

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКАУНИВЕРСИТЕТИ ВА
«ИЛМИЙ-ТЕХНИКА МАРКАЗИ» МЧЖ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc 27.06.2017.Т.03.03 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ

ПУЛАТОВ АБРОР ОБИДОВИЧ

**ИНДУКЦИОН ПЕЧЛАРНИ ИССИҚЛИК РЕЖИМЛАРИ ВА УЛАРНИ
ЭНЕРГИЯ САМАРАДОРЛИГИНИ ОШИРИШ**

**05.05.02 – Электротехника. Электрэнергетик станциялар тизимлари.
Электротехник мажмуалар ва ускуналар»**

**ТЕХНИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Ташкент – 2018

**Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси
автореферати мундарижаси**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)
по техническим наукам**

**Content of the dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)
on technical sciences**

Пўлатов Аброр Обидович

Индукцион печларни иссиқлик режимлари ва уларни энергия
самарадорлигини ошириш..... 5

Пулатов Аброр Абидович

Тепловые режимы индукционных печей и повышение их
энергоэффективности..... 21

Pulatov Abror Abidovich

Thermal Regimes of Induction Furnaces and their Energy
Efficiency Increase 43

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works..... 46

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ ВА
«ИЛМИЙ-ТЕХНИКА МАРКАЗИ» МЧЖ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc 27.06.2017.Т.03.03 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ

ПУЛАТОВ АБРОР ОБИДОВИЧ

**ИНДУКЦИОН ПЕЧЛАРНИ ИССИҚЛИК РЕЖИМЛАРИ ВА УЛАРНИ
ЭНЕРГИЯ САМАРАДОРЛИГИНИ ОШИРИШ**

**05.05.02 – Электротехника. Электрэнергетик станциялар тизимлари.
Электротехник мажмуалар ва ускуналар»**

**ТЕХНИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Ташкент – 2018

Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В.2018.2.PhD/T413 рақам билан рўйхатга олинган.

Докторлик диссертацияси Ислом Каримов номидаги Ташкент давлат техника университетиде бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасида (www.tdtu.uz) ва “ZiyoNet” Ахборот таълим порталида (www.ziyounet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Хошимов Орифжон Одилович
техника фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар:

Хошимов Фозилджон Абидович
техника фанлари доктори, профессор

Алимходжаев Камолиддин Тиллаходжаевич
техника фанлари доктори, профессор

Етакчи ташкилот:

Навоий давлат кончилик институти

Диссертация ҳимояси Тошкент давлат техника университети ва «Илмий-техника маркази» МЧЖ ҳузуридаги DSc.27.06.2017.T.03.03 рақамли Илмий кенгашнинг 2018 йил “___” _____ соат ___ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100095, Тошкент ш., Университет кўчаси, 2-уй. Тел./ факс: (99871) 227-10-32, e-mail: tstu_info@tdtu.uz.)

Диссертация билан Тошкент давлат техника университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (___ рақами билан рўйхатга олинган). Манзил: 100095, Тошкент ш., Университет кўча, 2 уй. Тел./ факс: (99871) 227-03-41.

Диссертация автореферати 2018 йил “___” _____ куни тарқатилди.
(2018 йил “___” _____ даги ___ рақамли реестр баённомаси).

Қ.Р. Аллаев

Илмий даражалар берувчи
илмий кенгаш раиси
т.ф.д., проф., академик

О.Х.Ишназаров

Илмий даражалар берувчи
илмий кенгаш илмий котиби, т.ф.д., к.и.х.

И.М.Ибадуллаев

Илмий даражалар берувчи илмий
кенгаш қошидаги илмий семинар раиси,
т.ф.д., проф.

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Дунё миқёсида кўп энергия ва ресурс сарфлайдиган электротехнологик қурилмалар таркибига кирувчи энергия тежайдиган индукцион печларни энергия самарадорлигини ошириш, уларнинг бошқариш тизимларини такомиллаштириш муҳим аҳамият касб этмоқда. Шу жиҳатдан, ривожланган мамлакатларнинг механика-машинасозлик заводларида «индукцион қурилмаларнинг замонавий ярим ўтказгичли таъминот манбаларини қўллаш натижасида металл ишлаб чиқариш кўрсаткичини 20%га ошириш имконини яратмоқда...»¹. Ушбу соҳада, жумладан индукцион печларнинг электр энергияни истеъмоли ва автоматик бошқариш тизимида энергиясамарадор индукцион ишлов бериш қурилмаларининг истиқболга алоҳида эътибор бериб келинмоқда.

Жаҳонда металлургия саноатида металлларга ишлов беришда етакчи ўринларни эгаллаётган ишончли ва экологик тоза индукцион печларда ресурс ва энергосиғимли таъминот манбаларини самарадорлигини оширишга алоҳида эътибор қаратилмоқда. Бу йўналишда, жумладан, қиздириш жараёнлари ва иссиқлик режимларини моделлаштириш, энергетик ва эксплуатацион параметрларни тезкор ҳисоблаш, мавжуд автоматик бошқариш тизимларини такомиллаштириш, солиштирма электрэнергия сарфларини, технологик узилишлар ва металл йўқотишларни камайтириш, металл ишлаб чиқариш ҳажмини ва маҳсулот сифатини оширувчи технологиялар, шунингдек энергосамарали эритиш режимини ҳисоблашни янги такомиллаштирилган босқичларини ишлаб чиқиш алоҳида аҳамият касб этади. Шу билан бирга, индукцион печларнинг барқарор ва нотурғун иссиқлик иш режимлари ва параметрларини иссиқлик модели ёрдамида ҳисоблаш усулини такомиллаштириш ҳамда частотавий бошқарув тизимларини ишлаб чиқиш зарур ҳисобланмоқда.

Республикамиз иқтисодиётининг муҳим тармоқларидан ҳисобланган электрометаллургия соҳасида қўлланилаётган мавжуд электротехнологик ускуналарни замонавий талаблар асосида тубдан такомиллаштириш ва энергиясамарали автоматик бошқарув тизимлари технологик даражасини янгилаш, жумладан, индукцион қурилмаларда автоматик бошқариш имкониятларини ошириш, кам энергия сарфлаб сифатли ва кўп маҳсулот ишлаб чиқариш талабларига алоҳида эътибор қаратилмоқда. 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида, жумладан: «...яқин келажакда устувор вазифа сифатида иқтисодиётнинг энергия ва ресурс сиғимларини қисқартириш, ...ишлаб чиқаришга энергия тежайдиган технологияларни кенг жорий қилиш қайта тикланувчан энергия манбаларидан фойдаланишни кенгайтириш»² вазифалар белгиланган. Мазкур вазифаларни амалга ошириш,

¹ <http://reltec.biz/upload/image/perspectivy>.

² Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида”ги Фармони

жумладан индукцион электр печларининг асосий энергетик кўрсаткичларини ҳамда автоматлаштирилган частотавий бошқариш тизимларининг самарадор иш режимларини ҳисоблаш усулини такомиллаштириш ва технологик жараённинг ўзига хос хусусиятларига мос равишда параметрларни аниқлаш муҳим масалалардан бири ҳисобланади.

Ўзбекистон республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони, 2015 йил 5 майдаги ПҚ-2343-сон «Энергосарфларни камайтириш, иқтисодий ва ижтимоий соҳаларда 2015-2019 йилларга мўлжалланган энергия тежовчи технологияларни жорий этиш чора-тадбирлари дастури тўғрисида», 2017 йил 26 майдаги ПҚ-3012-сон «2017-2021 йилларга мўлжалланган иқтисодий ва ижтимоий соҳаларда энергия самарадорлигини ошириш чора тадбирлари тўғрисида»ги Қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг II. «Энергетика, энергия ва ресурстежамкорлик» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

Муаммони ўрганилганлик даражаси. Бугунги кунга қадар, индукцион электротехнологик қурилмаларнинг ривожлантиришга йўналтирилган илмий ва амалий тадқиқотлар дунёнинг етакчи илмий марказлари ва олий таълим муассасаларида, жумладан, University of Michigan (АҚШ), University of Waterloo (Канада), University of Hannover, Dresden University of Technology (Германия), Tokyo Technology Institute (Япония), Università degli Studi di Padova (Италия), Миллий тадқиқот университети «МЭИ», Санкт-Петербург давлат электротехника университети «ЛЭТИ», Новосибирск давлат техника университети, Самара давлат техника университети (Россия), Тошкент давлат техника университети ва Тошкент темир йўл муҳандислари институтларида (Ўзбекистон) кенг қамровли илмий-тадқиқот ишлари олиб борилмоқда.

Индукцион қурилмаларни ривожлантириш ва уларда энергия ва ресурс сифимларини камайтиришга қаратилган назарий ва илмий муаммоларни ҳал қилишда машҳур олимлар R. Balan, V. Maties, O. Hancu, S. Stan, Ciprian, B. Boulet, K. Zhou, J. Doyle, K. Glover, А.П. Альтгаузен, М.Д. Бершицкий, В.А. Бодажков, А.И. Вайнберг, В.П. Вологдин, В.Б. Демидович, А.Д. Свенчанский, А.Б. Кувалдин, А.М. Колобнов, К.М. Маҳмудов, А.Е. Слухоцкий, С.А. Фарбман, Ю.И. Блинов ва бошқалар ҳисса қўшганлар. Индукцион печларни автоматик бошқариш тизимларини ҳисобга олган ҳолда, унинг энергетик параметрларини ҳисоблашнинг такомиллаштириш борасида ўзбек олимлари А.А. Хашимов, М.М. Хамудханов, А.Т. Имомназаров, М.Х. Жалилов, М.Ф. Курматов, Ф.А. Хошимов ва бошқа олимлар томонидан ҳам бажарилган.

Сезиларли муваффақиятларга қарамай, индукцион печларнинг юкланиш даражаси ва актив қисмларини иссиқлик ҳолатини ҳисобга олган ҳолда, иш режимлари параметрларини самарали бошқариш билан боғлиқ муаммолар

етарли даражада ўрганилмаган. Мазкур ишда индукцион печнинг асосий энергетик параметрлари ва иш режимларида эквивалент термик схемаларни қўллаш орқали иссиқлик моделлари асосида, эритилаётган металнинг исталган вақтдаги қийматларини ҳисоблаш усуллари такомиллаштирилиб, частотавий бошқариш функционал тизими ва алгоритмларини қўллаш масалалари атрофлича кўриб чиқилиб, унинг ечимлари таклиф этилган.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Тошкент давлат техника университети илмий тадқиқот иш режасининг №02/1-925 “Электротехник тизим ва комплексларда энергия тежаш” (2012-2013) мавзусидаги лойиҳаси доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади индукцион печларнинг барқарор ва нотурғун иссиқлик иш режимлари ва параметрларини иссиқлик модели ёрдамида ҳисоблаш усулини такомиллаштириш ҳамда частотавий бошқарув тизимларини ишлаб чиқишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

индукцион печ иссиқлик режимларини бошқариш учун энергия самарадор кўрсаткичларини аниқлаш;

эквивалент иссиқлик схемалари асосида индукцион печда ўтказиладиган иссиқлик жараёнининг математик моделини ишлаб чиқиш;

юкланишнинг турли қийматлари учун индукцион печнинг электр ва иссиқлик параметрларини ҳисоблаш усулини такомиллаштириш;

индукцион печни энергия самарадор иш режимида ишлашини таъминловчи автоматик ростлаш тизимини иссиқлик модели асосида ишлаб чиқиш;

турли сифим ва русумдаги индукцион печларни бошқариш учун автоматик ростлаш функционал тизимини ишлаб чиқиш.

Тадқиқот объекти сифатида механика-машинасозлик заводи индукцион печи, ҳамда унинг иссиқлик иш режимлари ва параметрлари олинган.

Тадқиқотнинг предмети индукцион печларнинг барқарор ва нотурғун қизиш режимлари, эквивалент термик схемаларга асосланган иссиқлик моделлари ёрдамида аниқланадиган энергия самарадор кўрсаткичлар ва частотавий ростланадиган автоматик бошқариш тизимлари ташкил этади.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқот жараёнида электротехнология, электр машина ва жиҳозлар назарияси асосида электротехнологик қурилмаларни бошқаришнинг математик усуллари, барқарор ва нотурғун қизиш режимлари учун эквивалент термик схемаларга асосланган иссиқлик баланси тенгламаларини ечиш математик аппарати, физик моделларидан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгиллиги қуйидагилардан иборат:

индукцион тигел ва канал печларининг барқарор ва нотурғун иш режимлари учун тигелдаги юкламанинг турли хил қийматларига

боғлиқлигини кўрсатувчи энергия самарадор параметрларни ҳисоблашни такомиллаштирилган усулини ишлаб чиқиш;

эквивалент иссиқлик схемалар усулини ҳисобга олган ҳолда, индукцион тигел ва канал печларнинг математик модели ишлаб чиқилган;

индукцион печларда эритилаётган металл ва унинг актив қисмларида содир бўладиган термик жараёнларни тезкор ҳисоблаш имконини берадиган, иссиқлик баланс тенгламалари асосида эквивалент иссиқлик схемалари такомиллаштирилган;

индукцион канал печларда металл эритиш жараёнини частота орқали ростлайдиган автоматик бошқариш тизими яратилган.

Тадқиқотнинг амалий натижаси куйидагилардан иборат:

индукцион печларни иссиқлик режими ва энергетик параметрларини юкланганлик даражасига боғлиқ термик моделлар ишлаб чиқилган;

таъминот манбаи бошқарилувчи трансформатор-индуктордан иборат индукцион канал печлар учун такомиллаштирилган частота орқали ростлайдиган бошқариш тизими яратилган;

турли хил конструкцияларда индукцион печлар учун иссиқлик режими ва энергетик параметрларини аниқлаш имконини берувчи такомиллаштирилган термик моделлар ишлаб чиқилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги. Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги индукцион усул билан металл эритувчи канал ва тигел электрпечлар бўйича назарий ва амалий тадқиқотлар ўтказиш, олинган натижалар ва уларнинг ўзаро мувофиқлиги, ишлаб чиқаришга жорий этиш орқали асосланганлиги, шунингдек, назарий ва тажрибавий натижаларнинг мос келиши билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти индукцион печларнинг иссиқлик жараёнлари ва параметрларини аниқлашнинг эквивалент термик схемалари асосида математик модели ишлаб чиқилиши, печнинг қизиш жараёнини юкланганлик даражасининг турли қийматлари учун такомиллаштирилган ҳисоблаш ва иссиқлик баланси тенгламалар тизими ишлаб чиқилиши ҳамда қизиш вақтини ўзгариш тавсифи олиниши, частота орқали бошқариш тизими ишлаб чиқилиши билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти аксарият механика-машинасозлик корхоналарида фойдаланиладиган индукцион печлардаги эритилаётган металл хароратини исталган вақтдаги қийматини билвосита ўлчаш ва частота орқали ростлайдиган автоматик бошқариш тизимини кенг кўламда қўлланилиши билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Индукцион печлар энергия самарадорлигини ошириш бўйича олинган илмий натижалар асосида:

таъминот манбаидан индукцион печга узатилаётган электр энергиясини частотали ростланадиган функционал схемаси “Ўзбекистон темир йўллари” АЖ тизимидаги корхонада хусусан, “Тошкент механика заводи” АЖда жорий қилинган. (“Ўзбекистон темир йўллари” АЖнинг 2018 йил 28 майдаги

НГ/2652-сон маълумотномаси). Натижада электропечь индуктор қувватини юкланган металга самарали етказиш аниқлиги ҳисобига эритиш вақтини 10%гача камайтириш имконини берган.

индукцион тигель печда эритилаётган металл ҳароратини исталган вақтда термик модел орқали билвосита аниқлаш блоки “Ўзбекистон темир йўллари” АЖ тизимидаги корхонада хусусан, “Тошкент механика заводи” АЖда жорий қилинган. (“Ўзбекистон темир йўллари” АЖнинг 2018 йил 28 майдаги НГ/2652-сон маълумотномаси). Натижада ўтга чидамли материалдан тайёрланган едирилувчан печь тигелини хизмат муддатини 10%гача узайтириш ва эксплуатацион кўрсаткичларни 3-5 %га ошириш имкони яратилган.

индукцион канал печларини автоматик бошқариш тизими “Ўзбекистон темир йўллари” АЖ тизимидаги корхонада хусусан, “Тошкент механика заводи” АЖда жорий қилинган (“Ўзбекистон темир йўллари” АЖнинг 2018 йил 28 майдаги НГ/2652-сон маълумотномаси). Натижада корхонада электр печлар хизмат муддатини 8-10 йилга узайтириш ва электр йўқотишларни 5-7%га қисқартириш имконияти яратилган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Тадқиқот натижалари 17 та илмий-амалий анжуманлар ва семинарларда, шу жумладан 8 та халқаро ва 9 та республика анжуманларида апробациядан ўтди.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича жами 19 та илмий иш, шу жумладан, 1 та монография, республика журналларида 4 та мақола чоп этилган бўлиб, 1 та ихтиро учун патент олинган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация кириш, бешта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловадан иборат. Диссертация ҳажми 120 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Ишнинг **Кириш** қисмида диссертация тадқиқотининг зарурлиги ва долзарблигининг асосланиши, мақсади ва асосий кўриладиган масала ҳамда Ўзбекистон Республикасида фан ва технологиянинг ривожланиш йўналишларига мослиги, илмий янгилиги ва амалий натижалари, олинган натижаларнинг назарий ва амалий аҳамияти, ишларни чоп этганлик ҳақида маълумотлар ва диссертациянинг тузилиши келтирилган.

Диссертациянинг «**Индукцион печларнинг хусусиятлари ва асосий параметрлари**» деб номланган биринчи бобида индукцион тигель печларни ишлаш принципи, ҳамда уларни қора ва рангли металллар ишлаб чиқаришда қўлланилиши ва уларни автоматик бошқариш хусусиятлари кўриб чиқилган. Хорижий ва маҳаллий олимларнинг металлургия корхоналарида индукцион печларини ҳисоблаш усуллари соҳасида тадқиқот ишлари ўрганилди ва таҳлил қилиниб, ўрганилаётган объектнинг тавсифлари батафсил келтирилган.

Қўлланиладиган асосий индукцион ускуналарни турлари ва ишлаш принциплари, шунингдек, ушбу қурилмаларнинг конструктив хусусиятлари келтирилган. Қора ва рангли металлларни эритишда ишлатиладиган индукцион печлари катта қувватга эга эканлиги билан характерланади. Уларни назорат қилиш вазифаси қуйиш даврида максимал қувватни ва эритиш даврида ўрнатилган хароратни (эритмадан олтингугурт ва аралашмаларни олиб ташлаш) ушлаб туришдан иборатдир. Тиристор частотали ўзгарткичлари (ТЧЎ) паст ва ўрта қувватли ИТПларни таъминот манбаи сифатида кенг қўлланилади. Одатда ТЧЎ уч фазали тўғрилагич ва инвертордан иборат. Кўпчилик ТЧЎлар ток инверторлашда параллел ёки кетма-кет параллел кўприк схемага эга. ТЧЎ чиқиш кўрсаткичи сифатида f_T таъминот манбаи частотаси ва $U_{ю}$ юкламадаги кучланишдир. ТЧЎлар ИТПнинг электр таъминоти тизими саноат частотасига мос келмаганда қўлланилади, бунинг сабаби махсулот ишлаб чиқариш ҳажмига ва тигелнинг параметрик катталикларига боғлиқдир. Эритилаётган металлнинг ҳажми (массаси) ошиб бориши билан юкламага талаб қилинадиган частота камаяди.

ИТПнинг махсус хусусиятларидан келиб чиққан ҳолда иссиқлик режимини бошқарув тизимларининг иккита турга ажратиш мумкин:

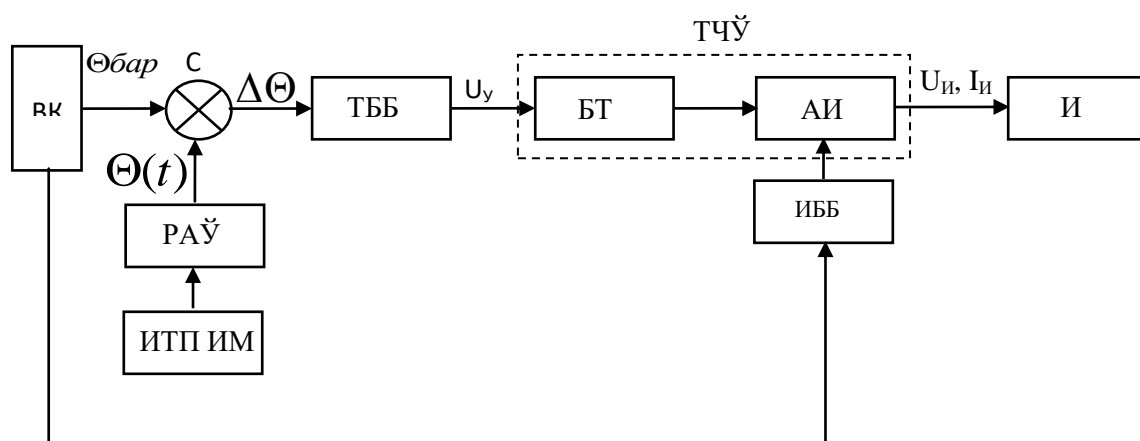
харорат бўйича очиқ бўлган, яъни эритилаётган металлга қувватни етказиш учун дастурлаштирилган бошқарув тизимлари;

эритилаётган металл ва печнинг асосий элементлари харорати бўйича, ёки ИТПнинг объект сифатида иссиқлик ҳолатининг математик моделидан танлаб маълумот оладиган ёпиқ тизим.

1-расмда ИТПнинг иссиқлик режимини ростлашда эритилган металлнинг ҳисобланган хароратидан фойдаланилган печь қизиган ҳолатининг математик моделидан бошқарилаётган функционал схема келтирилган.

ИТПнинг иссиқлик режимини ростлаш функционал схемаси қуйидагича ишлайди. Вазифаловчи қурилмада шакллантирилган эритилаётган металлнинг хароратига мос бўлган қиймат $\Theta_{уст}$ ишлаб чиқарилади ва бу сигнал жамлагич Снинг 1-катакчасининг биринчи киришига берилади. Эриган металлнинг хароратига мос келадиган сигнал совутиш ҳолатидан металлнинг олдиндан белгиланган эриш хароратигача (Δt_n вақт учун қаранг, 2-расм.) маълум вақт оралиғида жамлагич Снинг катакчасининг иккинчи киришига берилади. Жамлагич С катакчасида бу сигналлар таққосланади ва уларнинг фарқлари $\Delta \Theta_n = \Theta_{уст} - \Theta_n$ тўғрилагич бошқариш блокига, у ерда бошқарилувчи тўғрилагич тиристорлари бурчагини очиш учун сигнал шакллантирилади.

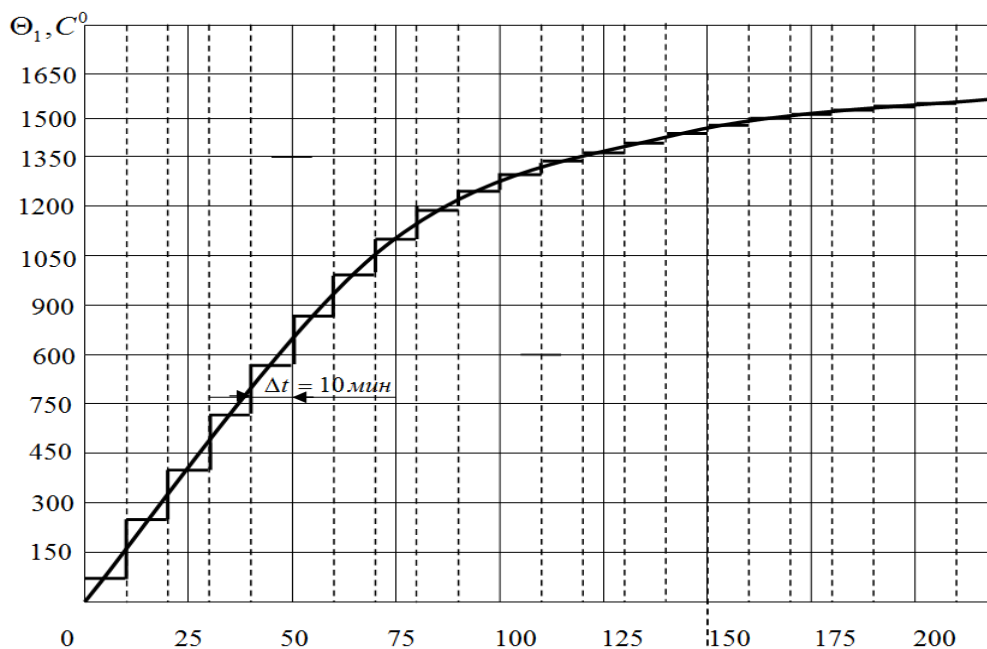
ИТПда эритилаётган металл хароратини узлуксиз кўринишдаги вақт бўйича қизиш ҳолатининг математик модел чиқишида олинган рақамли сигнали РАЎда поғоносимон тавсифли доимий ўзгариши Δt (мин) аналог сигналга вақт бўйича ўзгартирилади.



1-расм. ИТПнинг иссиқлик режимини ростлаш функционал схемаси:

ВК – вазифаловчи қурилма, С – жамлагич, РАЎ – рақамли-аналог ўзгартиргич, ИТП ИМ – ИТП иссиқлик модели, ТЧЎ – тиристорли частота ўзгартиргич, ТББ – тўғрилагич бошқарув блоки, БТ – бошқарилувчи тўғрилагич, АИ – автоном инвертор, ИББ – инверторни бошқариш блоки, И – ИТП индуктори.

ИТПларнинг қизиш режимини узлуксиз назорат қилиш учун кўриб чиқилган алгоритм, саноат контроллери ёки микропроцессор асосида амалга оширилиши мумкин.



2-расм. ИТПда юкланиш қийматлари бўйича (100%) эритилаётган металлнинг совуқ ҳолатидан то эриш ҳолатигача бўлган математик модел чиқишидаги ўртача ҳарорати эгри чизик ўзгаришлари.

Демак ҳар бир вақт оралиғида жамлагич C да $\Theta_{бар}$ ва Θ_n сигналлар таққосланиб, металл эритишга ёки ушлаб туришга кетадиган қувватни бошқариш сигнали ишлаб чиқилади. Эритилаётган металлнинг вақтини ва хароратини бошқарининг ўзгариш аниқлиги, асосан ИТПнинг қизиш ҳолатининг математик модели тўғри тузилишига боғлиқ. Шунинг учун ИТПнинг қизиш ҳолати иссиқлик модели яратилишига алоҳида қатъий талаблар қўйилади.

Диссертациянинг **“Индукцион тигель печларида кечадиган иссиқлик жараёнларини ҳисоблаш”** деб номланган иккинчи бобида, эритилаётган металл ва печнинг актив элементларини хароратини ҳисоблашда иссиқлик жисмлари, ҳамда математик операциялар сонини минимал мивдорга камйтириш учун тузилган ЭИСни эквивалент ўзгартиришни ишлаб чиқиш услуби келтирилган. Иссиқлик занжирларини ҳисоблашда чизиқли электр контурлари назариясини жорий этишга имкон берадиган асосий қоидалар шундаки, аслида ҳақиқий тарқалувчан иссиқлик манбалари ва тарқалувчи иссиқлик ўтказувчанликлари, ҳамда иссиқлик ажралишлари оз миқдордаги жамланган иссиқлик манбалари, жамланган эквивалент иссиқлик ўтказувчанликлари ва иссиқлик ажралишлари билан алмаштирилади.

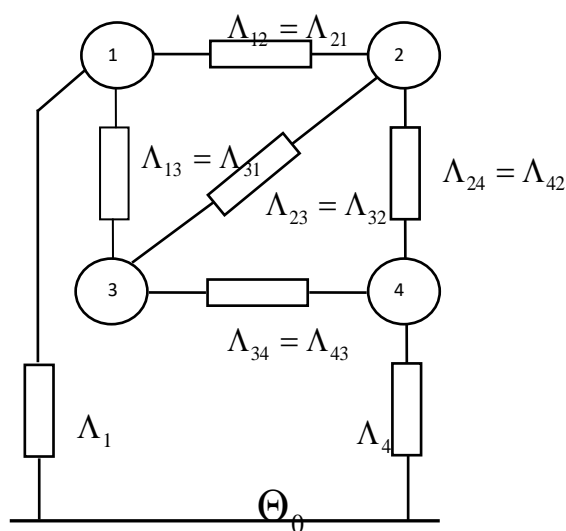
Қизиган жисмлар учун, ўзгартирилган ЭИС асосида ишлаб чиқилган эритилаётган металл ва ИПнинг актив қисмларининг хароратини ҳисоблаш учун алгоритм блок схемаси ишлаб чиқилди. Шунингдек, эритилаётган металл ва индукцион печнинг актив элементлари қизиш ҳолати математик модели ва унинг имконияти, камчиликлари ҳамда қўллаш соҳалари таҳлил қилинади. Эритилаётган металл ва ИПнинг актив қисмларининг қизиш жараёнларини тадқиқотлаш учун ЭИС қўллашнинг ўзига хос жиҳатлари шундаки, кўрилатган иссиқлик жисмларнинг миқдори ва печни бошқариш қонунига кўра, унинг иссиқлик алмаштириш схемасига мувофиқ иссиқлик баланс тенгламалар тизими тузилади.

Сифими 1000 кг гача бўлган тигелли печда, ишлаб чиқилган ўзгартирилган ЭИС услуби ва унинг таҳлили асосида, эритилаётган металл ва унинг актив элементларининг барқарор ва нотурғун режимларидаги ҳисобланган натижалари келтирилган.

Сифими 1000 кг гача бўлган ИТПга тузилган ЭИС шундай тақдим этилганки, бунда у ўзаро боғланган тўртта қизиган жисмларнинг термал муносабатларидан иборат тизим сифатида кўрилиб, ички иссиқлик манбалари эга қуйидаги элементлар деб қарлади: эритилаётган металл, индуктор, футеровка ва корпус (3-расм). Ушбу иссиқлик жисмлари мос равишда ўзаро иссиқлик ўтказувчанликлар билан боғланган, шунингдек улар иссиқлик манбаига эга бўлиб, эритилаётган металл ва корпус эса атроф-муҳитга иссиқлик ажратиб чиқаради. ЭИСга мос келадиган иссиқлик баланси учун дифференциал тенгламалар тизимини тузамиз:

$$\left. \begin{aligned} C_1 \frac{d\Theta_1}{dt} + \Lambda_{11}\Theta_1 - \Lambda_{12}\Theta_2 - \Lambda_{13}\Theta_3 &= P_1, \\ C_2 \frac{d\Theta_2}{dt} - \Lambda_{21}\Theta_1 + \Lambda_{22}\Theta_2 - \Lambda_{23}\Theta_3 - \Lambda_{24}\Theta_4 &= P_2, \\ C_3 \frac{d\Theta_3}{dt} - \Lambda_{31}\Theta_1 - \Lambda_{32}\Theta_2 + \Lambda_{33}\Theta_3 - \Lambda_{34}\Theta_4 &= P_3, \\ C_4 \frac{d\Theta_4}{dt} - \Lambda_{42}\Theta_2 - \Lambda_{43}\Theta_3 + \Lambda_{44}\Theta_4 &= P_4 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Иссиқлик баланси тенгламалари (1) ва ЭИСдаги шартли белгиланишларда бир хил кўрсаткичлар қўлланилади – индекслар кўриб чиқиладиган ИТПнинг актив қисмларининг тартиб рақамини билдиради;



3. расм. Сиғими 1000 кг гача бўлган ИТП нинг эквивалент иссиқлик схемаси.

Иссиқлик мувозанатининг дифференциал тенгламаларининг ушбу ечимининг умумий шакли қуйидагича:

$$\left. \begin{aligned} \Theta_1(t) &= -A_{11}e^{-r_1 t} - A_{12}e^{-r_2 t} - A_{13}e^{-r_3 t} - A_{14}e^{-r_4 t} + \sum_{i=1}^4 A_{1i}, \\ \Theta_2(t) &= -A_{21}e^{-r_1 t} - A_{22}e^{-r_2 t} - A_{23}e^{-r_3 t} - A_{24}e^{-r_4 t} + \sum_{i=1}^4 A_{2i}, \\ \Theta_3(t) &= -A_{31}e^{-r_1 t} - A_{32}e^{-r_2 t} - A_{33}e^{-r_3 t} - A_{34}e^{-r_4 t} + \sum_{i=1}^4 A_{3i}, \\ \Theta_4(t) &= -A_{41}e^{-r_1 t} - A_{42}e^{-r_2 t} - A_{43}e^{-r_3 t} - A_{44}e^{-r_4 t} + \sum_{i=1}^4 A_{4i}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

бу ерда $A_{11}, A_{12}, \dots, A_{1i}; A_{21}, A_{22}, \dots, A_{2i}; A_{ji}$ – доимий интеграллаш бўлиб, бошланғич ва охириги интеграллаш шартларидан аниқланади; j ва i қизиган жисмларнинг тартиб рақамлари.

Ушбу ҳисоблаш услуби ёрдамида эритилаётган металл ва индукцион печь асосий конструктив элементларида кечадиан нотурғун иссиқлик жараёнларини ҳисоблаш ва бизни қизиқтирадиган печь қисмларидаги харорат ўзгаришларини аниқлашимиз мумкин.

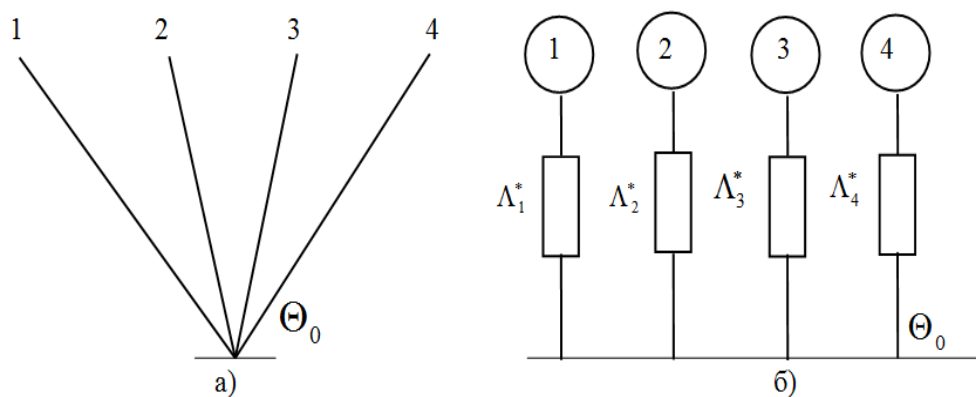
Индукцион тигель печнинг барқарор иш режими нотурғун ҳолатнинг алоҳида кўриниши бўлганлигини инобатга олиб, харорат ўзгаришини $\frac{d\Theta_1}{dt} = \frac{d\Theta_2}{dt} = \frac{d\Theta_3}{dt} = \frac{d\Theta_4}{dt} = 0$ деб қабул қилсак, у ҳолда, иссиқлик баланси тенгламалар тизимини матрица шаклида ёзишиз мумкин:

$$\begin{bmatrix} \Lambda_{11} - \Lambda_{12} - \Lambda_{13} & 0 \\ -\Lambda_{21} & \Lambda_{22} - \Lambda_{23} - \Lambda_{24} \\ -\Lambda_{31} - \Lambda_{32} & \Lambda_{33} - \Lambda_{34} \\ 0 - \Lambda_{42} - \Lambda_{43} & \Lambda_{44} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Theta_1 \\ \Theta_2 \\ \Theta_3 \\ \Theta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Шундай қилиб, келтирилган бирламчи ЭИСни эквивалент ўзгаришлардан сўнг, ҳар бир иссиқлик жисмлари учун, алоҳида, иссиқлик нуқтаи назаридан ўзаро боғланмаган ўзгартирилган ЭИСлар билан алмаштирилиб, нотурғун қизиш режими учун тузилган иссиқлик баланс тенгламаси биринчи даражали дифференциал тенглама билан, барқарор иш режими учун эса иссиқлик ўтказувчанлик квадрат матрицаси ўзгартирилган иссиқлик ажралиш диагональ матрица билан алмаштирилади.

Индукцион тигель печни асосий конструктив қисмлари ва эритилаётган металл атроф муҳитга нисбатан ўзгариш хароратини аниқлаш, ҳамда иссиқлик баланс тенгламалар тизимини ечиш учун ускуна сирт қопламаси термикузатишни олдиндан юқори аниқликда билиш талаб қилинади. Яна шуни таъкидлаш жоизки, юқорида изохланган усул ёрдамида ҳисоблашни олиб бориш алгоритми бирмунча юқори даражадаги қийинчилик туғдиради, шунинг учун фойдаланилаётган термик схемалар асосидаги моделлар янада такомиллаштиришни талаб этади.

ИТПни иссиқлик жисмлари учун ўзгартирилган ЭИС ларни бирлаштириб, бирламчи ЭИСга адекват кўринишига келтирамиз (4- расм). Бу ерда, а-ўзгартирилган ЭИС геометрик кўриниши, б-иссиқлик жисмларини ўзгартирилган ЭИС кўриниши. Ўзгартирилган ЭИС лар асосидаги иссиқлик баланс тенгламаларини барқарор ва нотурғун иш режимлари учун бирлаштириб, ҳар бир қизиш режимига иссиқлик баланси тенгламалар тизимини тузамиз:



**4-расм. ИТП нинг ўзгартирилган схемаси.
а-ўзгартирилган ЭИС геометрик кўриниши, б-термик жисмларини ўзгартирилган ЭИС кўриниши.**

Шундай қилиб, ички манбага эга тўртта ўзаро боғланган иссиқлик жисмларидан ташкил топган иссиқлик тизими кўринишидаги индукцион тигель печни керакли элементларини, юқоридаги, ўзгартирилган ЭИС услуб, асосида амалга ошириш мумкин.

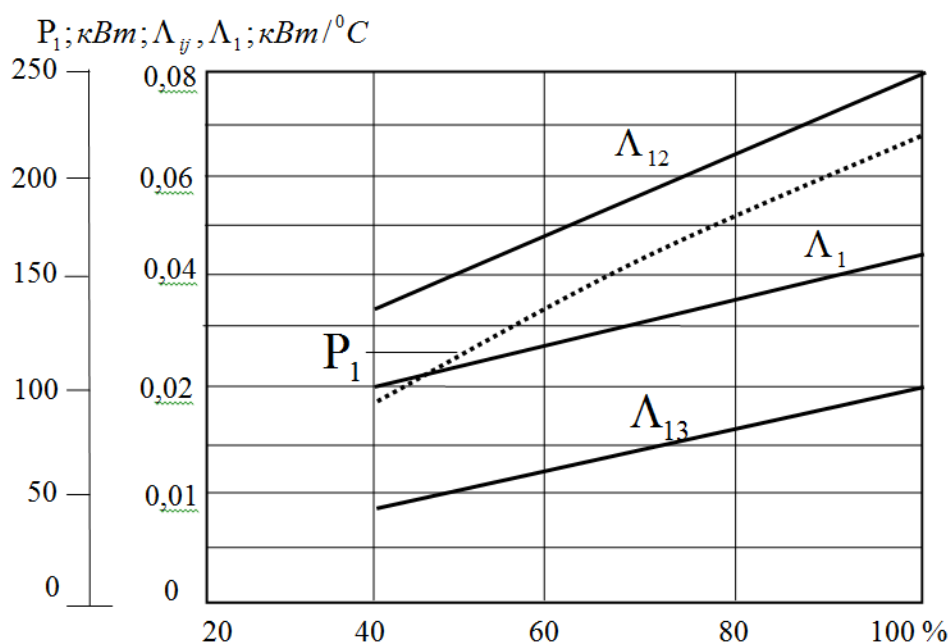
$$\left. \begin{aligned} C_1^* \frac{d\Theta_1}{dt} + \Lambda_1^* \Theta_1 &= P_1^*, \\ C_2^* \frac{d\Theta_2}{dt} + \Lambda_2^* \Theta_2 &= P_2^*, \\ C_3^* \frac{d\Theta_3}{dt} + \Lambda_3^* \Theta_3 &= P_3^*, \\ C_4^* \frac{d\Theta_4}{dt} + \Lambda_4^* \Theta_4 &= P_4^*. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \Lambda_1^* & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Lambda_2^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Lambda_3^* & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Lambda_4^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Theta_1 \\ \Theta_2 \\ \Theta_3 \\ \Theta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1^* \\ P_2^* \\ P_3^* \\ P_4^* \end{bmatrix} \quad (5)$$

«Турли хил юкланиш даражасига эга индукцион тигель печни иссиқлик кўрсаткичларини ва қизиш жараёнини таҳлил қилиш» деб номланган учинчи бобда тигелнинг турли хил юкланганлик даражасини ҳисобга олган ҳолда, иссиқлик жисми бўлган, “эритиладиган металл” билан боғлиқ, иссиқлик ўтказувчанлик ва иссиқлик алмашилишидаги ўзгаришлар таҳлил қилинган. Мисол учун, $\Lambda_{12} = \Lambda_{21}$ эритилган металл ва индуктор

ўртасидаги футеровка орқали иссиқлик ўтказувчанлиги, металл ва футеровка орасидаги $\Lambda_{13}=\Lambda_{31}$ ўтга чидамли иссиқлик ўтказувчанлиги, ҳамда эритилган металл Λ_1 юзасидан атроф мухитга ажраладиган иссиқлик ўтказувчанлик мавжуд.

Тигелнинг юкланганлик кўрсаткичининг ўзгариши, унинг шихта билан тўлдирилганлик даражаси миқдорига тўғридан тўғри муносибдир. Шихтанинг 100% тўлдирилганлигидан фарқли ўлароқ, контактда бўлган қисми, яъни массаси камроқ, шунга кўра, иссиқлик ўтказувчанлиги ҳам кам бўлади. Шунинг учун, $\Lambda_{12}=\Lambda_{21}$ ва $\Lambda_{13}=\Lambda_{31}$ иссиқлик ўтказувчанлик қийматлари юкланганлик даражасининг пасайишига пропорционал равишда камаяди (5-расм).

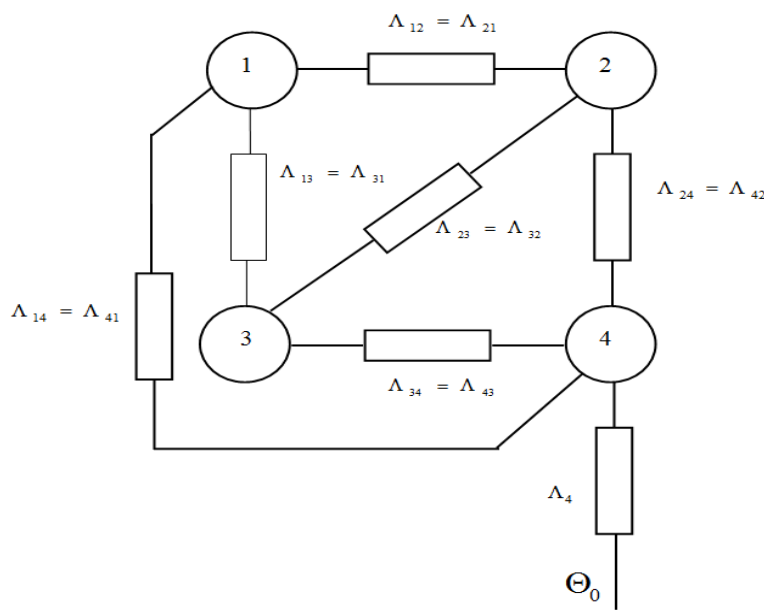


5-расм. ИТПнинг тигелга шихта юкланганлик даражасига қараб, иссиқлик ўтказувчанлик Λ_{12} , Λ_{13} ва иссиқлик ажралиши, Λ_1 , ҳамда, актив қувват P_1 ўзгариш графиклари.

Эритилган металл юзасидаги атрофга мухитга ажраладиган иссиқлик ажралиш ҳам ўзгаради, чунки, эритилган металл юзасидан тортиб то тигель юқори қисмигача бўлган масофада юкланганлик даражасига пропорционал бўлганлигига мувофиқ, иссиқлик узатиш коэффициенти ҳам ўзгаради.

«Турли хил индукцион печлар учун эквивалент иссиқлик схемаларини яратишнинг ўзига хос хусусиятлари» деб номланган тўртинчи бобда турли хил конструкция ва иш режимларига эга индукцион печларга эквивалент иссиқлик схемаларини тузиш принциплари ва иссиқлик баланси тенгламалар тизимлари келтирилган. Ёпиқ қопқоғли ИТПда, иссиқлик чиқиши анча камаяди, яъни эритилган металдан атроф мухитга иссиқлик ажралиши тўғридан-тўғри мавжуд эмаслиги сабабли, у эритилаётган металнинг иссиқлигини печнинг қопқоғига узатиш билан алмаштирилади.

(6-расм). Шунинг учун, ёпиқ қопқоқли ИТП га тузилган ЭИС қуйидаги кўринишга эга:



6-расм. Ёпиқ қопқоқли ИТП эквивалент иссиқлик схемаси.

ИТПнинг иссиқлик баланс тенгламалар тизими қуйидагича:

$$\left. \begin{aligned} C_1 \frac{d\Theta_1}{dt} + \Lambda_{11}\Theta_1 - \Lambda_{12}\Theta_2 - \Lambda_{13}\Theta_3 - \Lambda_{14}\Theta_4 &= P_1, \\ C_2 \frac{d\Theta_2}{dt} - \Lambda_{21}\Theta_1 + \Lambda_{22}\Theta_2 - \Lambda_{23}\Theta_3 - \Lambda_{24}\Theta_4 &= P_2, \\ C_3 \frac{d\Theta_3}{dt} - \Lambda_{31}\Theta_1 - \Lambda_{32}\Theta_2 + \Lambda_{33}\Theta_3 - \Lambda_{34}\Theta_4 &= P_3, \\ C_4 \frac{d\Theta_4}{dt} - \Lambda_{41}\Theta_1 - \Lambda_{42}\Theta_2 - \Lambda_{43}\Theta_3 + \Lambda_{44}\Theta_4 &= P_4. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

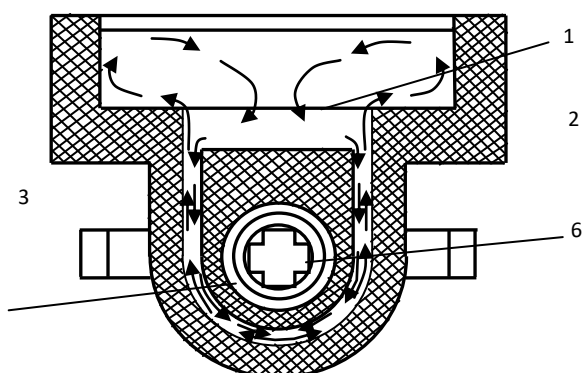
Индукцион канал печининг эритиш жараёни қизиш ҳолатини ўрганишда қуйидаги ҳолат деб қабул қиламиз: эритма сақлаш ваннасини конструктив элемент сифатида ҳисобга олмаган ҳолда, печни симметрик кўринишдадир, тарқоқ электр ва иссиқлик кўрсаткичларни жамланган ҳолатда деб оламиз. Электр ва иссиқлик кўрсаткичларни ўзгаришини ҳароратга боғлиқлиги олдиндан ҳисобга олинган.

Қабул қилинган шартларни ҳисобга олган ҳолда, индукцион каналли печь қизиш тизим сифатида қуйидаги иссиқлик жисмлардан ташкил топган:

1-индуктор, 2-магнитўтказгич, 3-эритиладиган металл ва улар орасида мос равишда иссиқлик ўтказувчанлиги мавжуд (7-расм).

Иссиқ ва иссиқ бўлмаган мувозанат режимлари учун термал жисмлар сонини аниқлаш ва уларнинг индукцион каналли печнинг эквивалент термал деворлари (ЕТС) билан боғлиқ иссиқлик ўтказувчанлигини аниқлаш ва

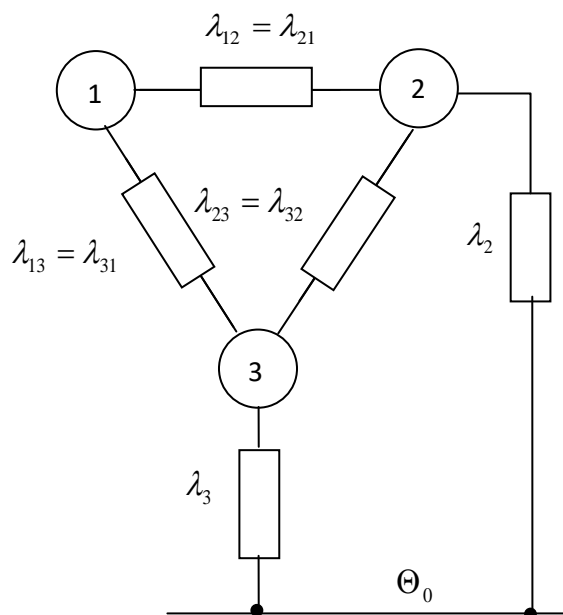
иссиқлик мувозанатининг тенгламаларини тузиш усули индукцион печлар металлни эритишнинг физик жараёнларига асосланади.



7-расм Индукцион канал печининг асосий таркибий қисмлари куйидагилардир:

1 – индуктор;

2 - магнитўтказгич; 3 –металл.



8-расм. Индукцион канал печининг эквивалент иссиқлик схемаси

Шундай қилиб, индукцион канал печларининг иссиқлик жараёнларини ҳисоблаш учун ишлаб чиқилган услуб, эритиладиган металл ва асосий конструктив элементларни хароратини барқарор ва нотурғун иссиқлик режимларида аниқлаш имконини беради.

«Индукцион каналли печнинг бошқарув тизимини яратиш принциплари» деб номланган бешинчи бобда очик каналли печларни бошқариш тизимининг мавжуд камчиликлари таҳлил қилинган. Индукцион канал печи учун кўп функцияли бошқариш тизимининг тузилиши ишлаб чиқилди.

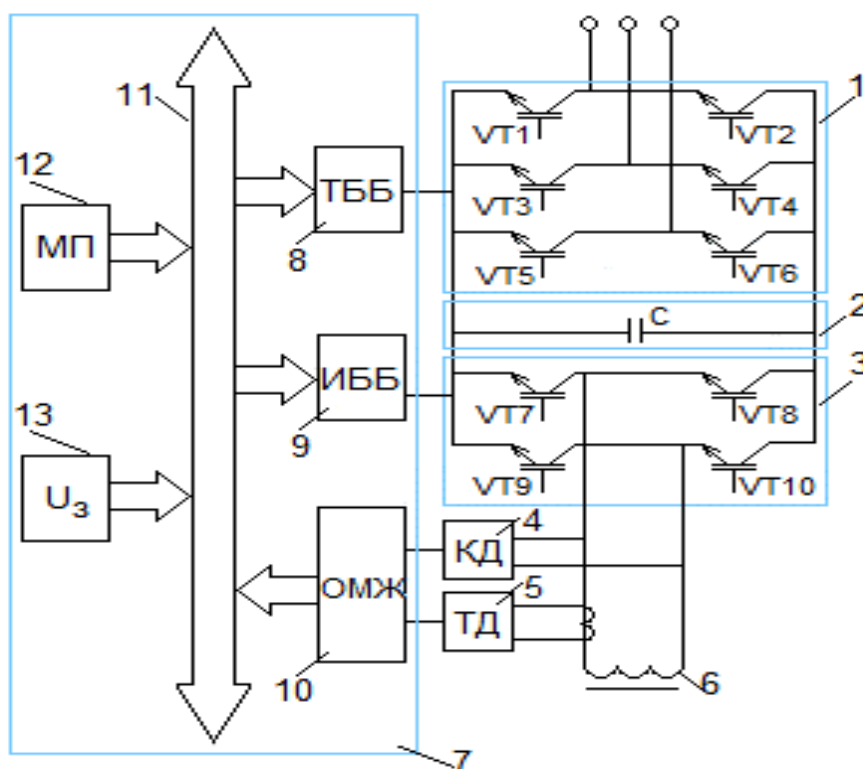
Бажарилаётган илмий-тадқиқот вазифаси шундан иборатки, индукцион канал печларини бошқариш тизимини такомиллаштириш бўлиб, бу жараён конструктив соддалаштириш ҳисобига, печь параметрларини ростлаш орқали, унинг функционал имкониятлари, ишончлийлигини, ҳамда эритиладиган металл ва унинг қотишмалари турлари бўйича эритиш самарадорлигини ошириш имкониятин беради.

Ушбу тизим эритиладиган материал турига қараб, печнинг танланган иш режимида талаб қилинадиган частота ҳисобига, оптимал бошқариш имконини бериб, печнинг энергия самарадорлигини оширади.

Диссертация ишида индукцион ускунани частота ўзгартиргич базасида яратилган бошқариш тизими келтирилган. Бу тизим аввалги канал печларига хос бўлган қачиликлардан (автотрансформатор, поғонали трансформатор ва симметрияловчи қурилма каби бошқариш элементларидан фойдаланиш) мутлақ истиснодир. Чунки частота ўзгартиргич уч фазали тармоқдан

таъминланиб, унинг чиқиши бир фаза бўлиши хисобига, симметрияловчи курилма тизимдан олиб ташланади, фақатгина индукторни реактив кувватини компенсацияловчи мослама сақлаб қолинади.

Индукцион печнинг электротехник тизими қуйидаги элементлардан ташкил топган: бир фазали инвертор куч модули блокига уланган индуктор, бу эса ўз навбатида филтър ва уч фазали тўғрилагичга, кучланиш ва ток ҳолат ўзгарткичлари инвертор чиқишига уланган. Тўғрилагич ва инвертор куч модуллари бошқариш блоки таркибидаги микропроцессор, бошқариш сигналини шакллантирувчи блок (драйвер), объект билан боғланиш блоки ва умумий шиналардан иборат. Бу тизимда микропроцессор чиқиши умумий шина орқали тўғрилагич драйверига, унинг чиқиши эса тўғрилагич ва инвертор куч блокларининг киришига, чиқиши эса инвертор куч модули блокларининг киришига уланади. Микропроцессор киришининг бири умумий шина орқали объект билан боғланиш блоки чиқишига, биринчи киришига ток ҳолат ўзгарткичи, иккинчисига эса кучланиш ҳолат ўзгарткичи уланган бўлиб, микропроцессор иккинчи кириши умумий шина орқали U_3 вазифаловчи манба сигналига уланади.



9-расм. Индукцион канал печни частота ўзгартиргич базасидаги бошқариш тизими блок схемаси

- 1 – бошқарилувчи тўғрилагич; 2 – силлиқловчи конденсатор; 3 – инвертор;
 4–КД–кучланиш датчиги; 5–ТД–ток датчиги; 6–индуктор;
 7 – МП – микропроцессор тизими; 8 – ТББ – тўғрилагични бошқариш блоки;
 9 – ИББ –инверторни бошқариш блоки; 10 – ОМЖ – объектни мослаштирувчи жихоз; 11 – умумий шина; 12 – МП – микропроцессор;
 13 – U_3 – вазифаловчи сигнал.

Таклиф этилган, частота ўзгартиргич- индукцион каналъ печь бошқариш тизимида электромагнит энергияни камайтириш хисобига печнинг фойжали иш коэффициентини ошириш мумкиндир.

Шундай қилиб, частота ўзгартиргич индукцион қиздириш таъминот манбаи бўлиб, стандарт частотали тармоқ кучланишини, эритиш жараёни учун оптимал талаб қилинадиган частотали бир фазали кучланишга (ёки ток) айлантириб бериш учун хизмат қилади.

ХУЛОСА

Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси «Индукцион печларнинг иссиқлик режимлари ва уларни энергия самарадорлигини ошириш» илмий иш натижалари асосида қуйидаги хулосалар тақдим этилган:

1. Индукцион печларнинг иссиқлик иш режимлари ва асосий энергетик параметрлари таҳлил қилинди, натижада қизиш қонуниятининг математик модели асосида электр ва иссиқлик режимлари учун автоматик бошқарув тизими такомиллаштирилди. Натижада ишлаб чиқилган бошқариш тизими иқтисодий жиҳатдан самарадор эканлигини аниқлаш имкони яратилган.

2. Индукцион печларни қиздириш жараёнларини ўрганишда биринчи маротаба эквивалент иссиқлик схемаларини қўллашнинг мақсадга мувофиқлиги исботланди. Натижада индукцион печларни иссиқлик режимлари учун эквивалент иссиқлик схемасини такомиллаштирилган модели яратилган.

3. Индукцион печнинг шихта билан юкланганлик даражаини турли хил катталикларида эритилаётган металлнинг эриш қонуниятлари аниқланиб, суyoқ металлни қўйиш вақтидаги ҳароратнинг кўтарилиши хисобий қиймати билан ҳақиқий қийматлари ҳисоблаб чиқилган фарқдаги мутлақ хато, $\Delta = -3,92$ °C ташкил этган. Натижада эритиладиган металлни барқарор ва нотурғун режимларидаги ҳар қандай даврида эриш ҳароратини аниқлаш қонуниятини яратилган.

4. Турли хил конструкцияларнинг русумли ва мақсадли индукцион печларни қиздириш ҳолати учун такомиллаштирилган эквивалент термик схемалар яратилган. Натижада индукцион печлар иш режимлари ва асосий энергетик параметрлари ҳароратини аниқлаш билан боғлиқ бўлган сарф-харажатларни камайтириш имкони яратилган.

5. Индукцион канал печларини бошқариш тизими конструктив соддалаштирилди ва частота ўзгартиргич-печь тизими ишлаб чиқилган. Натижада энергетик ва эксплуатацион кўрсаткичлари ошириш ва металл эритиш сифати ва ишлаб чиқариш самарадорлигини ошириш имконияти яратилган.

6. Индукцион печларнинг конструктив ва иш режим параметрларини моделлаштириш, автоматик бошқариш конструкциясини такомиллаштириш асосида ишлаб чиқилган қурилманинг амалиётга тадбиқ этилишидан олинган умумий иқтисодий самарадорлик бир йилда 38,340 млн. сўмни ташкил этган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
ДОКТОРА НАУК DSc 27.06.2017.Т.03.03 ПРИ
ТАШКЕНТСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ
и ООО «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР»**

ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ПУЛАТОВ АБРОР АБИДОВИЧ

**ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧЕЙ И ПОВЫШЕНИЕ
ИХ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ**

**05.05.02 – Электротехника. Электроэнергетические станции системы.
Электротехнические комплексы и установки.**

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)
ПО ТЕХНИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Ташкент-2018

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за В.2018.2.PhD/Т413.

Докторская диссертация выполнена в Ташкентском государственном техническом университете им. Ислама Каримова.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.tdtu.uz) и Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Научный руководитель: **Хашимов Арипджан Адылович,**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Хошимов Фозилджан Абидович,**
доктор технических наук, профессор

Алимхаджаев Камолиддин Тиллахаджаевич,
доктор технических наук, профессор

Ведущая организация: **Навоийский государственный горный институт**

Защита диссертации состоится «__» _____ 201__ г. в _____ часов на заседании Научного совета DSc 27.06.2017.Т.03.03 при Ташкентском государственном техническом университете и ООО «Научно-технический Центр». (Адрес: 100095, г Ташкент, ул. Университетская, 2. тел.: (99871) 246-46-00; факс: (99871) 227-10-32; e-mail: tstu_info@tdtu.uz.)

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского государственного технического университета (регистрационный номер - ____). (Адрес: 100095, Ташкент, ул. Университетская, 2. тел.: (99871) 246-03-41.)

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2018 года.
(протокол рассылки № «__» от «__» _____ 2018 г.)

К.Р. Аллаев
председатель научного совета
по присуждению ученой степени,
д.т.н., профессор, академик

О.Х. Ишназаров
ученый секретарь научного совета
по присуждению ученой степени,
д.т.н., с.н.с.

М.И. Ибадуллаев
председатель научного семинара
при научном совете по
присуждению учёной степени,
д.т.н., проф.

ВВЕДЕНИЕ (аннотация к диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и необходимость диссертационной темы. Во всем мире проблемы повышения энергоэффективности энергосберегающих индукционных печей, входящих в состав энерго- и ресурсозатратных электротехнологических устройств, совершенствование системы управления ими приобретают все большую актуальность. Так, «применение на заводах механики и машиностроения современных индукционных установок с полупроводниковыми источниками питания в развитых странах позволяет повысить показатели металлопроизводства на 20%...»¹. В этой сфере, в потреблении электроэнергии индукционных печей и автоматической системе управления отдельное внимание уделяется будущему энергоэффективных индукционных обрабатывающих устройств.

Также немаловажное значение в этой сфере придаётся повышению эффективности ресурсно- и энергоемких источников питания надежных и экологически чистых индукционных печей, занимающих ведущие места в мире по металлообработке в металлургической промышленности. В этом направлении, в том числе, особую роль играют моделирование процессов накаливания и теплорежимов, оперативный расчет энергетических и эксплуатационных параметров, совершенствование имеющихся автоматических систем управления, уменьшение удельного расхода электроэнергии, технологических сбоев и потери металла, производство технологий, увеличивающих объем производства металла и повышающих качество продукции, а также разработка новых усовершенствованных этапов расчета режима энергоэффективного плавления. Вместе с тем считается необходимым совершенствование метода расчета стационарных и нестационарных тепловых режимов работы и параметров индукционных печей.

Особое внимание уделяется требованиям к коренному совершенствованию имеющегося электротехнологического оборудования, применяемого в сфере электрометаллургии, которая является одной из важных отраслей экономики республики на основании современных требований и обновлению технологического уровня энергоэффективных автоматических систем управления, в том числе, увеличению возможностей автоматического управления в индукционных устройствах, а также производству наиболее качественной и большей продукции с потреблением минимального количества энергии. В 2017-2021 годах в Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан в том числе, в числе приоритетных задач определены задачи по «... сокращению в ближайшем будущем энерго- и ресурсоемкости экономики, ...широкому внедрению в производство энергосберегающих технологий, расширению использования возобновляющихся источников энергии»².

¹ <http://reltec.biz/upload/image/perspectivy>.

² Указ Президента Республики Узбекистан от 7 февраля 2017 года "О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан" № УП-4947.

Осуществление настоящих задач, в том числе совершенствование методов расчета основных энергетических показателей индукционных электрических печей и эффективных режимов работы автоматизированных частотных систем управления, а также определение параметров в соответствии с особенностями технологических процессов, является одним из важных вопросов.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит для осуществления задач, намеченных в Указе Президента Республики Узбекистан от 7 февраля 2017 года “О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан” № УП-4947, Постановлениях Президента Республики Узбекистан от 5 мая 2015 года "О Программе мер по сокращению энергоемкости, внедрению энергосберегающих технологий в отраслях экономики и социальной сфере на 2015-2019 годы» № ПП-2343, от 26 мая 2017 года «О программе мер по дальнейшему развитию возобновляемой энергетики, повышению энергоэффективности в отраслях экономики и социальной сфере на 2017 - 2021 годы» № ПП-3012, а также в других нормативно-правовых актах, касающихся настоящей деятельности.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий в республике. Настоящее исследование проведено в рамках приоритетного направления II. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение» развития науки и технологий в республике.

Степень изученности проблемы. По сегодняшний день в таких ведущих научных центрах и высших учебных заведениях мира, как University of Michigan (США), University of Waterloo (Канада), University of Hannover, Dresden University of Technology (Германия), Tokyo Technology Institute (Япония), Università degli Studi di Padova (Италия), Национальный исследовательский университет «МЭИ», Санкт-Петербургский электротехнический университет “ЛЭТИ”, Новосибирский государственный технический университет, Самарский государственный технический университет (Россия), Ташкентский государственный технический университет и Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (Узбекистан) ведутся широкомасштабные научно-исследовательские работы, направленные на развитие индукционных электротехнологических устройств.

Большой вклад в решение теоретических и практических проблем, направленных на развитие индукционных устройств и уменьшение в них энерго- и ресурсоемкостей внесли известные ученые R. Balan, V. Maties, O. Hancu, S. Stan, Ciprian, B. Boulet, K. Zhou, J. Doyle, K. Glover, А.П. Альтгаузен, М.Д. Бершицкий, В.А. Бодажков, А.И. Вайнберг, В.П. Вологдин, В.Б. Демидович, А.Д. Свенчанский, А.Б. Кувалдин, А.М. Колобнов, К.М. Махмудов, А.Е. Слухоцкий, С.А. Фарбман, Ю.И. Блинов и другие. А также узбекскими учеными А.А. Хашимовым, М.М. Хамудхановым, А.Т. Имомназаровым, М.Х. Жалиловым, М.Ф. Курматовым, Ф.А. Хошимовым и другими осуществлены работы по

совершенствованию расчета энергетических параметров индукционных печей с учетом их автоматических систем управления.

Несмотря на ощутимые успехи, проблемы, связанные с эффективным управлением параметрами рабочих режимов, с учетом уровня нагрузки и состояния тепла активных частей индукционных печей, недостаточно изучены. В настоящей работе путем применения эквивалентных термических схем при определении энергетических параметров и тепловых режимов индукционной печи на основании тепловых моделей усовершенствованы методы расчета температуры расплавляемого металла в любое время, всесторонне рассмотрены вопросы применения функциональной системы и алгоритмов частотного управления, а также предложены их решения.

Связь диссертационной работы с тематическими планами научно-исследовательских работ. Работа выполнена в соответствии с научно-исследовательским планом Ташкентского государственного технического университета на тему: «Энергосбережение электротехнических систем и комплексов» за номером 02/1-925 от 20.06.2012 года.

Целью исследования является усовершенствование расчёта тепловых процессов и энергетических параметров стационарного и нестационарного режимов нагрева индукционных печей на основе тепловой модели, а также разработка автоматических систем частотного управления.

Задачи исследования:

определение энергоэффективных энергетических показателей для управления тепловым режимом индукционных печей;

разработка математической модели теплового процесса, протекающего в индукционных печей на базе эквивалентных тепловых схем;

усовершенствование расчёта энергетических параметров индукционных печей для различных значений степени загрузки;

разработка автоматической системы управления, обеспечивающей эффективную работу индукционной печи на основе тепловой модели.

усовершенствование функциональных систем регулирования индукционных печей с различными ёмкостями и исполнениями.

Объектом исследований являются – индукционная печь механико – машиностроительного завода. а также её тепловые режимы и параметры

Предметом исследования являются – стационарные и нестационарные режимы нагрева, энергоэффективные показатели, определяемые с использованием эквивалентных тепловых схем индукционной печи и разработка автоматических систем частотного управления.

Методы исследования. В исследовании использована математическая модель управления электротехнологическими установками на основе процессов электротехнологии и нагрева электрических устройств и машин, которая разработана на базе эквивалентных тепловых схем для решения

уравнений теплового баланса индукционной печи, а в планировании эксперимента привлечены физические модели.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

усовершенствованы способы расчета энергетических параметров для стационарного и нестационарного режимов работы при различных значениях их степени загрузки;

разработана математическая модель тепловых процессов индукционных печей канального и тигельного типа с использованием эквивалентных тепловых схем;

усовершенствованы эквивалентные тепловые схемы для ускоренного расчета тепловых процессов, протекающих в отдельных активных элементах печи и расплавляемого металла на основе уравнений теплового баланса;

разработана система частотного автоматического управления процессом расплавления металла индукционной канальной печи.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработана термическая модель теплового процесса и параметров при различных значениях степени загрузки на основе эквивалентных тепловых схем;

разработана система автоматического частотного управления с совершенствованием источника питания системы трансформатор – индуктор печи для эффективной работы индукционной канальной печи;

разработана усовершенствованная термическая модель теплового процесса и энергетических параметров для индукционных печей различного исполнения.

Достоверность результатов исследования. Достоверность результатов исследования обосновывается проведением теоретических и экспериментальных исследований в индукционных печах канального и тигельного типа и практикой их внедрения, а также итогами взаимной согласованности теоретических и экспериментальных результатов исследования.

Научная и практическая значимость результатов исследований. Научная значимость полученных результатов характеризуется совершенствованием расчёта тепловых режимов и параметров и разработкой математической модели теплового процесса при различных значениях степени загрузки на основе эквивалентных тепловых схем для решения систем уравнений теплового баланса, а также получены закономерности изменения энергетических параметров и разработка системы частотного автоматического управления печи.

Практическая значимость полученных результатов исследования состоит в повышении эффективности регулированием подаваемой мощности с учетом изменения энергетических параметров для различных значений степени загрузки плавильного агрегата и разработка системы

автоматического частотного управления печи для определения эффективных режимов работы основного оборудования электросталеплавильного цеха.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных научных результатов по повышению энергоэффективности индукционных печей:

внедрена функциональная схема управления на основе частотного регулирования электрической энергии, получаемой индукционной печью из источника питания на АО «Ташкентский механический завод» (справка “Ўзбекистон темир йўллари” от 28 мая 2018 года №НГ/2652). Использование результатов научных исследований дало возможность сократить время расплавки на 10% за счёт усовершенствования передачи полезной мощности индуктора на загрузку в индукционных печах;

внедрен блок определения температуры расплавляемого металла в любой стадии плавки на основе термической модели индукционной печи на АО «Ташкентский механический завод» (справка “Ўзбекистон темир йўллари” от 28 мая 2018 года №НГ/2652). Использование результатов научных исследований дало возможность продлить срок службы изнашиваемого огнеупорного тигля на 10% и повысить эксплуатационные показатели на 3-5 %;

на АО «Ташкентский механический завод» внедрено новое техническое решение по модернизации системы автоматического управления индукционной канальной печью, которое дало возможность упростить систему переводя её с трансформаторного управления на частотное и уменьшило потери на 5-7 %, увеличивая срок службы на 8-10 лет.

Апробация результатов исследования. Результаты данного исследования прошли апробацию на 17 научно-практических конференциях и семинарах, в том числе на 8-и международных и 9-ти республиканских конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликовано всего 19 научных работ. Из них 1 монография, 4 научных статей в республиканских журналах, рекомендованных ВАК Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, получен 1 патент на изобретения.

Структура и объем диссертации. Структура диссертации состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 120 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится обоснование актуальности и востребованности диссертационного исследования, описание цели и основных задач, а также объектов и предметов, соответствующих приоритетным направлениям развития науки и технологии Республики Узбекистан, научная новизна и практические результаты, теоретическая и прикладная значимость результатов, сведения об опубликованных работах и структуре диссертации.

В первой главе диссертации «**Общая характеристика индукционных печей**» рассматривается принцип работы индукционных тигельных печей и применение их в производстве получения черных и цветных металлов, а также их автоматическое управление. Изучены и проанализированы научно-исследовательские работы зарубежных и отечественных ученых в области методик расчета индукционных печей на металлургических предприятиях, подробно приведена характеристика исследуемого объекта.

Приведены разновидности основных индукционных установок и принципы их работы, а также конструкционные особенности этих устройств. Индукционные печи, применяемые в литейном производстве для плавки черных и цветных металлов, характеризуются большой установленной мощностью. Задача управления ими состоит в поддержании величины максимальной мощности в период расплавления и заданной температуры в период выдержки (для удаления из расплава серы и примесей) перед разливкой. Для питания ИТП малой и средней мощности большое распространение нашли тиристорные преобразователи частоты (ТПЧ). Как правило, ТПЧ состоит из трехфазного выпрямителя и инвертора. Большинство серийно выпускаемых ТПЧ имеют параллельную или последовательно-параллельную мостовую схему инвертирования тока. Выходными параметрами ТПЧ как источника питания являются частота тока $f_{и}$ и напряжение на нагрузке $U_{н}$. ТПЧ применяются, когда систему электрического питания ИТП невозможно исполнить на промышленную частоту, это связано с объемом производимой продукции и параметрическими данными самого тигля. По мере роста объема (массы) выплавляемого металла падает необходимая частота питания нагрузки.

Из специфических особенностей ИТП позволяют выделить два типа построения систем управления тепловым режимом:

системы управления, разомкнутые по температуре и с программным управлением передаваемой в расплавляемый металл мощности;

замкнутые с отбором сигнала обратной связи по температуре расплавляемого металла и основных элементов печи или от математической модели теплового состояния ИТП как объекта.

Предлагается функциональная схема регулирования теплового режима ИТП с использованием расчетной температуры расплавляемого металла, получаемого из модели теплового состояния печи, представленная на рис. 1.

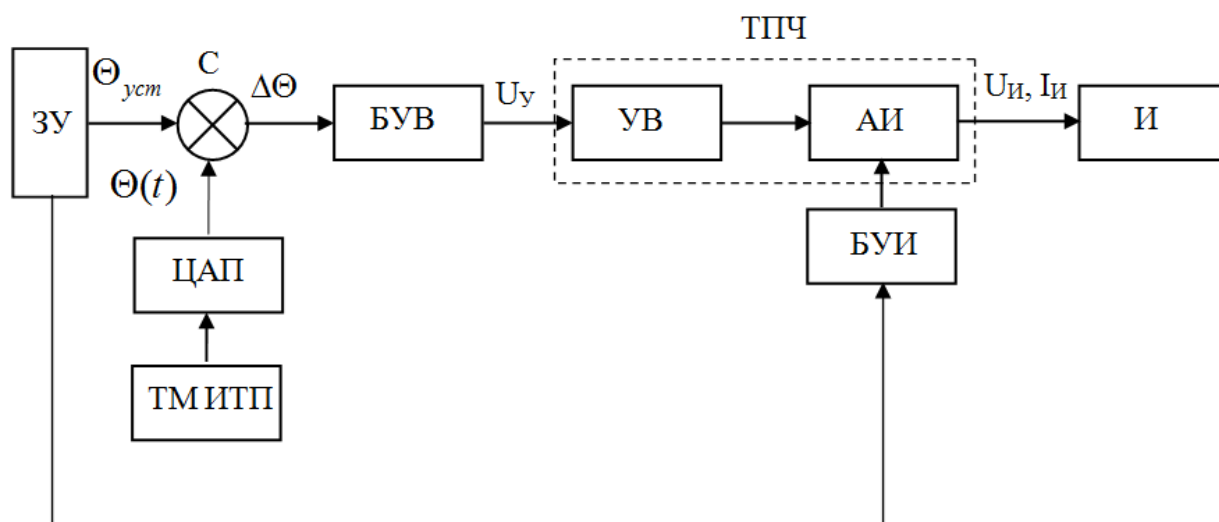


Рис. 1. Функциональная схема регулирования теплового режима ИТП:

ЗУ – задающее устройство, С – сумматор, ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь, ТМ ИТП – тепловая модель ИТП, ТПЧ – тиристорный преобразователь частоты, БУВ – блок управления выпрямителем, УВ – управляемый выпрямитель, АИ – автономный инвертор, БУИ – блок управления инвертором, И – индуктор ИТП

Функциональная схема регулирования теплового режима ИТП работает следующим образом. В задающем устройстве ЗУ формируется сигнал управления, пропорциональный значению температуры расплавляемого металла $\Theta_{уст}$ и этот сигнал подается на первый вход сумматора С. На второй вход сумматора С подается сигнал, пропорциональный температуре расплавляемого металла определенного времени для периода от холодного состояния до заданной температуры расплавления металла Θ_n (для времени Δt_n , см. рис. 2).

Цифровой сигнал температуры расплавляемого металла в виде непрерывной функции по времени, получаемый на выходе математической модели теплового состояния ИТП, преобразуется в аналоговый сигнал в цифро-аналоговом преобразователе ЦАП по ступенчатой характеристике с постоянным приращением по времени Δt (мин). Это означает, что в каждый промежуток времени в сумматоре С происходят сравнения $\Theta_{уст}$ и Θ_n , и тем самым вырабатывается сигнал управления мощностью для расплавления металла в ИТП или его выдержки в частном случае. Точность шага приращения времени и температуры расплавляемого металла в основном зависит от правильного составления математической модели теплового состояния ИТП. Поэтому к созданию тепловой модели теплового состояния ИТП предъявляются особые жесткие требования.

Рассмотренный алгоритм управления тепловым режимом ИТП непрерывного действия можно реализовать на базе промышленного контроллера или микропроцессора.

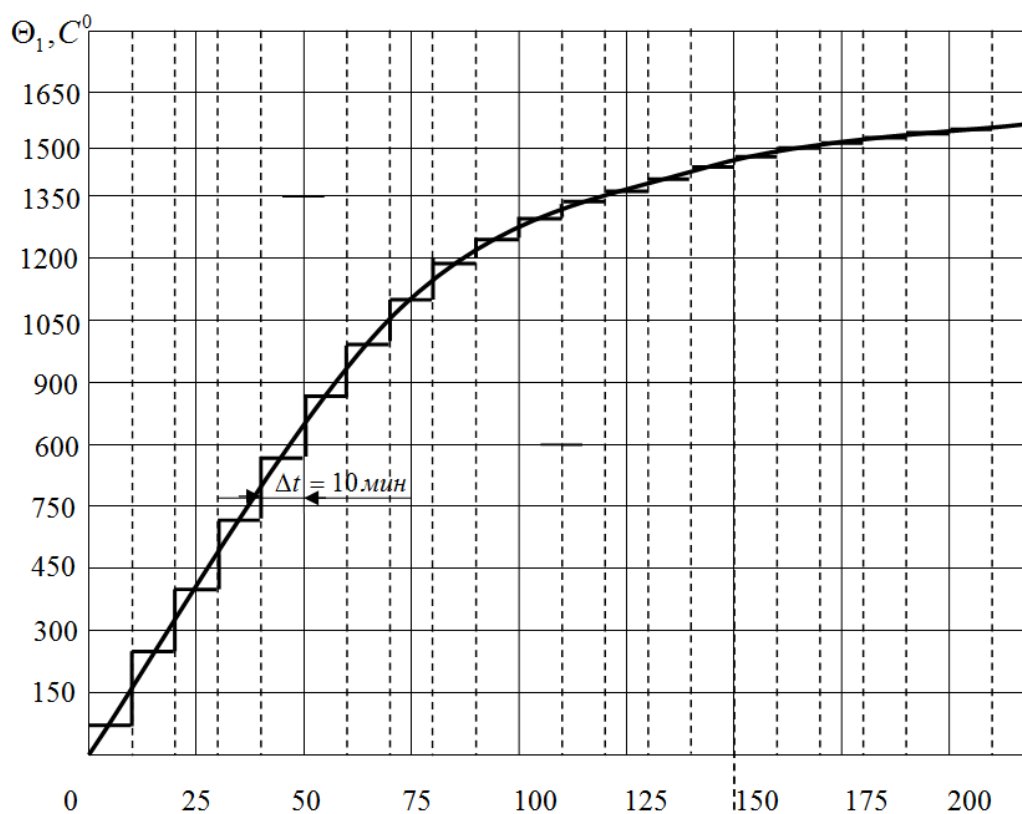


Рис. 2. Кривые изменения средней температуры расплавляемого металла от холодного состояния до состояния расплавления в ИТП на выходе математической модели для значений загрузки тигля (при 100%)

Во второй главе диссертации «Расчет тепловых процессов, протекающих в индукционных тигельных печах» представлена методика эквивалентного преобразования ЭТС с целью минимизации числа тепловых тел и математических операций для вычисления температур расплавляемого металла и активных элементов индукционных печей. Основные положения, позволяющие применить при расчете тепловых цепей теорию линейных электрических цепей, состоят в том, что действительные распределенные источники тепла и распределенные тепловые проводимости и теплоотдачи заменяются небольшим количеством сосредоточенных источников тепла и сосредоточенными эквивалентными тепловыми проводимостями и теплоотдачами.

Разработана блок-схема алгоритма для вычисления температуры расплавляемого металла и активных элементов температуры активных частей ИП на основе преобразованных ЭТС тепловых тел. Также представлена математическая модель теплового состояния расплавляемого металла и активных элементов индукционной тигельной печи, анализируются ее возможности, недостатки и области применения. Особенности применения ЭТС для исследования процессов нагрева основных конструктивных частей и впаиваемого металла тигельных индукционных печей заключаются в том,

что в зависимости от количества рассматриваемых тепловых тел и закона управления печью составляется система уравнений теплового баланса в соответствии с ее тепловой схемой замещения.

Представлены результаты стационарного и нестационарного режимов нагрева расплавляемого металла и активных элементов тигельной печи с емкостью 1000кг, рассчитанные на основе разработанной методики теплового расчета преобразованных ЭТС и их анализе.

Составленная ЭТС ИТП с емкостью до 1000кг, представлен как тепловая система, состоящая из четырех взаимосвязанных по тепловому отношению тепловых тел: расплавляемый металл, индуктор, футеровка и корпус с внутренними источниками тепла (см. рис. 3). Эти тепловые тела между собой соединены соответствующими тепловыми проводимостями, расплавляемый металл и корпус также имеют теплоотдачи в окружающую среду, и все тепловые тела имеют соответственно источники тепла. Составляем систему дифференциальных уравнений теплового баланса соответствующей ЭТС:

$$\left. \begin{aligned} C_1 \frac{d\Theta_1}{dt} + \Lambda_{11}\Theta_1 - \Lambda_{12}\Theta_2 - \Lambda_{13}\Theta_3 &= P_1, \\ C_2 \frac{d\Theta_2}{dt} - \Lambda_{21}\Theta_1 + \Lambda_{22}\Theta_2 - \Lambda_{23}\Theta_3 - \Lambda_{24}\Theta_4 &= P_2, \\ C_3 \frac{d\Theta_3}{dt} - \Lambda_{31}\Theta_1 - \Lambda_{32}\Theta_2 + \Lambda_{33}\Theta_3 - \Lambda_{34}\Theta_4 &= P_3, \\ C_4 \frac{d\Theta_4}{dt} - \Lambda_{42}\Theta_2 - \Lambda_{43}\Theta_3 + \Lambda_{44}\Theta_4 &= P_4 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

В записи уравнений теплового баланса (1) и в условных обозначениях в ЭТС приняты одинаковые обозначения – индексы означают порядковый номер рассматриваемых активных частей ИТП.

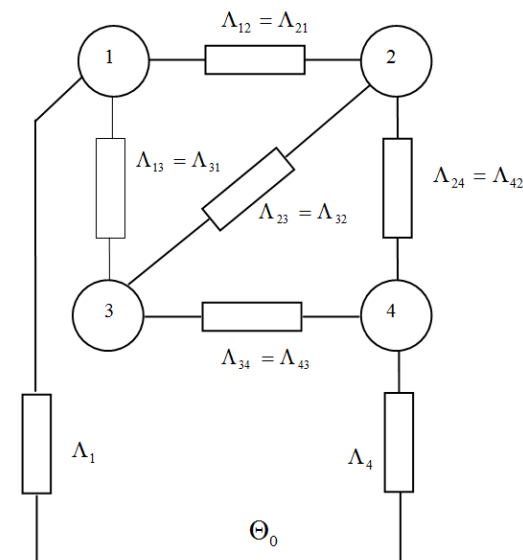


Рис. 3. Эквивалентная тепловая схема ИТП с емкостью до 1000кг

Общий вид решения данной системы дифференциальных уравнений теплового баланса имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \Theta_1(t) &= -A_{11}e^{-r_1t} - A_{12}e^{-r_2t} - A_{13}e^{-r_3t} - A_{14}e^{-r_4t} + \sum_{i=1}^4 A_{1i}, \\ \Theta_2(t) &= -A_{21}e^{-r_1t} - A_{22}e^{-r_2t} - A_{23}e^{-r_3t} - A_{24}e^{-r_4t} + \sum_{i=1}^4 A_{2i}, \\ \Theta_3(t) &= -A_{31}e^{-r_1t} - A_{32}e^{-r_2t} - A_{33}e^{-r_3t} - A_{34}e^{-r_4t} + \sum_{i=1}^4 A_{3i}, \\ \Theta_4(t) &= -A_{41}e^{-r_1t} - A_{42}e^{-r_2t} - A_{43}e^{-r_3t} - A_{44}e^{-r_4t} + \sum_{i=1}^4 A_{4i}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где: $A_{11}, A_{12}, \dots, A_{1i}; A_{21}, A_{22}, \dots, A_{2i}; A_{ji}$ – постоянные интегрирования, определяются из начальных и конечных условий интегрирования; j и i – порядковые числа тепловых тел.

С помощью данной методики расчета можно рассчитать нестационарные процессы нагрева, протекающие в впаляемом металле и основных конструктивных частях тигельной индукционной печи и определить превышения температуры интересующих частей печи.

Поскольку стационарный режим нагрева тигельной индукционной печи является частным случаем нестационарного, то приняв что $\frac{d\Theta_1}{dt} = \frac{d\Theta_2}{dt} = \frac{d\Theta_3}{dt} = \frac{d\Theta_4}{dt} = 0$, получим систему уравнений теплового баланса и запишем ее в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} \Lambda_{11} - \Lambda_{12} - \Lambda_{13} & 0 \\ -\Lambda_{21} & \Lambda_{22} - \Lambda_{23} - \Lambda_{24} \\ -\Lambda_{31} - \Lambda_{32} & \Lambda_{33} - \Lambda_{34} \\ 0 - \Lambda_{42} - \Lambda_{43} & \Lambda_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Theta_1 \\ \Theta_2 \\ \Theta_3 \\ \Theta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Таким образом, после эквивалентных преобразований данная ЭТС заменяется преобразованными ЭТС для каждого теплового тела, которые по тепловому отношению не связаны и к ним применяются соответствующие уравнения теплового баланса для нестационарного режима нагрева, имеющие дифференциальные уравнения первого порядка, а для стационарного режима нагрева – квадратная матрица тепловых проводимостей заменяется диагональной матрицей преобразованных теплоотдач.

Объединив преобразованные эквивалентные тепловые схемы тепловых тел тигельной индукционной печи, представим их, как адекватную к исходной ЭТС (рис. 4), где a – геометрический образ преобразованной ЭТС тепловых тел ИТП, b – преобразованная ЭТС тепловых тел ИТП.

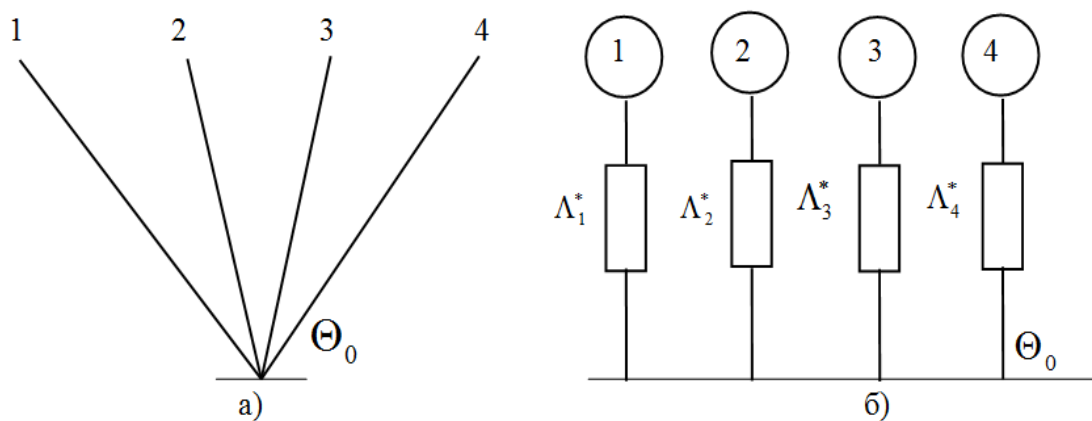


Рис. 4. Преобразованная ЭТС ИТП:
а – геометрический образ преобразованной ЭТС тепловых тел ИТП, б – преобразованная ЭТС тепловых тел ИТП

Соответственно, для преобразованной ЭТС объединим уравнения теплового баланса для нестационарного и стационарного режимов нагрева и составим систему уравнений нестационарного (4) и стационарного (5) режимов.

$$\left. \begin{aligned} C_1^* \frac{d\Theta_1}{dt} + \Lambda_1^* \Theta_1 &= P_1^*, \\ C_2^* \frac{d\Theta_2}{dt} + \Lambda_2^* \Theta_2 &= P_2^*, \\ C_3^* \frac{d\Theta_3}{dt} + \Lambda_3^* \Theta_3 &= P_3^*, \\ C_4^* \frac{d\Theta_4}{dt} + \Lambda_4^* \Theta_4 &= P_4^*. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \Lambda_1^* & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Lambda_2^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Lambda_3^* & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Lambda_4^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Theta_1 \\ \Theta_2 \\ \Theta_3 \\ \Theta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1^* \\ P_2^* \\ P_3^* \\ P_4^* \end{bmatrix} \quad (5)$$

Таким образом, рассмотрение тигельной индукционной печи как тепловой системы, состоящей из четырёх взаимосвязанных в тепловом отношении с внутренними источниками тепла тел, определение превышений температур в искомых частях печи можно осуществить на основе выше указанной методики преобразования ЭТС.

Третья глава диссертации «Анализ тепловых параметров и процессов нагрева индукционных тигельных печей для различных степеней их загруженности» посвящена анализу изменения тепловой проводимости и теплоотдачи связанных с тепловым телом «расплавляемый металл», соответствующих изменению степени загруженности тигля.

Например, тепловая проводимость $\Lambda_{12}=\Lambda_{21}$ между расплавляемым металлом и индуктором через футеровку, тепловая проводимость $\Lambda_{13}=\Lambda_{31}$ между расплавляемым металлом и футеровкой через огнеупорный слой и теплоотдача Λ_1 от зеркала поверхности расплавляемого металла в окружающую среду.

Изменение степени загрузки тигля прямо пропорционально объему заполнения тигля шихтой. Отличной от 100% заполненной шихты контактируемая часть будет меньше на такое же значение массы шихты и соответственно тепловая проводимость тоже. Поэтому значения тепловых проводимостей $\Lambda_{12}=\Lambda_{21}$ и $\Lambda_{13}=\Lambda_{31}$ с уменьшением степени загрузки тигля пропорционально уменьшаются (рис. 5.). Теплоотдача Λ_1 в окружающую среду от зеркала расплавляемого металла также изменяется в зависимости от степени загрузки тигля, так как пропорционально расстоянию от зеркала расплавляемого металла до верхней части тигля, соответственно, изменяется коэффициент теплоотдачи.

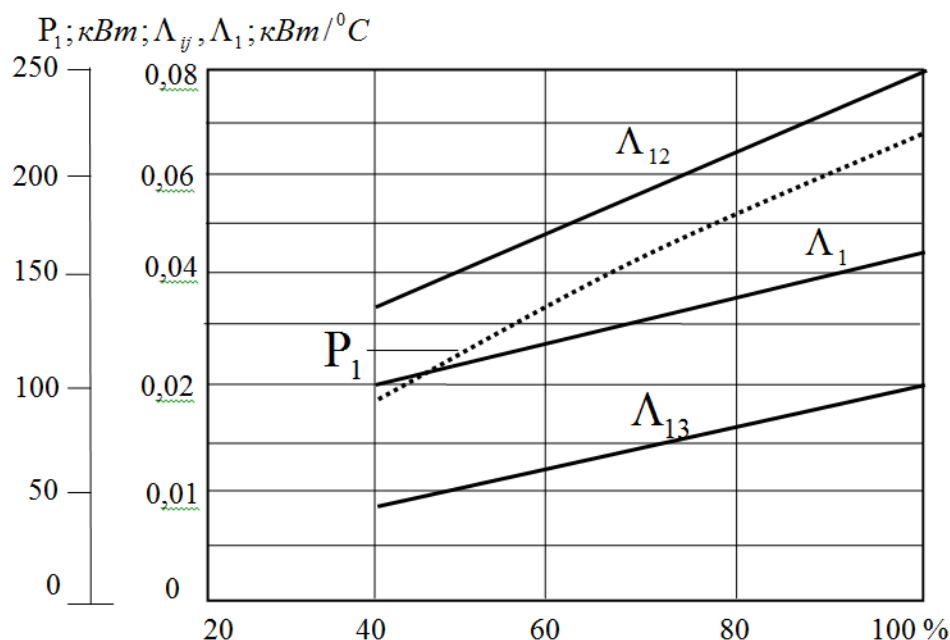


Рис. 5. График изменения тепловых проводимостей Λ_{12} , Λ_{13} и теплоотдачи Λ_1 , а также активной мощности P_1 в функции степени загрузки тигля ИТП с шихтой

В четвертой главе «Особенности разработки эквивалентной тепловой схемы различных индукционных печей» представлены принципы построения эквивалентных тепловых схем и составлена система уравнений теплового баланса индукционных печей различных конструкций и режимов работы. При закрытом состоянии крышки ИТП выход тепла из печи намного уменьшается, прямая теплоотдача от расплавляемого металла из тигля в окружающую среду отсутствует, она заменяется передачей тепла расплавляемого металла на крышку печи. Поэтому ЭТС ИТП с крышкой будет иметь следующий вид (рис. 6).

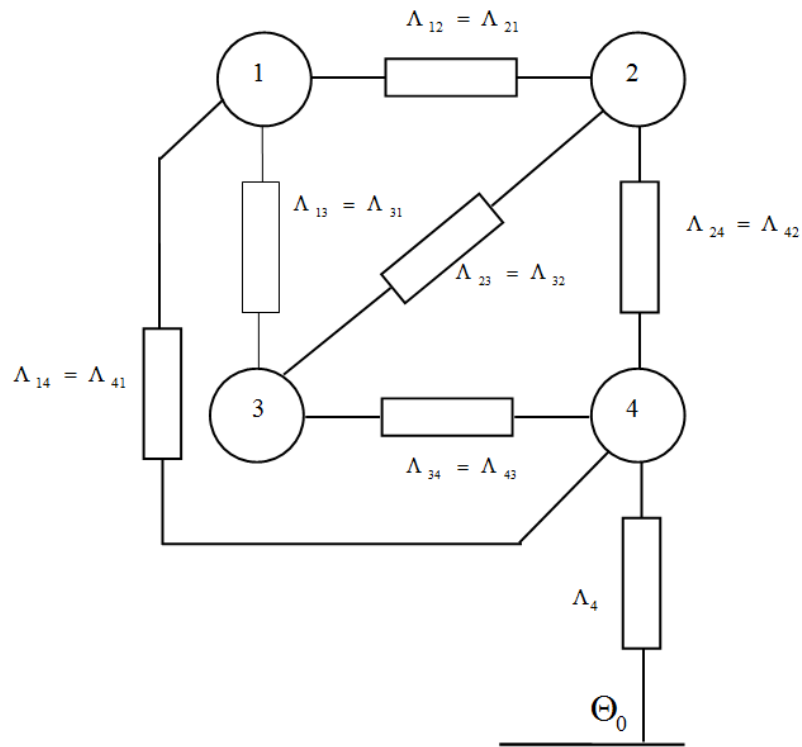


Рис. 6. Эквивалентная тепловая схема ИТП с крышкой

Система уравнений теплового баланса ИТП имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} C_1 \frac{d\Theta_1}{dt} + \Lambda_{11}\Theta_1 - \Lambda_{12}\Theta_2 - \Lambda_{13}\Theta_3 - \Lambda_{14}\Theta_4 &= P_1, \\ C_2 \frac{d\Theta_2}{dt} - \Lambda_{21}\Theta_1 + \Lambda_{22}\Theta_2 - \Lambda_{23}\Theta_3 - \Lambda_{24}\Theta_4 &= P_2, \\ C_3 \frac{d\Theta_3}{dt} - \Lambda_{31}\Theta_1 - \Lambda_{32}\Theta_2 + \Lambda_{33}\Theta_3 - \Lambda_{34}\Theta_4 &= P_3, \\ C_4 \frac{d\Theta_4}{dt} - \Lambda_{41}\Theta_1 - \Lambda_{42}\Theta_2 - \Lambda_{43}\Theta_3 + \Lambda_{44}\Theta_4 &= P_4. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Исследование теплового состояния процесса плавки в индукционной канальной печи осуществляется с учетом следующих положений и допущений: печь считаем симметричной, ванну, как конструктивный элемент, учитывать не будем; распределенные электрические и тепловые параметры канальной печи заменим на эквивалентные сосредоточенные. Изменение тепловых и электрических параметров в зависимости от температуры заранее учтено.

С учетом принятых допущений, индукционную канальную печь по тепловому отношению можно представить, как тепловую систему, состоящую из следующих тепловых тел: 1 – индуктор, 2 – магнитопровод, 3 – расплавляемый металл, с соответствующими тепловыми проводимостями между ними (рис. 7).

Методика определения числа тепловых тел эквивалентной тепловой схемы (ЭТС) и соответствующих тепловых проводимостей между ними -

индукционной канальной печи, составление к ней системы уравнений теплового баланса для стационарного и нестационарного режимов нагрева - основываются на физических процессах расплавления металлов в индукционных печах.

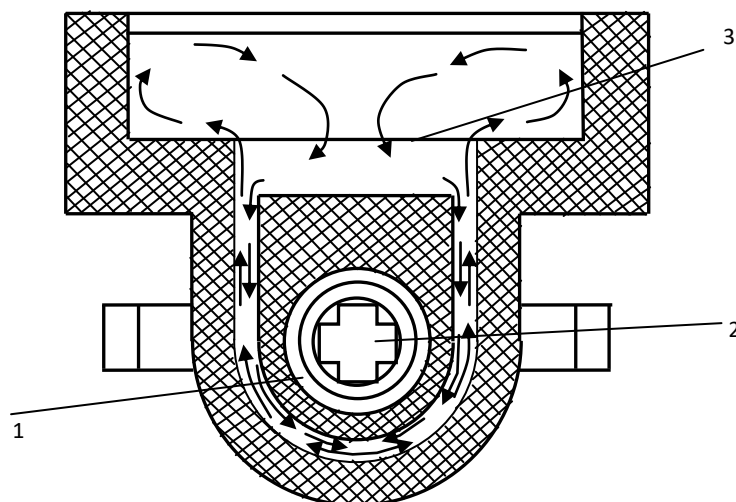


Рис. 7. Основные конструктивные элементы индукционной канальной печи: 1 – индуктор; 2 – магнитопровод; 3 – металл.

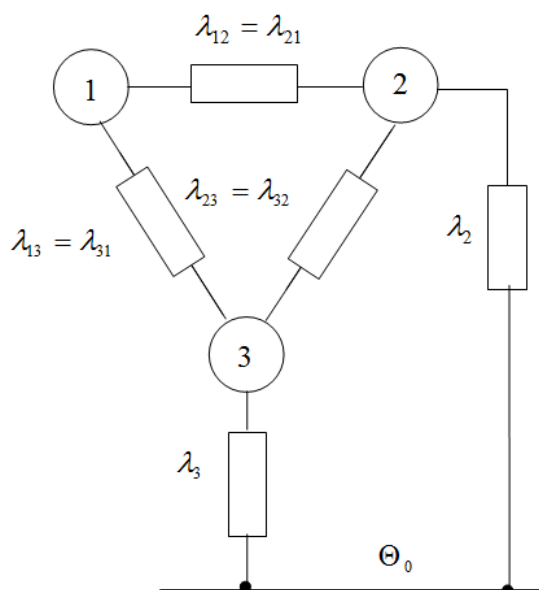


Рис. 8. Эквивалентная тепловая схема индукционной канальной печи

Таким образом, разработанная методика расчета тепловых процессов индукционных канальных печей позволяет определить температуру расплавляемого металла и основных конструкций печи, как в стационарном, так и в нестационарных тепловых режимах.

В пятой главе диссертации «Принципы построения системы управления индукционной канальной печью» проанализированы существующие недостатки системы управления канальными печами с

открытым каналом. Разработана структура многофункциональной системы управления индукционной канальной печью.

Задачей проводимых научных исследований является создание новой системы управления индукционной канальной печью путем регулирования параметров индукционной канальной печи, способствующей расширению ее функциональных возможностей, повышению надежности, эффективности работы для разновидностей выплавляемого металла и его сплавов за счет совершенствования устройства системы и упрощения конструкции.

Данная структура позволяет повысить энергетическую эффективность печи за счет оптимального управления режимами плавки и избирательную работу печи на требуемой частоте в зависимости от выплавляемого материала, высокую производительность и качество.

В диссертационной работе предлагается система управления индукционной установки на базе преобразователя частоты (ПЧ) (рис. 9). Система полностью исключает отмеченные недостатки предыдущих систем (автотрансформатор, ступенчатый трансформатор, симметрирующее устройство). Так как преобразователь частоты получает питание от трехфазной сети, а используемый выход является однофазным, отпадает необходимость в симметрирующем устройстве и достаточно лишь сохранить компенсирующее устройство для компенсации реактивной мощности, потребляемой индуктором.

Электротехническая система индукционной печи содержит индуктор, подключенный к блоку силовых модулей однофазного инвертора, который соединен с фильтром и трехфазным управляемым выпрямителем, датчики тока и напряжения подключены к выходу инвертора. Блок управления силовыми модулями выпрямителя и инвертора включает в себя микропроцессор, блок формирования управляющего сигнала (драйвера), блок связи с объектом и общую шину. При этом выход микропроцессора через общую шину соединен со входом формирования управляющего сигнала выпрямителя, выход которого соединен со входом блока силовых модулей выпрямителя и с входом формирования управляющего сигнала инвертора, выход которого соединен со входом блока силовых модулей инвертора. Один из входов микропроцессора через общую шину соединен со выходом блока связи с объектом, первый вход которого соединен с датчиком тока, а второй вход с датчиком напряжения, второй вход микропроцессора соединен через общую шину с источником сигнала задания U_3 .

В предложенном устройстве управления по системе преобразователь частоты-индукционная канальная печь уменьшаются потери электромагнитной энергии, что увеличивает коэффициент полезного действия печи.

Таким образом, преобразователь частоты является источником питания для индукционного нагрева, который преобразует напряжение питающей сети со стандартной частотой в однофазное напряжение (или ток) с частотой, оптимально необходимой для выполнения плавки.

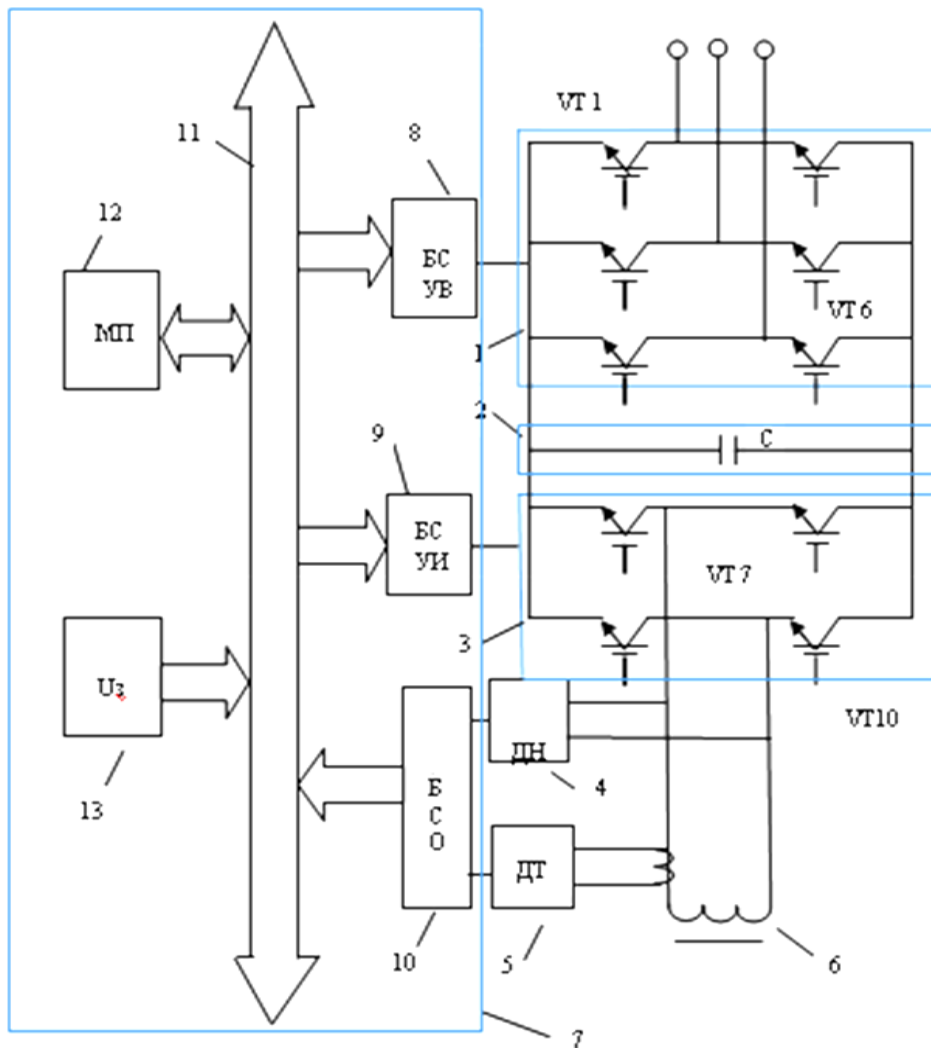


Рис. 9. Блок схема системы управления индукционной установкой на базе преобразователя частоты.

1 – управляемый выпрямитель; 2 – сглаживающий конденсатор; 3 – инвертор; 4 – ДН – датчик напряжения; 5 – ДТ – датчик тока; 6 – индуктор; 7 – МП – микропроцессорная система; 8 – БСУВ – блок системы управления выпрямителем; 9 – БСУИ – блок системы управления инвертором; 10 – УСО согласующее устройство объектом; 11 – общая шина; 12 – МП – микропроцессор; 13 – U_3 – задающий сигнал.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов диссертационной работы «Тепловые режимы индукционных печей и повышение их энергоэффективности» доктора философии по техническим наукам (PhD) представлены следующие заключения:

1. Проанализированы тепловые режимы работы и основные энергетические параметры индукционных печей, в результате, на основании математической модели закономерности накаливания усовершенствована автоматическая система управления для электрических и тепловых режимов. Впоследствии создана возможность определения экономической эффективности разработанной системы управления.

2. Впервые во время изучения процессов накаливания индукционных печей доказана целесообразность применения эквивалентных тепловых схем. В результате создана усовершенствованная модель эквивалентной тепловой схемы для тепловых режимов индукционных печей.

3. Выявлена закономерность плавления металла, расплавливаемого в различных значениях уровня загруженности индукционной печи шихтой, где абсолютная погрешность вычисленной разницы между рассчитанным и настоящим значением повышения температуры во время литья жидкого металла составляет $\Delta = -3,92$ °C. В результате выявлена закономерность определения температуры плавления металла при любых периодах устойчивых и неустойчивых режимов.

4. Созданы усовершенствованные модели эквивалентной термической схемы по состоянию накаливания индукционных печей различных конструкционных марок и целей. В итоге стало возможным уменьшение расходов, связанных с определением режимов работы и температуры основных энергетических параметров индукционных печей.

5. Конструктивным образом упрощена система управления индукционных канальных печей и разработана система изменения частоты. В результате появилась возможность повышения энергетических и эксплуатационных показателей, а также качества металлоплавления и эффективности производства.

6. Общая экономическая эффективность от внедрения конструкций, разработанных на основании моделирования конструктивных и рабочих режимных параметров индукционных печей, усовершенствования конструкции автоматического управления составила 38,340 млн. сумов в год.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON THE ADOPTION OF THE ACADEMIC
DEGREE OF THE DOCTOR OF SCIENCE DSC 27.06.2017.T.03.03 AT
THE TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY**

**TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY
NAMED AFTER ISLAM KARIMOV**

PULATOV ABROR ABIDOVICH

«Thermal regimes of induction furnaces and their energy efficiency increase»

**05.05.02 – Electrical Engineering. Electric power stations and systems. Electric technical
complexes and installations**

**DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD)
ON TECHNICAL SCIENCES**

Tashkent-2018

The theme of the dissertation of doctor of philosophy(PhD) in technical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B.2018.2.PhD/T413.

The dissertation has been prepared at Tashkent State Technical University named after Islam Karimov.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian and English (resume)) on the website www.tdtu.uz and on the website of «ZiyoNet» Information and education portal (www.ziynet.uz).

Scientific Adviser:	Khashimov Aripdjan Adilovich, doctor of technical science, professor
Official Opponents:	Khoshimov Foziljon Abidovich doctor of technical science, professor Alimxadjaev Komolitdin Tillaxodjaevich, doctor of technical science, professor
Lead organization:	Navoi State Mining Institute

The defense of dissertation will take place on "__" ____ 2018 at ____ o'clock at a meeting of the Scientific council No. DSc.27.06.2017.T.03.03 under Tashkent State Technical University and LLC "Scientific-Technical Centre" (Address: 100095, Tashkent, Universitet st., 2. Tel./fax: (99871) 227-10-32; e-mail: tadqiqitchi@tdtu.uz).

The doctoral dissertation can be reviewed at the Information-resource center of Tashkent State Technical University (is registered number No____) (Address: 100095, Tashkent, Universitetskaya st., 2. Tel./fax: (99871) 246-03-41; e-mail: tadqiqitchi@tdtu.uz).

Abstract of the dissertation sent out on "__" ____ 2018
(Protocol of the delivery No _____ dated “__” _____ 2018)

K.R. Allaev
Chairman of scientific council for awarding
scientific degrees Doctor of technical
sciences, Professor, Academician

O.H. Ishnazarov
Scientific secretary of scientific council
on awarding scientific degrees,
Doctor of technical sciences, Senior Scientific Researcher

M.I. Ibadullaev
Chairman of scientific seminar under scientific council
for awarding scientific degrees
Doctor of technical sciences, Professor

INTRODUCTION (abstract of thesis)

Research objective is to improve the calculation of thermal processes and energy parameters of stationary and non-stationary modes of heating induction furnaces, based on the thermal model, and the development of automatic frequency control systems.

Research problems:

determination of energy-efficient energy indexes for controlling the thermal conditions of induction furnaces;

development of a mathematical model on the basis of equivalent thermal schemes of the thermal process taking place in induction furnaces;

improvement of the calculation of the energy parameters of induction furnaces for different values of the degree of functioning capacity;

development of an automatic control system based on the thermal model providing an efficient control of the induction furnace;

improvement of functional control systems for induction furnaces of various capacities and execution.

Object of the research is an induction furnace, its thermal regimes and parameters.

The scientific novelty of the research is as follows:

methods for calculating energy parameters for stationary and nonstationary operation modes have been improved for different values of the degree of functioning capacity;

mathematical model of thermal processes of channel and crucible induction furnaces is developed with the use of equivalent thermal schemes;

equivalent thermal schemes for the accelerated calculation of thermal processes occurring in separate active elements of the furnace and melted metal on the basis of the heat balance equations have been improved;

system of frequency automatic control of the process of metal melting induction channel furnace has been developed.

The structure and outline of the research work. The thesis consists of an introduction, five chapters, a conclusion, a list of literature, and applications. The volume of the thesis is 120 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙЎХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; I part)

1. Хашимов А.А., Имамназаров А.Т., Пулатов А.А. Тепловые режимы работы индукционных тигельных печей. Монография. – Тошкент: Фан ва технология, 2013. – 125 с.

2. Пулатов А.А. Методика преобразования эквивалентных тепловых схем для расчёта процесса нагрева тигельных индукционных печей малой и средней мощности // Журнал “Вестник Туринского политехнического университета в городе Ташкенте”. – Ташкент, 2018. – №1. – С.33. (05.00.00; № 25).

3. Пулатов А.А. Особенности разработки эквивалентной тепловой схемы индукционных тигельных печей с закрытой крышкой // Журнал «Вестник ТашГТУ». – Ташкент, 2018. – №1. – С. 74-77. (05.00.00; № 16).

4. Пулатов А.А. Экспериментальная индукционная установка для термической обработки и расплавления цветного металла // Научно-технический журнал «Проблемы энерго-и ресурсосбережения». – Ташкент, 2018. – №1. – С. 53-57. (05.00.00; №21).

5. Хашимов А.А., Пулатов А.А. Разработка новой системы управления для индукционных канальных печей для плавки цветных металлов и сплавов с применением частотных преобразователей// Научно-технический журнал «Проблемы энерго-и ресурсосбережения». – Ташкент, 2018. – №2. – С. 235-239. (05.00.00; №21).

6. Патент РУз № IAP 05405. Система управления индукционной канальной печи / Хашимов А.А., Мирисаев А.У., Пулатов А.А. // Зарегистрирован в государственном реестре изобретений Республики Узбекистан 16.04.2017. Оpubл. в бюлл. изобр. – №4, 2017.

II бўлим (II часть; II part)

7. Хашимов А.А., Пулатов А.А., Аъзамова Г.А. Вопросы энергосбережения в процессе расплавления металла в индукционных тигельных печах / Труды Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных на тему: «Радиотехника, электротехника и электроэнергетика». – Томск, Россия, 2011. – Том I. – С.231-234.

8. Khashimov A.A., Imomnazarov A.T., Pulatov A.O. Mathematical model of metal melting processes in crucible furnaces / International Symposium on Helting by Electrotermic Sourses. – Padua (Italy), 2004. – № 4 June 22-25. – P. 52-55.

9. Пулатов А.А., Мирсаидов М.М. Энергия тежамкор электротехнологик курилмалар фанини интерфаол усуллар асосида ўзлаштириш бўйича тавсиялар // «Фан ва технологиялар тараққиёти» илмий техникавий журнал. – Бухоро, 2016. – № 3. – Б.105-109.

10. Имамназаров А.Т., Пулатов А.А., Аъзамова Г.А. Математическая модель процесса плавки металла в ИТП на основе линейных графов / Сборник трудов. 6-Всероссийская научно-техническая конференция. Прикладные аспекты энергетики. – Россия, Благовещенск, 2011. – С.657-661.

11. Хашимов А.А., Имамназаров А.Т., Пулатов А.А. Экономия электрической энергии в индукционных нагревателях / Сб. трудов республиканской научно-практической конференции. – Ташкент, 2001. – С.144-145.

12. Пулатов А.А. Система автоматического управления тепловыми режимами работы индукционных тигельных печей / Сборник трудов 7-Всероссийской научно-технической конференции с международным участием на тему: Управление, качество и эффективность использования энергоресурсов. – Благовещенск, Россия, 2013. – С.702-705.

13. Хашимов А.А., Имамназаров А.Т. Пулатов А.А. Методика теплового расчёта индукционных канальных печей / Сб.трудов Международной научно-практической конференции на тему: «Проблемы формирования и внедрения инновационных технологии в условиях глобализации» - Ташкент: ТашГТУ, 2010. – С. 123-126.

14. Имамназаров А.Т., Пулатов А.А., Худайбердиев З.Х. Особенности теплового расчёта индукционных тигельных печей малой и средней мощности / Сб.трудов республиканской научно-практической конференции. – Ташкент, 2008. – № 2-3. – С.104-106.

15. Хашимов А.А., Мирисаев А.У., Пулатов А.А. Применение высокочастотных транзисторных преобразователей для индукционных печей малой мощности / Сб. трудов республиканской научно-практической конференции на тему: Актуальные проблемы инновационных технологии химической, нефтегазовой и пищевой промышленности. – Кунград, 2010, 28-29 октябр. – С. 296-298.

16. Хашимов А.А., Алимов Х.А., Пулатов А.А. Результаты анализа и исследований энергопотребления в ГАО «ТАПОиЧ» /Сб.трудов Республиканской научно-технической конференции. «Возобновляемые источники энергии. – Ташкент, 2013. – С.48-52.

17. Хамудханов М.М., Пулатов А.А. Электромеханические соотношения многодвигательного электропривода с электрической связью по роторной цепи с общим инвертором ведомой сетью / Сб.статьи. II Международной научно-технической конференции на тему: Современные проблемы электроэнергетики. – Алтай, Россия, 2014. – С.211-214.

18. Мирисаев А.У., Пулатов А.О., Обидов С.А. «Электротехника электромеханика ва электротехнологиялар» йўналиши фанларини ўқитишда мустақил таълимнинг мақсад ва вазибалари / Республика илмий-техник анжумани. – Тошкент: ТАҚИ, 2017. – II қисм. – Б. 114-119.

19. Пулатов А.А. Экспериментальное исследование однофазного преобразователя частоты процесса индукционного закалочного нагрева / Сборник статьи X Международной научно-практической конференции. – Пенза, Россия, 2017. – С.167-170.

Автореферат «ТошДТУ хабарлари» ва «Энергия ва ресурс тежаш муаммолари» журналлари таҳририятида таҳрирдан ўтказилиб, ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнлари ўзаро мувофиқлаштирилди (__.__.2018 йил).

Босишга рухсат этилди: __.__.2018 йил
Бичими 60x45^{1/16}, «Times New Roman»
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табағи 5. Адади: 100. Буюртма: № _____.

«Business Fayz Print» масъулияти чекланган жамияти.
100011, Тошкент шаҳри, Навоий кўчаси,30.