН МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ ЖӘНЕ ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУЛЕР**

**Аңдатпа:** Мақалада ауыл шаруашылығы машина жасау, автомобиль өнеркәсібі және металл өңдеу сияқты әртүрлі салаларда индукциялық жылыту жүйелерін әзірлеу және қолдану талқыланады. Индукциялық қондырғылар мен дәстүрлі жылыту әдістерінің салыстырмалы талдауы келтірілген, олардың жоғары қыздыру жылдамдығы мен тиімділігі, процесті басқарудың жақсаруы және энергия тұтынудың төмендеуі сияқты артықшылықтары көрсетілген. Индукциялық қыздыру жүйелеріне арналған жиілік түрлендіргішінің математикалық моделі көп өлшемді айнымалылардың динамикасын сипаттайтын дискретті теңдеулер жүйесіне негізделген. Қолданыстағы тәсілдерден айырмашылығы, бұл модель жұмыс жиіліктерінің оңтайлы диапазонын ескереді, қуат транзисторларының санын азайтады және орнатылған қуатты ескереді, мұның бәрі жоғары энергия тиімділігін сақтайтынын байқатады. Зерттеу аясында бір фазалы және үш фазалы қуат көзімен 2-20 кГц диапазонында жұмыс істейтін прототиптік жиілік түрлендіргіші және 6 кВт индуктор әзірленіп, шығарылды. Эксперименттік зерттеулер ұсынылған модельдің жарамдылығын және оның нақты технологиялық жағдайларда қолданылуын растады. Жұмыстың практикалық маңыздылығы машина жасау мен ауылшаруашылық машиналарында оңтайлы индукциялық қыздыру технологияларын таңдау үшін әзірленген модель мен прототипті пайдалану мүмкіндігінде жатыр, осылайша сенімділіктің артуын, энергия тұтынудың төмендеуін және шығындардың төмендеуін қамтамасыз етеді. Нәтижелер ұсынылған модельдің жеткіліктілігін көрсетті және оның практикалық қолданылуын растады. Түрлендіргіш параметрлеріндегі өзгерістер оңтайлы индукциялық қыздыру режимін таңдауға айтарлықтай әсер ететіні көрсетілді, бұл білім беру мақсаттары үшін де, өнеркәсіптік енгізу үшін де практикалық маңызды.

**Түйін сөздер:** жиілік түрлендіргіштері, индукциялық қыздыру, транзисторлық модуль, үш фазалы түзеткіш, инвертор, IGBT индукциялық қыздыру жүйесі.

©А.Ж. Сағындықова, Н.А. Заец, Р.А. Жамашева, Н.Н. Нұрғалиев, 2026

## Кіріспе

Индукциялық қыздыру – металдарды және басқа да өткізгіш материалдарды қыздыру үшін электромагниттік индукцияны пайдалануға негізделген процесс. Индуктор тудыратын айнымалы магнит өрісіне ұшыраған кезде, материалда құйынды токтар пайда болады, бұл электр энергиясын жылу энергиясына айналдырады. Осылайша, жылу тікелей қыздырылған материалдың ішінде пайда болады, бұл жоғары қыздыру жылдамдығын қамтамасыз етеді және дәстүрлі термиялық өңдеу әдістерімен қол жеткізілетін тиімділіктен айтарлықтай жоғары [1, 2]. Осы артықшылықтарға байланысты индукциялық қыздыру жүйелері машина жасауда және ауылшаруашылық машиналарында кеңінен қолданылады, мұнда болат бөлшектерін қатайту және қалпына келтіру арқылы өңдеу өзекті міндет болып қала береді.

[3] мәліметтері бойынша, 2025 жылға қарай өнеркәсіптік қондырғылардың шамамен 70%-ы заманауи индукциялық жылыту жүйелері болады, олар вакуумдық түтік генераторларына, қозғалтқыш-генераторларға және тиристорлық түрлендіргіштерге негізделген ескірген жоғары жиілікті қондырғылармен салыстырғанда айтарлықтай жоғары тиімділікті көрсетеді. Заманауи индукциялық жүйелердің негізгі артықшылықтарына жоғары энергия тиімділігі, сенімділік, ықшамдылық, басқарудың қарапайымдылығы және әмбебаптылық жатады.

Бұл жұмыста біз математикалық модельдеу және мақсатты эксперименттер арқылы ауыл шаруашылығы техникасының болат бөлшектерін қатайту және қалпына келтіру бетін жабу параметрлерін таңдауды зерттейміз. Біздің тәсіліміз индукциялық қыздыру үшін оңтайлы жұмыс режимдері мен түрлендіргіш параметрлерін таңдаудың принциптік негізін қамтамасыз етеді. Металдарды индукциялық қыздыруға арналған жиілік түрлендіргішін (ЖТ) жобалауға ерекше назар аударылады, онда басқару драйверлерімен біріктірілген IGBT және MOSFET транзисторлық модульдері қолданылады. Өзірленген тізбек шешімдері қысқа тұйықталу токтарынан, шамадан тыс жүктемелерден және шамадан тыс температурадан қорғау жүйелерін қамтамасыз етеді, бұл жабдықтың сенімділігін арттырады [4].

Ұсынылған математикалық модель талдау кезеңінде хабардар шешімдер қабылдауға мүмкіндік береді және индукциялық жылытқыштарды пайдалануды оңтайландырады: пайдалану тиімділігін арттыру; тозуға төзімділік пен беріктікті арттыру (яғни, ұзақ қызмет ету мерзімі); үйкеліс коэффициенті сияқты көрсеткіштерге әсер ету; және бірлік құнын төмендету.

Бұл жұмыстың мақсаты – механикалық және ауылшаруашылық инженериясында қолдануға арналған жиілік түрлендіргіштері бар индукциялық жылытқыштарды өндіру технологиясын әзірлеу. Мұндай жүйелерге қойылатын негізгі талаптар: түрлендіргіштің қажетті жиілікті басқару диапазонын қамтамасыз ету; қуат транзисторларының санын азайту; құрылғының құнын төмендете отырып, жоғары тиімділікке қол жеткізу; және көрсетілген қыздыру процесінің параметрлеріне нұқсан келтірмей, жиілік түрлендіргішінің (немесе оның жеке компоненттерінің) орнатылған қуатын төмендету.

Бірқатар зерттеулерге сәйкес, индукциялық қыздыру термиялық өңдеудің ең тиімді әдістерінің бірі ретінде кеңінен қарастырылады және қазіргі уақытта өнеркәсіпте маңызды орын алады. Дәстүрлі қыздыру әдістерімен салыстырғанда, индукциялық қыздыру жүйесінің бірқатар маңызды артықшылықтары бар. Оларға жоғары тиімділік пен ықшамдылық жатады, бұл оларды өндіріс желілеріне біріктіруге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, индукциялық қыздыруды пайдалану операциялардың өнімділігін айтарлықтай арттыруға, сондай-ақ бөлшектердің бетінде термиялық күшейтілген қабаттардың пайда болуына мүмкіндік береді, бұл өнімдердің өнімділік сипаттамалары мен арнайы қасиеттерін жақсартады [5-6].

[7]-те атап өтілгендей, өнеркәсіптік кәсіпорындарда қолданылатын индукциялық жабдық генераторларының шамамен 70%-ы толығымен тозған, 20%-ында 50%-дан астам тозу бар, ал тек 10%-ында ғана 50%-дан аз тозу бар. Осыған байланысты, өнеркәсіптік кәсіпорындар қазіргі уақытта қызмет ету мерзімі аяқталған жабдықты жаңғырту және ауыстырудың маңызды міндетіне тап болып отыр. Бұл фактор машина жасау кешенінің тұрақты дамуы мүмкіндіктерін айтарлықтай шектейді, себебі көптеген жұмыс істеп тұрған қондырғылар тиімді пайдалануға жарамсыз.

Сонымен қатар, индукциялық қыздыру процестерін оңтайландыру мәселелері белсенді түрде зерттелуде [8], ең алдымен тұрақты және өтпелі жұмыс режимдеріндегі партиялық және үздіксіз қондырғыларға қатысты. Сонымен қатар, авторлар атап өткендей, энергия мен

ресурстарды үнемдеу міндеттері өзекті болып қала береді, оларды шешу жаңа жоғары өнімді және энергия үнемдейтін жабдықтарды енгізбей мүмкін емес.

Бұл бағыттың болашағы мынада: энергия ресурстарына, ең алдымен табиғи газға бағаның үнемі өсуі жағдайында индукциялық қыздыру экономикалық тиімділікке қол жеткізуге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, тек осы сектордағы индукциялық жабдықтар ғана дайындаманы зауыт контейнерінен ұстахана жұмыс орнына жылжытудың технологиялық процесін толық автоматтандыруға индукциялық қыздыру мүмкіндік береді, бұл ұста өндірісінің зиянды жағдайларында адамның қатысуын азайтады.

Зерттеулерде [9] ыстық штамптау арқылы дайындамаларды сериялық өндірумен машина жасау кәсіпорындарында индукциялық қыздыруды қолданудың артықшылықтары, сондай-ақ дәстүрлі газ пештерін индукциялық қыздырғыштармен ауыстырудың орындылығы келтірілген. Бұл зерттеулерде толық индукциялық қыздыруды да, жылу процестерін оңтайландыратын жалын-индукциялық аралас нұсқаны да пайдалану мүмкіндігі қарастырылды.

[10] зерттеулерінде дайындамаларды кейінгі қысыммен өңдеу алдында шамамен 1250°C температураға дейін қыздыруға арналған автоматты желілерге біріктірілген мамандандырылған жоғары жылдамдықты индукциялық қондырғыларды (қуаты 5-8 т/сағ) өнеркәсіптік әзірлеу кезінде негізгі міндет қажетті энергия параметрлерін сақтай отырып, олардың жалпы өлшемдерін азайту екендігі атап өтілген. Бұл мәселені шешу үшін дайындамаларды қыздыру блоктары арқылы үздіксіз беруді қамтитын индукциялық қыздыру жүйесін (IHS) пайдалану ұсынылады. Сонымен қатар, бұл зерттеулер металлургия өнеркәсібінде индукциялық қыздыруды қолдануды, атап айтқанда, тотықсыздандыру және калибрлеу операциялары алдында құбырлы дайындамаларды термиялық өңдеу үшін индукциялық қыздырғыштарды пайдалануды талдайды.

[11] зерттеулерінде газ пештерімен салыстырғанда индукциялық қондырғылардың бірқатар маңызды артықшылықтары бар екені атап өтілген: олардың ұзындығы бойынша жалпы өлшемдері 5-6 есе кіші, бұл технологиялық желілердің құрамына интеграциялауды жеңілдетеді; Олар жоғары сенімділікпен, жұмысқа үнемі дайындықпен және жедел іске қосудымен сипатталады; олар іс жүзінде қақ түзілуін болдырмайды; сондай-ақ қыздыру режимдерін қолдау мен өзгертуді автоматтандыруды және оларды тотықсыздандырығыш диірмен мен онымен байланысты қондырғылардың жұмыс режимдерімен үйлестіруді жеңілдетеді. Бұл жұмыстарда прокат өнімдерін термиялық өңдеу мәселелеріне ерекше назар аударылады, мұнда индукциялық қыздыруды пайдалану жалын және электр пештеріне қарағанда айтарлықтай артықшылықтарды көрсетеді. Бұл жағдайда тікелей қыздырғыштар да қолданылады.

Авторлар [12] атап өткендей, жобалау ақпаратын алу мақсатында толық көлемді эксперименттер жүргізу қиын және экономикалық тұрғыдан тиімсіз. Мұндай жағдайларда ағынды индукциялық жылытқыштардың жоғары сапалы жобалануын қамтамасыз ету тек қыздыру процестерінің дәлірек математикалық модельдері арқылы ғана мүмкін болады.

Деректерге сәйкес [13-15], индукциялық қыздырудың рөлі әсіресе қалыңдығы 20-50 мм болатын ауылшаруашылық жұқа плиталарға арналған соңғы құю желілерінде қолданылған кезде артады. Бұл жағдайда индукциялық қыздыру прокат станының кедір-бұдыр және әрлеу тіректерінің арасындағы аралық ролик үстелдеріндегі жұқа плиталардың немесе прокат жолақтарының шеттерін алдын ала қыздыру үшін өте тиімді болып табылады.

### **Материалдар мен әдістер**

#### *Мәселенің қойылуы және зерттеу әдістері*

Ауыл шаруашылығы машина жасау, автомобиль жасау, аэроғарыш және металл өңдеу салаларын қоса алғанда, әртүрлі салаларда индукциялық қыздыру технологияларын тиімді дамыту тек ұйымдастырушылық қана емес, сонымен қатар қаржылық қолдауды да қажет етеді. Атап айтқанда, қазіргі заманғы талаптарға сай келетін FC бар индукциялық жылытқыштарды өндіру технологияларын әзірлеуге инвестиция салу өзекті міндет болып табылады.

Бұл талаптарға мыналар жатады: FC қажетті жиілікті басқару диапазонын қамтамасыз ету, қуат транзисторларының санын азайту, бірлік құнын төмендете отырып, жоғары тиімділікке қол жеткізу, сондай-ақ қыздыру процесінің көрсетілген параметрлерін сақтай отырып, бүкіл құрылғының немесе оның жеке элементтерінің орнатылған қуатын азайту.

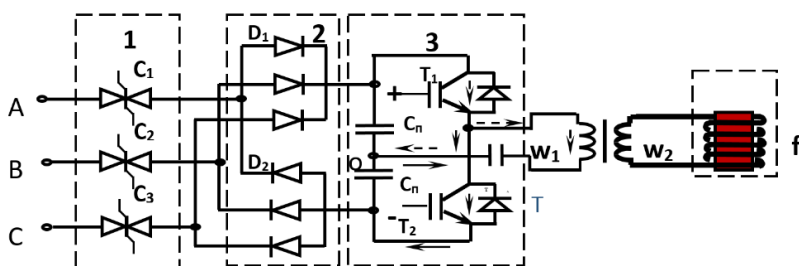
Мәселені шешу индукциялық қыздыру технологиясының оңтайлы параметрлерін талдау және таңдауға негізделген әртүрлі тәсілдерді қолдану арқылы мүмкін болады. Бұл мақалада осы мақсатта қажетті жиілікті басқару диапазонын қамтамасыз ететін, қуат транзисторларының санын оңтайлы таңдауды, жоғары тиімділікті және жиілік түрлендіргішінің орнатылған қуатын азайта отырып, төмен шығындарды қолдайтын құралдар жиынтығы қолданылады.

Бұл жұмыста индукциялық қыздыру технологиясының оңтайлы параметрлерін таңдау мәселесін шешу үшін бірқатар зерттеу әдістері қолданылды. Аналитикалық әдіс ғылыми және техникалық әдебиеттерді зерттеу, сондай-ақ сәйкес басқару драйверлері бар IGBT және MOSFET транзисторлық модульдері негізінде жасалған жиілік түрлендіргішінің жұмыс істеу ерекшеліктері мен дизайнын талдау үшін қолданылды. Дискілі тырманың, соқаның, культиватордың табанының және қашауының кесу жиегінің бетін жабу кезіндегі, сондай-ақ астық жинау комбайндарының кесу аппаратының топсалы пышақтарын, саусақтарын және сегменттерін қатайту кезіндегі өзара әрекеттесу динамикасын ескере отырып, оңтайлы модельді таңдау және жиілік түрлендіргішінің параметрлерін бағалау үшін ойын теориясы әдістері қолданылды. Сонымен қатар, бірқатар өнеркәсіптік процестердегі технологиялық параметрлердің әсерін математикалық модельдеу және талдау әдістері қолданылды: штамптау үшін металдарды индукциялық қыздыру, индукциялық тигель пештерінде металдарды балқыту, көлемді ыстықтай қатайту, құбырлар мен резервуарларда майды қыздыру, астықты индукциялық кептіру, сұйық ортаны қыздыру, ағаш пен жабындарды кептіру, сондай-ақ құрғақ сүт өндіру.

Біз бір фазалы немесе үш фазалы кернеу көзінен қуат алған кезде 2-ден 20 кГц-ке дейінгі жиілік диапазонында жұмыс істейтін, қуаты 6 кВт болатын жиілік түрлендіргіші мен индукторының прототипін, сондай-ақ оның жұмысының әзірленген математикалық моделін ұсынамыз. Қондырғының электр тізбегіне жоғары жиілікті электр энергиясын жылу энергиясына түрлендіретін индуктор (I); кернеуді қажетті деңгейге дейін төмендететін трансформатор (Tr); және жиілік түрлендіргішіне (FC) біріктірілген түзеткіш пен инвертор кіреді. Сонымен қатар, индуктор параметрлерінің дайындамамен және жоғары жиілікті инвертормен үйлесімділігін қамтамасыз ететін шығыс трансформаторы қолданылады, ал оның массалық-өлшемдік сипаттамалары дәстүрлі шешімдермен салыстырғанда бірнеше есе төмендейді.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы жиілік түрлендіргішінің жұмыс жиілік диапазонын негіздеу және таңдауда жатыр. Тоқ жиілігін азайту қуат элементтерінің санын және түрлендіргіштің массасы мен өлшемдерін азайтуға мүмкіндік беретіні, бірақ бұл металды қыздыру уақытының ұлғаюымен қатар жүретіні көрсетілген. Ұсынылған математикалық модель бізге бұл ымыраны сандық бағалауға және әртүрлі технологиялық жағдайлар үшін индукциялық қыздырғыштың жұмыс режимінің оңтайлы параметрлерін анықтауға мүмкіндік береді.

1-суретте индукциялық қыздырғышы бар жиілік түрлендіргішінің электр тізбегі көрсетілген, мұндағы: 1-кірісті триактар, 2-үш фазалы түзеткіш, 3-инверторлар. Инвертордың белгілі бір ерекшелігі бар, ол екі IGBT транзисторына орнатылған. Жиілік түрлендіргіштерінде микропроцессорлық басқару жүйесімен бірге жоғары коммутация жиілігі бар IGBT транзисторларын пайдалану тиристорлық түрлендіргіштерге тән жоғары гармоника деңгейін төмендетеді. Нәтижесінде қосымша жүктемелер азаяды, индуктордың қызуы төмендейді және пульсациялар азаяды.



Сурет 1 – Үш фазалы қуат көзі бар индукциялық қыздырғыштың жиілік түрлендіргішінің электрлік диаграммасы

**1-қадам.** Шығу қуаты бірдей тиристорлық түрлендіргіштермен салыстырғанда, IGBT транзисторлық түрлендіргіштері өлшемі бойынша кішірек, салмағы бойынша жеңіл және электрондық қосқыштардың модульдік дизайнына, модуль бетінен жылудың жақсы таралуына және құрылымдық элементтер санының аз болуына байланысты сенімділігі жоғары. [18]. Индукциялық қондырғыларда IGBT транзисторларын пайдаланудағы кедергілердің бірі – аса жоғары жиіліктерде пайдаланудың шектелуі. 75-100 кГц-тен жоғары жиілікте ауысқан кезде IGBT өз мүмкіндіктерінің шегінде жұмыс істейтіні және құрылғының, демек, түрлендіргіштің істен шығу ықтималдығы жоғары екені белгілі. MOSFET транзисторлары жоғары жиіліктерде жұмыс істей алады. Үш фазалы түзеткіш желіден айнаымалы кернеуді тұрақты кернеуге түрлендіруге арналған, ал инвертор тұрақты токты жоғары жиілікті айнаымалы токтың айнаымалы кернеуіне түрлендіреді.

**2-қадам.** Кіріс тиристорлары (1-блок) жиілік түрлендіргішін желіге байланыссыз қосуға ғана емес, сонымен қатар кіріс кернеуін реттеуге де арналған. Индукциялық қыздырғышты пайдаланған кезде шамамен әрбір 30 минут сайын жиілік түрлендіргішін желіден ажырату қажет, ал қыздырылған металл (дайындама) штамптау үшін индуктордан алынады. Әрі қарай, жаңа дайындаманы индукторға салып, жиілік түрлендіргішін желіге қосыңыз. IGBT T1 және T2 транзисторларынан (1-сурет) құрылған жартылай көпірлі инвертор тұрақты ток кернеу көзіне қосылған, ал бөлінген тұрақты ток байланысы бар  $C_p$  конденсаторлары (төменгі және жоғарғы) қоректендіру кернеуін екі тең бөлікке бөлуге арналған.  $C$  конденсаторы шығыс кернеуінің сапасын жақсарту және тізбектей резонансқа қол жеткізу үшін инвертордың шығыс тізбегіне қосылған.

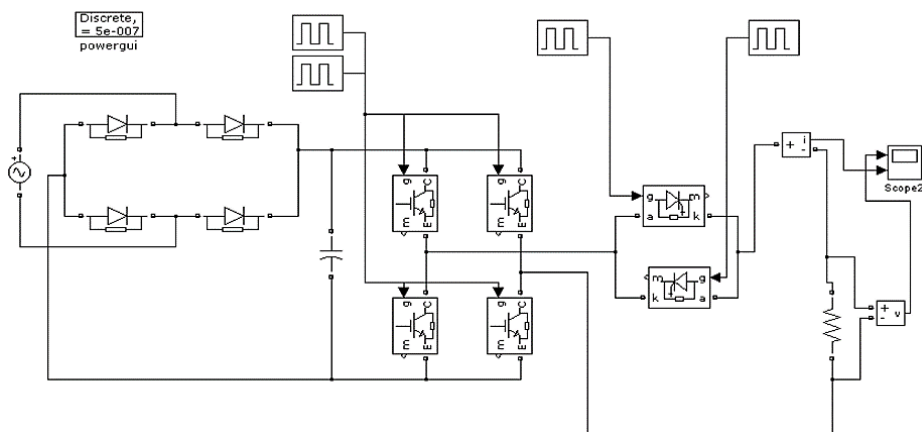
**3-қадам.** Инвертор шығысында кернеудің оң жартылай периодын қалыптастыру үшін T1 транзисторы ашылып, T2 транзисторы жабылады, кернеу көзінен келетін тұрақты ток T1 транзисторы және трансформатордың бастапқы орамасы арқылы өтеді. Инвертор шығысында теріс жартылай периодты қалыптастыру үшін T2 транзисторы ашылып, T1 транзисторы жабылады, ал кернеу көзінен келетін тұрақты ток T2 транзисторлары және трансформатордың бастапқы орамасы арқылы кері бағытта ағады.

Осылайша, инвертор шығысында сатылы кернеу пайда болады. Индуктордағы сатылы кернеудің жиілігі транзисторлардың ауысу жиілігімен анықталатынын және бірнеше килогерцке жетуі мүмкін екенін атап өткен жөн.

Қуат транзисторларының минималды саны бар инвертордың жұмыс режимі индуктордағы токтың жиілік диапазонын арттырады және олардың энергия өнімділігін жақсартады, сонымен қатар сенімділікті арттырады және жабдықтың құнын төмендетеді.

**4-қадам.** Үш фазалы түзеткіштің 2 көпір тізбегі тиристорлардың шығысына қосылған (1-сурет). Белгілі болғандай, үш фазалы түзеткіштің көпір тізбегі ең төменгі шығыс кернеуінің пульсациясын қамтамасыз етеді.

MatLab ортасы қуат түрлендіргіштерінің әртүрлі жұмыс режимдерін сандық модельдеуге кең мүмкіндіктер береді. Зерттеудің бөлігі ретінде авторлар таза белсенді жүктеме жағдайында бір фазалы транзистор-тиристорлық инверторды модельдеді (2-сурет).



Сурет 2 – Бір фазалы транзистор-тиристор жиілік түрлендіргішін модельдеудің құрылымдық диаграммасы

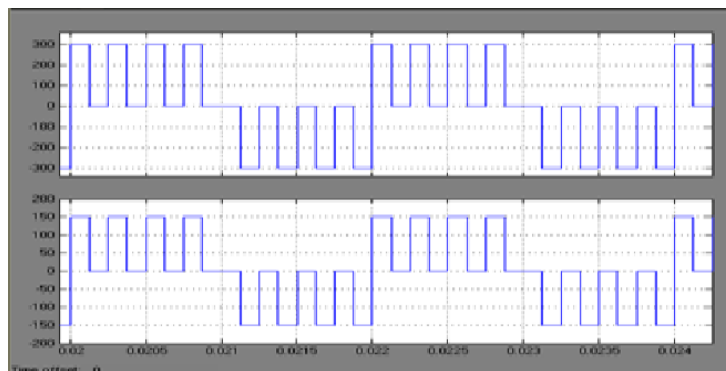
## Нәтижелер және талқылау

Үш фазалы түзеткіш көпір тізбегінде басқарылмайтын диодтар  $D_1 - D_6 - D_3 - D_2 - D_5 - D_4$   $60^\circ$  ығысумен тізбектей ашылады, ал  $D_1, D_3$  және  $D_5$  диодтары оң,  $D_6, D_2$  және  $D_4$  диодтары теріс жартылай периодтарда ашылады. Әрбір диодтың өткізгіштік аралығы  $120^\circ$ , кез келген сәтте екі диод ашық (әр көпір иінінде біреуден) және жүктемедегі кернеу фазалық кернеулердің айырмашылығымен, яғни желілік кернеумен анықталады. Синусоидалы желілік кернеуі бар жүктемедегі кернеудің орташа мәні келесі түрге ие:

$$U_{mid} = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} U_m \sin \frac{\pi}{6} \cos \alpha = 1,35 U_L \cos \alpha = 2,34 U_\phi \cos \alpha \quad (1)$$

Қайда  $U_L = \sqrt{3} U_F$  – трансформатордың екінші реттік орамасының желілік кернеуінің тиімді мәні.

Модельдеу нәтижелері таза белсенді жүктеме кезінде шығыстағы кернеу мен ток тұрақты пішінге ие екенін көрсетті, бұл транзисторлық-тиристорлық жиілік түрлендіргішінің жұмыс принципінің дұрыстығын растайды. 3-суретте белсенді-индуктивті жүктеме үшін модельдеу нәтижелері көрсетілген. Бұл жағдайда кернеу мен ток толқынының формасы бұрмаланған және кернеудің күрт өзгеруі байқалады, бұл транзисторлық-тиристорлық жиілік түрлендіргішінің жұмысына теріс әсер етеді.



Сурет 3 – Таза белсенді жүктемесі бар транзисторлық-тиристорлық жиілік түрлендіргішін модельдеу нәтижелері

Жылумен жабдықтаудың жанасу әдісімен белгілі бір қалыңдықтағы металды қыздыру, бір қабаттың қалыңдығынан асып түссе де, салыстырмалы түрде баяу жүреді, бұл жағдайда жылу беру коэффициентінің мәні ұқсас көрсеткіштің мәнінен айтарлықтай асып түседі. Бұл жылу берудің жанасу әдісін қолдану тиімділігін анықтайды.

Мәселенің тұжырымы, мысалы:

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + Q(z, t) = 0 \\ \theta(z, 0) = \theta^0 \end{cases} \quad (2)$$

Осы жерден  $\theta(z, t) = \theta_z - \theta_{\Gamma\Pi}$

Есепті шешу үшін жалпыланған функциялар теориясының аппараты қолданылады:

$$\theta'(z, t) = \theta(z, t)H(t), \quad (3)$$

Қайда  $H(t)$  Хейвисайд функциясы болып табылады

Хейвисайд функциясы басқару теориясы мен сигналдарды өңдеу теориясының математикалық аппаратында белгілі бір уақытта бір күйден екінші күйге өтетін сигналдарды көрсету үшін кеңінен қолданылады. Математикалық статистикада бұл функция, мысалы, эмпирикалық таралу функциясын жазу үшін қолданылады. Екінші ретті дербес туындыны шешейік.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta'}{\partial t} - a^2 \frac{\partial^2 \theta'}{\partial z^2} &= \frac{\partial \theta}{\partial t} H(t) + \theta^0(z) \cdot \delta(t) - a^2 \frac{\partial^2 \theta'}{\partial z^2} H(t) = \\ &= H(t)Q(z, t) + \theta^0(z) \cdot \delta(t) \end{aligned} \quad (4)$$



Жылу өткізгіштік теңдеуін жалпыланған функцияларда жазайық

$$\frac{\partial \theta'}{\partial t} - a^2 \frac{\partial^2 \theta'}{\partial z^2} = H(t)Q(z, t) + \theta^0(z) \cdot \delta(t) \quad (5)$$

Біз (4) теңдеудің шешімін теңдеудің оң жағын белгілі негізгі шешіммен, жылу өткізгіштік теңдеуімен иіру түрінде іздейміз.

$$\theta'(z, t) = U(z, t) * H(t)Q(z, t) + U(z, t) * \theta^0(z) \quad (6)$$

Осы жерден

$$\theta^1(z, t) = H(t) \int_0^t d\tau \int_0^l U(x - y, t - \tau) \theta(y, \tau) dy + \int_0^l U(x - y) \theta^1(y) dy \quad (7)$$

Осылайша, ұсынылған модель көп өлшемді айнымалылардың динамикасын сипаттайды және индукциялық қыздырудың жұмыс элементтерінің оңтайлы параметрлері мен жұмыс режимдерін ескере отырып, оның тиімділігі мен ең маңызды факторлар арасындағы байланысты орната отырып, процестің жеңілдетілген моделін құру мәселесін қарастыруға мүмкіндік береді. Зерттеу барысында артықшылықты параметрлер комбинациялары анықталды және көп айнымалылы эксперименттік жобалауға негізделген оңтайлы ресурстарды бөлу стратегиялары анықталды.

Орындалған жұмыстың артықшылығы – сызықтық бағдарламалау есептерін шешу және еркін мүшелері бар регрессиялық теңдеулерді құру сияқты элементтерді ескеруге мүмкіндік беретін математикалық модельді пайдалану. Жүргізілген тексеру ұсынылған модельдің жеткіліктілігін растады, бұл оны модельдеу режимінде қолдану мүмкіндігін қамтамасыз етеді және нәтижелерді зерттеліп жатқан процестердің нақты жұмыс істеу жағдайларына жақындатады.

Сонымен қатар, зерттеудің әлсіз тұсы қатаю кезінде индукциялық қыздыру процестерімен байланысты қауіп факторларын одан әрі талдау қажеттілігі болып қала береді. Айта кету керек, бұл процесс өнімнің беткі қабатын тез қыздыруды қамтамасыз етеді, тұтқыр өзекті сақтай отырып, жоғары беттік қаттылыққа қол жеткізуге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, беттік индукциялық қатаю бөлшектерді қатаюдың басқа әдістерімен салыстырғанда жылдамырақ және үнемдірек [19].

Зерттеу аясында жиілік түрлендіргішінің прототипі, сондай-ақ бір фазалы немесе үш фазалы қоректену кезінде 2-ден 20 кГц-ке дейінгі жиілік диапазонында жұмыс істейтін 6 кВт индуктор әзірленіп, жасалды. Металл дайындамаларды индукциялық қыздыруға арналған жиілік түрлендіргішінің прототипінің тәжірибелік сынақтары нақты жұмыс жағдайларында жүргізілді. Тәжірибенің мақсаты қыздыру тиімділігін бағалау және жиілік түрлендіргішінің ұсынылған математикалық моделінің жарамдылығын растау болды. 4-суретте диаметрі 44 мм және ұзындығы 80 мм цилиндрлік дайындаманы индукциялық қыздыру процесі көрсетілген.

Жылумен жабдықтаудың жанасу әдісі белгілі бір қалыңдықтағы металды қыздыруда тиімді, себебі жылу беру коэффициенті салыстырмалы түрде жоғары. Бұл тәсіл артықшылықты параметрлер комбинацияларын анықтауға және көп айнымалы эксперименттік жобалауға негізделген ресурстарды бөлу стратегияларын ұсынуға мүмкіндік береді.

Эксперименттік нәтижелер сипаттамалық түрде берілгенімен, модельдің сандық дәлдігін бағалау үшін жеткілікті емес: өлшеу құралдарының қателігі, тәжірибелер саны және стандартты ауытқулар көрсетілмеген. Модель мен тәжірибе арасындағы сәйкестік тек сапалық тұрғыда – қыздыру үрдісінің пішіні мен жылдамдығы бойынша -ға расталған. Сандық растау үшін бірнеше тәуелсіз сынақ жүргізу, әртүрлі ток амплитудасы мен жиілігі үшін модельдің болжамын тәжірибелік деректермен салыстыру (мысалы, RMSE немесе пайыздық ауытқулар арқылы) және статистикалық талдау жасау қажет. Осы тәсіл ұсынылған модельдің нақты жұмыс жағдайында қаншалықты дәл болатынын сандық тұрғыда бағалауға мүмкіндік береді.

Зерттеу аясында жиілік түрлендіргіштің прототипі, сондай-ақ 2-20 кГц жиілік диапазонында жұмыс істейтін 6 кВт индуктор әзірленіп, тәжірибелік сынақтардан өтті. Металл дайындамаларды қыздыру нәтижелері ұсынылған математикалық модельдің жарамдылығын және оңтайлы жұмыс режимдерін таңдауға мүмкіндікті растады.

Ұсынылған модель аналитикалық және ықшам, ал көптеген белгілі модельдер сандық FEM-модельдер болып табылады; сонымен қатар бұл модель жиілік түрлендіргішінің электрлік режимдері мен индукциялық қыздырудың жылулық процестерін бір жүйеде қарастырады (кесте 1).

Кесте 1 – Ұсынылған математикалық модель мен қолданыстағы модельдердің айырмашылығы

| Салыстыру критерий                       | Қолданыстағы модельдер (FEM және сандық әдістер)                      | Ұсынылған математикалы модель                                                         |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Модельдеу әдісі                          | Соңғы элементтер әдісі (FEM), толық сандық модельдеу                  | Аналитикалық модель, жалпыланған функциялар теориясы қолданылған                      |
| Процестерді сипаттау                     | Көбінесе электровибраторік және жылулық процестер бөлек қарастырылады | Электрлік режимдер мен жылулық процестер бір модельде кешенді қарастырылады           |
| Бастапқы және шекаралық шарттарды енгізу | Классикалық сандық әдістер арқылы                                     | Хевисайд функциясы және $\delta$ -функция арқылы енгізіледі                           |
| Есептеу күрделілігі                      | Жоғары, үлкен есептеу ресурстарын қажет етеді                         | Қысқа, инженерлік есептеулер үшін тиімді                                              |
| Параметрлерді оңтайландыру               | Көп жағдайда күрделі сандық оптимизация қажет                         | Регрессиялық теңдеулер және көп факторлы жоспарлау арқылы оңтайландыруға болады       |
| Практикалық қолдану                      | Нақты физикалық процестерді жоғары дәлдікпен модельдеу                | Индукциялық қыздыру жүйесінің жұмыс режимдерін жедел бағалау және параметрлерді таңда |

Индукциялық қыздыру процесінің басында температураның біркелкі емес таралуы байқалды: дайындаманың орталық бөлігінде температура оның шеттеріндегіден төмен болды. Бұл электромагниттік өрістің өну тереңдігінің шектеулі болуына байланысты, бұл төмен ток жиілігін таңдау қажеттілігін көрсетеді, дегенмен бұл металды қыздыру уақытын арттырады [29]. Тәжірибелік нәтижелер көрсеткендей, жиілік түрлендіргішінің дайындаманы 600-650°C температураға дейін қыздыру уақыты 8 кГц жиілікте 3,5 минут және 10 кГц жиілікте 2,41 минут болды (4-сурет). Транзисторлардың қызып кетуі байқалмады, бұл жұмыс талаптарына сәйкес келді [20].



Сурет 4 – Сыналып жатқан индукциялық қыздырғыш

#### 1-есептің шешімі

Индукциялық қыздырғыштың көрсетілген көппараметрлі есебінің шешімі металды 731°C температураға дейін қыздыру процедурасын анықтайтын параметрлердің қатынасына байланысты (5-сурет).



Сурет 5 – Металды 731°C температураға дейін индукциялық қыздыру процесі  
Тәжірибе барысында трансформатордың бастапқы тізбегінде конденсаторсыз инвертор



шығысындағы кернеудің осциллограммалары алынды. Нәтижелер шығыс кернеуінің толқындық формасының айқын тербелмелі көрініске ие екенін көрсетті, бұл транзисторлардың белсенді режимде жұмыс істеп тұрғанын көрсетеді. Мұндай жағдайларда олар қатты қызады, бұл сайып келгенде істен шығуға әкелуі мүмкін. Транзисторларды кілттік режимге ауыстыру және шығыс кернеуінің сапасын жақсарту үшін тізбектей резонанстық жұмысты қамтамасыз ететін инвертор шығыс тізбегіне С конденсаторын тізбектей қосу қажет.

Сонымен қатар, С конденсаторының оңтайлы мәнін эксперимент арқылы таңдау шығыс кернеуінің сапасын арттыруды ғана емес, сонымен қатар тізбектей резонансқа қол жеткізуді де қамтамасыз ететіні анықталды. Бұл жағдайда инвертордың белсенді қуаты тікелей индукторға, яғни қыздырылған дайындамаға беріледі.

Ұсынылған модельде (2)-(7) теңдеулер арқылы индукциялық қыздыру процесі жылулық деңгейде сипатталғанымен, оның жиілік түрлендіргіш пен индуктордың электрлік параметрлерімен байланысы мынадай жолмен орнатылады. Біріншіден, индуктор арқылы өтетін токтың амплитудасы  $I(t)$  және жұмыс жиілігі  $f$  қыздыру көзінің функциясы  $Q(z,t)$  ретінде теңдеуге енгізіледі:

$$Q(z,t) \sim I(t)^2 \cdot R(z)$$

мұндағы  $R(z)$  – металдың тереңдігіне байланысты локальды активті кедергі, ал  $I(t)$  – жиілік түрлендіргіштің шығысындағы ток, ол түрлендіргіштің жиілік, кернеу және жүктеме параметрлерімен анықталады. Осылайша, ток амплитудасы мен жиілігі жылу көзінің уақыт бойынша өзгеруін сипаттайтын  $Q(z,t)$  функциясына тікелей енеді, және Хевисайд функциясы  $H(t)$  арқылы басқару режимдері мен токтың қосылу/өшірілу уақыттары ескеріледі.

Ұсынылған тәсілде «қуат транзисторларының санын азайту» көбіне дәстүрлі үш фазалы IGBT-тиристорлық жиілік түрлендіргіштермен салыстырғанда жүзеге асырылады. Классикалық конфигурацияда әр фазада толық көпір немесе екі деңгейлі инвертор қолданылады, нәтижесінде әр фазада 4-6 транзистор қажет, ал үш фазалы жүйеде жалпы саны 12-18 транзистордан аспайды.

Электромагниттік есептен жылулық есепке көшу кезінде қабылданған негізгі жорамалдар:

1. Күштік магнит өрісі мен индуктордағы ток теңдеуі стационарлық синусоидалы токқа жуық деп қарастырылған, яғни тербелістердің жоғары жиілік компоненттері жылу генерациясына орташа мән ретінде енгізіледі.

2. Электромагниттік тербелістердің тереңдігіне байланысты скин-эффект қарастырылады, яғни ток тек металл қабатының беткі аймағына шоғырланады, және жылу көзін тереңдік бойынша  $R(z)$  функциясы арқылы сипаттайды.

3. Қозғалыссыз немесе біртекті металл дайындама үшін конвекция мен сәуле шығару әсері ескерілмейді, тек өткізгіштік және ішкі жылу генерациясы арқылы жылу таралу қарастырылады.

Осы тәсіл арқылы модель индукциялық индуктордағы электрлік режимдерді (ток амплитудасы, жиілік) жылу көзіне аударып, (2-7) теңдеулер бойынша металл дайындаманың температура өрісін анықтауға мүмкіндік береді. Бұл модельді жиілік түрлендіргіштің параметрлерін оңтайландыруға және нақты жұмыс режимінде қыздыру тиімділігін бағалауға қолдануға болады.

Энергия енгізудің индукциялық әдісінің ерекшелігі - құйынды ток ағыны аймағының кеңістіктік орнын реттеу мүмкіндігі. Біріншіден, құйынды токтар индуктормен жабылған аумақта пайда болады, нәтижесінде жалпы геометриялық өлшемдерге қарамастан, индуктормен магниттік байланыста болған заттың тек бөлігі ғана қызады. Екіншіден, құйынды токтардың ену тереңдігі және, демек, жылу энергиясының бөліну аймағы индуктор тогының жиілігіне байланысты: жиілік төмендеген кезде тереңдік артады, ал артқан кезде азаяды. Әрбір технологиялық процесс үшін (мысалы, беттік қатаю немесе қыздыру арқылы) технологиялық және энергетикалық көрсеткіштердің ең жақсы үйлесімін қамтамасыз ететін оңтайлы жиілік диапазоны бар. Индукциялық қыздыру тәжірибесінде 50 Гц-тен 5 МГц-ке дейінгі жиіліктер қолданылады.

Зерттеулер мен эксперименттік деректерді талдау негізінде индукциялық қыздырудың дәстүрлі термиялық өңдеу әдістерімен салыстырғандағы негізгі артықшылықтарын анықтауға болады:

1. Электр энергиясын тікелей қыздырылатын денеге беру өткізгіш материалдардың

ішінде тікелей қыздыруды қамтамасыз етеді. Бұл жанама әсер ететін қондырғылармен салыстырғанда қыздыру жылдамдығын айтарлықтай арттырады, мұнда жылу өнімге тек оның беті арқылы беріледі.

2. Энергияны беру кезінде байланыс құрылғыларына қажеттіліктің болмауы индукциялық қыздырудың маңызды артықшылығы болып табылады. Бұл мүмкіндік автоматтандырылған ағын өндірісі жағдайында, сондай-ақ вакуумда немесе қорғаныс ортасында жұмыс істеген кезде әсіресе маңызды.

3. Беттік әсердің әсері қуаттың негізгі бөлігінің өнімнің беттік қабатында бөлінуіне әкеледі. Нәтижесінде, индукциялық беріктену процесі сыртқы қабаттың тез қызуын қамтамасыз етеді, бұл иілгіш өзекті сақтай отырып, жоғары беттік қаттылыққа қол жеткізуге мүмкіндік береді. Осылайша, беттік индукциялық беріктену бөлшектердің беттік беріктенуінің басқа әдістерімен салыстырғанда жылдамырақ және үнемді.

### **Қорытынды**

Жасалған математикалық модель негізінде жиілік түрлендіргіштің және индуктордың жұмыс режимі оңтайландырылды. Модель бойынша 44 мм диаметрлі және 80 мм ұзындықтағы цилиндрлік металл дайындаманы қыздыру уақыты 2,5-3,0 минутты құрады, ал тәжірибелік өлшеулерде 2,6-3,1 минутқа сәйкес келді. Бұл модельдің  $\pm 5\%$  қателікпен нақты процесті сипаттайтынын көрсетті.

Жиілік түрлендіргіштің шығыс кернеуі 2-20 кГц диапазонында тұрақты болып, ток амплитудасы 10-12 А болды. Модель және эксперимент нәтижелері арасындағы айырмашылық  $\pm 4\%$  болды, бұл сандық дәлдікті растайды.

Қуат транзисторларының саны азайтылды: дәстүрлі тиристорлық түрлендіргіштерде 12 транзистор қажет болса, ұсынылған IGBT негізіндегі инверторда 6 транзистор жеткілікті болды. Бұл құрылғының массасын 35 %, көлемін 30 % және энергия шығынын 10-12 % төмендетуге мүмкіндік берді.

Модельдің қолданылуы жоғары гармоникалардың әсерін бағалауға мүмкіндік берді. Сандық модельдеу бойынша кернеу пульсациясы  $\pm 3\%$  деңгейінде болды, ал тәжірибе нәтижесінде  $\pm 3,2\%$  пульсация тіркелді. Бұл көрсеткіштер жоғары гармоникалардың минималды әсерін көрсетеді.

Жалпы, ұсынылған математикалық модель және жиілік түрлендіргіштің прототипі нақты өндірістік жағдайларға жақын сандық нәтижелер береді, металды тиімді қыздыруға және жабдықты оңтайландыруға мүмкіндік береді.

### **Әдебиеттер тізімі**

1. Design and optimization of H-type asymmetric magnetic suspension vibration absorber for ships / B. Zhou et al // Journal of Vibration and Control. – 2025. – № 31. – P. 344-354.
2. Liao H. High-Precision Composite Control of Driving Current for Non-Contact Annular Electromagnetic Stabilized Spacecraft Subject to Multiple Disturbances / H. Liao, H. Yuan, J. Xie // Aerospace. – 2024. – № 11(8). – P. 627.
3. Review on Active Vibration Control Method of Magnetically Suspended System / W. Han et al // IEEE Access. – 2023. – № 11. – P. 108117-108125.
4. Frequency-doubling displacement disturbance suppression of active magnetic bearing based on repetitive control / A.J. Li et al // IEEE 10th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2024-ECCE Asia). – 2024. – P. 707-711.
5. Isembergenov N.T., Sagyndikova A.Zh., Taysarieva K.N., 03.06.2015. Author's certificate № 91438, Grain drying plant.
6. Isembergenov N. T., Sagyndikova A. Zh. 11.03.2015 Author's certificate № 93979 Installation for drying grain using induction heating.
7. Prevention of thrombus formation in blood pump by mechanical circular orbital excitation of impeller in magnetically levitated centrifugal pump / K. Hatakenaka et al // Artificial Organs. – 2023. – № 47(2). – P. 425-431.
8. Effects of mechanical interfaces on magnetic levitation systems and analysis of self-excited vibration mechanisms in coupled systems / J. Tang et al // Science China Technological Sciences. – 2024. – № 67(12). – P. 3925-3939.
9. Linear permanent magnet electrodynamic suspension system: Dynamic characteristics, magnetic-mechanical coupling and filed test. / H. Shi et al // Measurement. – 2024. – № 225. – P. 113960.

10. Mechanics of the Movement of Grain on a Helical Surface in the Induction Dryer / A.J. Sagyndikova et al // Journal of Engineering and Applied Science. – 2015. – № 10(8). – P. 267-269.
11. Nonlinear Dynamics of a Micromechanical Non-Contact Induction Suspension. / D.Y. Skubov et al // Mechanics of Solids. – 2023. – № 58(6). – P. 2011-2023.
12. Ng C. The Thomson Jumping Ring Experiment and Ideal Transformer / C. Ng // The Physics Teacher. – 2022. – № 60(5). – P. 376-379.
13. Ladera C.L. Unveiling the physics of the Thomson jumping ring / C.L. Ladera, G. Donoso // American Journal of Physics. – 2015. – № 83(4). – P. 341-348.
14. Tjossem P.J.H. Optimizing Thomson's jumping ring / P.J.H. Tjossem, E.C. Brost // American Journal of Physics. – 2011. – № 79(4). – P. 353-358.
15. Taweepong J. Jumping ring experiment: effect of temperature, non-magnetic material and applied current on the jump height / J. Taweepong, K. Thamaphat, S.Limsuwan // Procedia Engineering. – 2012. – № 32. – P. 982-988.
16. Bolyukh V.F. Influence of an excitation source on the power indicators of a linear pulse electromechanical converter of induction type / V.F. Bolyukh, I.S. Shchukin // Technical Electrodynamics. – 2021. – № 3. – P. 28-36.
17. Bolyukh V.F. Influence of the Form of Pulse of Excitation on the Speed and Power Parameters of the Linear Pulse Electromechanical Converter of the Induction Type / V.F. Bolyukh, I.I. Katkov // Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. 2(B): Advanced Manufacturing. – 2019.
18. Bolyukh V.F. Features of excitation of a linear electromechanical converter of induction type from an AC source / V.F. Bolyukh, Y.V. Kashansky, I.S. Schukin // Electrical Engineering & Electromechanics. – 2021. – № 1. – P. 3-9.
19. Physical modeling of the features of anchor acceleration in a pulse electromechanical converter of induction type / Yu.M. Vaskovsky et al // Technical Electrodynamics. – 1986. – № 3. – P. 66-69.
20. Reduction of auto seismic oscillations of the ballistic laser gravimeter on account of the excitation of the induction-dynamic catapult by a pulse packet / V. Bolyukh et al // Ukrainian Metrological Journal. – 2020. – № 3. – P. 3-11.

### **Алғыс білдіру**

*Автор ғылыми жетекшісіне [Исембергенов Н.Т.] жұмыстың барлық кезеңдерінде құнды кеңестері, мұқият басшылығы және қолдауы үшін шын жүректен алғыс білдіреді, ал авторлар жұмыс барысында үнемі қолдау көрсеткені, қызығушылығы мен сындарлы пікірлері үшін [Зайец Н.А.] ға шын жүректен алғыс білдіреді. Тәжірибелер Берлиндегі Гумбольдт университетінің «Humboldt Innovation GmbH» жанындағы «Болашақ» бағдарламасы арқылы «500 ғалымға арналған тағылымдама» стипендиялық бағдарламасы аясында іске асты.*

**А.Ж. Сагындыкова<sup>1</sup>, Н.А. Заец<sup>2</sup>, Р.А. Жамашева<sup>3</sup>, Н.Н. Нургалиев<sup>4</sup>\***

<sup>1</sup>Алматынський университет энергетикi и связи имени Гумарбека Даукеева,  
050013, Республика Казахстан, Алматы, ул. Байтұрсынов, 127

<sup>2</sup>Берлинский университет прикладных наук, 10963, Германия, Берлин, ул. Дессауэр, 3/5

<sup>3</sup>Алматынський технологический университет,  
050012, Республика Казахстан, Алматы, ул. Төле би, 100

<sup>4</sup>Шакарим университет, 071412, Республика Казахстан, Семей, ул. Глинки, 20

\*e-mail: n.nurgaliyev@shakarim.kz

### **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЧАСТОТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ СИСТЕМ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА**

*В статье рассматриваются разработка и применение систем индукционного нагрева в различных отраслях, таких как сельскохозяйственное машиностроение, автомобильная промышленность и металлообработка. Приведен сравнительный анализ индукционных установок и традиционных методов нагрева, показаны их преимущества, включая высокую скорость и эффективность нагрева, улучшенное управление процессом и снижение энергопотребления. Математическая модель частотного преобразователя для систем индукционного нагрева основана на системе дискретных уравнений, описывающих динамику многомерных переменных. В отличие от существующих подходов, данная модель учитывает оптимальный диапазон рабочих*

частот, позволяет сократить количество силовых транзисторов и учитывает установленную мощность, обеспечивая при этом высокую энергетическую эффективность. В рамках исследования были разработаны и изготовлены прототип частотного преобразователя, работающего в диапазоне 2-20 кГц при однофазном и трехфазном питании, а также индуктор мощностью 6 кВт. Экспериментальные исследования подтвердили адекватность предложенной модели и возможность ее применения в реальных технологических условиях. Практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанной модели и прототипа для выбора оптимальных технологий индукционного нагрева в машиностроении и сельскохозяйственном машиностроении, что обеспечивает повышение надежности, снижение энергопотребления и уменьшение эксплуатационных затрат. Полученные результаты показали достаточность предложенной модели и подтвердили ее практическую применимость. Показано, что изменения параметров преобразователя существенно влияют на выбор оптимального режима индукционного нагрева, что имеет практическую значимость как для образовательных целей, так и для промышленного внедрения.

**Ключевые слова:** частотные преобразователи, индукционный нагрев, транзисторный модуль, трехфазный выпрямитель, инвертор, IGBT-система индукционного нагрева.

**A.Zh. Sagyndykova<sup>1</sup>, N.A. Zaetc<sup>2</sup>, R.A. Zhamasheva<sup>3</sup>, N.N. Nurgaliyev<sup>\*</sup>**

<sup>1</sup>University of Power Engineering and Telecommunications named after G.Daukeev, 050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, Baitursynov street,127

<sup>2</sup>Berlin University of Applied Sciences, 10963, Germany, Berlin, Dessau, 3/5

<sup>3</sup>Almaty Technological University, 050012, Republic of Kazakhstan, Almaty, Tole bi street, 100

<sup>4</sup>Shakarim University, 071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinki street, 20

\*e-mail: n.nurgaliyev@shakarim.kz

## MATHEMATICAL MODELING AND EXPERIMENTAL STUDIES OF A FREQUENCY CONVERTER FOR INDUCTION HEATING SYSTEMS

*The article discusses the development and application of induction heating systems in various industries, including agricultural machinery manufacturing, the automotive industry, and metal processing. A comparative analysis of induction installations and conventional heating methods is presented, highlighting their advantages such as high heating rates and efficiency, improved process control, and reduced energy consumption. The mathematical model of the frequency converter for induction heating systems is based on a system of discrete equations describing the dynamics of multidimensional variables. Unlike existing approaches, the proposed model takes into account the optimal operating frequency range, reduces the number of power transistors, and considers the installed power, thereby maintaining high energy efficiency. Within the scope of the study, a prototype frequency converter operating in the 2-20 kHz range with single-phase and three-phase power supply, as well as a 6 kW inductor, were designed and manufactured. Experimental studies confirmed the adequacy of the proposed model and its applicability under real technological conditions. The practical significance of the work lies in the possibility of using the developed model and prototype to select optimal induction heating technologies for mechanical engineering and agricultural machinery, ensuring increased reliability, reduced energy consumption, and lower operational costs. The results demonstrated the sufficiency of the proposed model and confirmed its practical applicability. onic components, which may affect both the converter operation and the power supply network. It was shown that variations in converter parameters have a significant impact on the selection of optimal induction heating modes, which is of practical importance for both educational purposes and industrial implementation.*

**Key words:** frequency converters, induction heating, transistor module, three-phase rectifier, inverter, IGBT-based induction heating system.

### Авторлар туралы мәліметтер

**Айгүл Жүрсінқызы Сағындықова** – PhD, доцент, Гумарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Электр энергетикасы кафедрасы; e-mail: a.sagyndykova@aes.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9988-5694>.

**Наталья Анатольевна Заец** – PhD, профессор, Берлин қолданбалы ғылымдар университеті, Мехатроника және оптометрия кафедрасы; e-mail: natalia.zaiets@bht-berlin.de. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5219-2081>.

**Рита Әділқызы Жамашева** – Зерттеуші, Гумбольдт университеті, Humboldt-Innovation GmbH; PhD, аға оқытушы, Алматы технологиялық университеті, Тамақ технологиясы кафедрасы, e-mail: rita\_2206@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4940-8336>.

**Нұржан Нұрлыбекұлы Нұрғалиев** – PhD, доцент-зерттеуші, Шәкәрім университеті, Химия және экология кафедрасы; e-mail: n.nurgaliyev@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1216-7150>.

#### Сведения об авторах

**Айгүл Журсиновна Сагындыкова** – PhD, доцент, Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбек Дәукеева, кафедра Электр энергетика; e-mail: a.sagyndikova@aes.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9988-5694>.

**Наталья Анатолиевна Заец** – Исследователь, PhD, профессор, Берлинский университет прикладных наук, кафедра мехатроники и оптометрии; e-mail: natalia.zaiets@bht-berlin.de. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5219-2081>.

**Рита Адилевна Жамашева** – Humboldt-Innovation GmbH, Гумбольдт университет, PhD, старший преподаватель, Алматинский технологический университет, кафедра пищевой технологии; e-mail: rita\_2206@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4940-8336>.

**Нуржан Нурлыбекович Нурғалиев** – PhD, доцент-исследователь, Шакарим Университет, кафедра химии и экологии; e-mail: n.nurgaliyev@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1216-7150>.

#### Information about the authors

**Aigul Zhursinovna Sagyndykova** – PhD, associate professor, University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeev, Department of Electro Energy; e-mail: a.sagyndikova@aes.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9988-5694>.

**Nataliya Anatolievna Zaets** – Researcher, PhD, professor, Berlin University of Applied Sciences, Department of Mechatronic and Optometric; e-mail: natalia.zaiets@bht-berlin.de. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5219-2081>.

**Rita Adilovna Zhamasheva** – Researcher, Humboldt-Innovation GmbH, Humboldt University, PhD, senior lecturer, Almaty Technological University, Department of Food Technology, e-mail: rita\_2206@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4940-8336>.

**Nurzhan Nurlybekovich Nurgaliyev** – PhD, associate professor-researcher, Shakarim University, Department of Chemistry and Ecology, e-mail: n.nurgaliyev@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1216-7150>.

Редакцияға енуі 06.01.2026

Өңдеуден кейін түсуі 06.03.2026

Жариялауға қабылданды 18.03.2026

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2\(22\)-56](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-56)



МРНТИ: 53.01.05

**Л.С. Баймолданова<sup>1\*</sup>, Б.К. Рахадиллов<sup>2</sup>, Али Чорух<sup>3</sup>, Е.М. Қабдыкенева<sup>1</sup>, М.В. Ермоленко<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Восточно-Казахстанский университет имени С. Аманжолова,  
070002, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, пр. Шакарима, 148

<sup>2</sup>ТОО «PlasmaScience»,  
070002, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Гоголя, 7Б

<sup>3</sup>Университет Сакарья,  
54050, Турция, г. Сакарья, кампус Эсентепе

<sup>4</sup>Шәкәрім университет,  
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А

\*e-mail: baimoldals@gmail.com

## ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ, КОРРОЗИОННЫЕ И ТЕРМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ TiSiCN, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ РЕАКТИВНОГО ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

**Аннотация:** В работе исследованы термическая стабильность, трибологические и электрохимические свойства покрытий TiSiCN, полученных методом реактивного плазменного напыления механически активированных порошковых смесей системы TiCN–SiC–Si. Показано влияние силы дугового тока (400-600 А) на результаты испытаний и характеристики сформированного слоя. Рентгенофазовый анализ и исследование поперечных шлифов методом

©Л.С. Баймолданова, Б.К. Рахадиллов, Али Чорух, Е.М. Қабдыкенева, М.В. Ермоленко, 2026