ВАЗОРАТИ МАОРИФ ВА ИЛМИ ҶУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН

ДОНИШГОҲИ ТЕХНИКИИ ТОҶИКИСТОН
БА НОМИ АКАДЕМИК М.С.ОСИМӢ

ВБД: 621.311; Бо ҳуқуқи дастнавис



ҲАБИБУЛЛОЗОДА ЗИКРУЛЛО ҲАБИБУЛЛО

ТАКМИЛИ УСУЛИ ПЕШГӮИИ ҲОДИСАҲОИ РЕЗОНАНСӢ ДАР ШАБАКАҲОИ ЭЛЕКТРИКИИ ДОРОИ БОРИ ҒАЙРИХАТТӢ

ДИССЕРТАТСИЯ

барои дарёфти дараҷаи илмии доктори фалсафа
(PhD) - доктор аз рӯйи ихтисоси 6D071800 – Энергетикаи электрикӣ
(6D071801 – Неругоҳҳои барқӣ ва системаҳои электроэнергетикӣ)

Роҳбари илмӣ:
номзади илмҳои техникӣ
Ҷӯразода Ш.Ҷ.

Душанбе – 2026

МУНДАРИҶА

ФЕҲРИСТИ ИХТИСОРАҲО 5
МУҚАДДИМА 7
БОБИ 1. ПАҲНШАВИИ ГАРМОНИКАҲОИ ОЛИИ ҶАРАЁН ВА ШИДДАТ ҲАНГОМИ РЕҶАҲОИ ҒАЙРИСИНУСОИДАЛӢ 17
1.1 Таъсири гармоникаҳои олии ҷараён ва шиддат ба реҷаҳои кории тачҳизот ва қабулкунакҳои электрикӣ 17
1.2 Манбаъҳои гармоникаҳои олӣ дар шабакаҳои электрикӣ ва таъсири онҳо ба реҷаҳои кори тачҳизоти электрикӣ 19
1.3 Резонанс дар шабакаҳои электрикӣ 23
1.4 Ҳолати мушкилоти сифати энергияи электрикӣ аз рӯи ғайрисинусоидалӣ будани шакли каҷхаттаи шиддатҳо дар шабакаҳои электрикии Ҷумҳурии Тоҷикистон 26
1.5 Гармоникаҳои олӣ дар шабакаҳои электрикӣ. Тавоноии таҳрифӣ 29
1.6 Баҳодиҳии паҳншавии ташкилкунандаҳои гармоникаҳои олии ҷараён дар СЭЭ шароити резонанс 33
1.7 Талабот ба реҷаҳои гармоникаҳои олӣ дар шабакаҳои шиддати баланд .. 37
1.8 Тавсифи шабакаҳои шиддати баланд ҳамчун объекти таҳқиқот 37
1.9 Таъсироти асосии манфии гармоникаҳои олӣ ба тачҳизоти электрикӣ ва баррасии усулҳои мавҷуда 44
1.10 Хулосаҳо оид ба боби аввал 51
БОБИ 2. КОРКАРДИ МОДЕЛИ МАТЕМАТИКИИ ШАБАКАҲОИ ЭЛЕКТРИКИИ ҶУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН БАРОИ ҲИСОБИ РЕҶАҲОИ ҒАЙРИСИНУСОИДАЛӢ 53
2.1 Усулҳои ҳисоби реҷаҳои ғайрисинусоидалӣ 53
2.2 Вобастагии зариби тартиби *n*-уми гармоникаи олии шиддат аз тавоноиҳои таҳрифӣ 74

2.3 Барномаҳои муосир барои таҳлили реҷаҳои ғайрисинусоидалӣ дар шабакаҳои электрикӣ 76
2.4 Таҳлили паҳншавии гармоникаҳои олӣ дар шабакаҳои электрикӣ ҳангоми реҷаҳои ғайрисинусоидалӣ (дар мисоли СЭ-и Ҷумҳурии Тоҷикистон) 80
2.5 Амсиласозии шабакаҳои электрикии дорои бори ғайрихаттӣ барои ҳисоби ҳодисаҳои резонансӣ (дар мисоли СЭ Ҷумҳурии Тоҷикистон) 82
2.6 Таҳлили натиҷаҳои моделсозӣ 87
2.7 Хулосаҳо оид ба боби дуюм 90
БОБИ 3. РУШДИ УСУЛҲОИ ПЕШГӮИИ ҲОДИСАҲОИ РЕЗОНАНСӢ ДАР ГИРЕҲҲОИ ШАБАКАҲОИ ЭЛЕКТРИКӢ 92
3.1 Таҳлили усулҳои мавҷудаи пешгӯии ҳодисаҳои резонансӣ дар шабакаҳои электрикӣ 92
3.2 Шакли матритсавии тавсифи муодилаи ҳолати шабакаҳои электрикӣ 95
3.3 Мукаммалсозии усули пешгӯии ҳодисаҳои резонансӣ дар гиреҳҳои шабакаҳои электрикии дорои бори ғайрихаттӣ 100
3.4 Алгоритми муайянкунии эҳтимолияти ба вуҷуд омадани ҳодисаҳои резонанс дар шабакаҳои электрикӣ 102
3.5 Намунаи ҳисобкунии реҷаҳои резонансии нақшаи электрикӣ дар асоси усули коркардшуда 105
3.6 Хулосаҳо оид ба боби сеюм 112
БОБИ 4. ҲОДИСАИ РЕЗОНАНСӢ ВА ПЕШГИРИИ ХАВФҲОИ ОН ҲАНГОМИ БЕҲИНСОЗИИ БИСЁРМЕЪЁРИИ ҶОЙГИРКУНИИ ДАСТГОҲҲОИ ҶУБРОНКУНАНДА БО ИСТИФОДА АЗ АЛГОРИТМҲОИ МЕТАЭВРИСТИКӢ 114
4.1 Баррасии усулҳои беҳинсозии интихоби ҷойи насби дастгоҳи ҷубронкунанда дар шабакаҳои электрикӣ 114
4.2 Усули беҳинсозӣ барои насби дастгоҳи ҷубронкунанда бо назардошти эҳтимолияти ба вуҷуд омадани резонанс 118

4.3 Алгоритми усули тӯдаи салпҳо 123
4.4 Намунаи ҳисоб дар асоси АТС 126
4.5 Хулосаҳо оид ба боби чорум 128
ХУЛОСА 130
РЎЙХАТИ АДАБИЁТИ ИСТИФОДАШУДА 133
ИНТИШОРОТ АЗ РЎЙИ МАВЗУИ ДИССЕРТАТСИЯ 147
ЗАМИМАҲО 150
ЗАМИМАИ 1. Натиҷаҳои ҳисоб дар амсилаи коркард кардашуда дар барномам Etap 150
ЗАМИМАИ 2. Натиҷаҳои ҳисоби ЗПБР дар барномаи таҳияшуда 162
ЗАМИМАИ 3. Барномаҳои таҳияшуда барои беҳинсозии интихоби ДҶ бо назардошти ҳодисаи резонанс 171
ЗАМИМАИ 4. Шаҳодатнома 174
ЗАМИМАИ 5. Санадҳои татбиқ 175

ФЕҲРИСТИ ИХТИСОРАҲО

АГ бо ҶҒ	Алгоритми генетикӣ бо ҷудокунии ғайридоминантӣ
АТЗ	Алгоритми тӯдаи зарраҳо
АТС	Алгоритми тӯдаи салпҳо
БКС	Батареяҳои конденсаторҳои статикӣ
БТКС	Батареяи танзимшавандаи конденсаторҳои статикӣ
БҶТТ	Бузургии ҷоизии тавоноии таҳрифӣ
ГО	Гармоникаҳои олӣ
ДҶ	Дастгоҳи ҷубронкунанда
ДҶФ	Дастгоҳҳои ҷубронкунии филтрӣ
ДФК	Дастгоҳҳои филтру компенсаторӣ
ЗБ	Зеристгоҳи барқӣ
ЗПБР	Зариби пешгӯишавандаи бавуҷудоии резонанс
КВД «ШАТ»	Корхонаи воҳиди давлатии «Ширкати алюминйи Тоҷик»
КСТ	Компенсаторҳои статикӣ-тиристорӣ
ҚЭ	Қабулкунакҳои электрикӣ
ҚЭҲ	Қувваи электроҳаракатдиҳанда
МБГ	Маркази барқию гармидиҳӣ
МБЭ	Манбаъҳои барқароршавандаи энергия
МГОҶ	Манбаъҳои гармоникаҳои олии ҷараён
ММД	Маҷмуи маҳсулоти дохилӣ
МТҒ	Манбаъҳои тавоноии ғайрифаъол
МЭМ	Мутобиқати электромагнитӣ
МЭҲ	Мошинаҳои электронии ҳисоббарор
НБК	Неругоҳи барқи конденсатсионӣ
НБО	Неругоҳи барқи обӣ
НБОф	Неругоҳи барқии офтобӣ
НСЭЭ	Нишондиҳандаҳои сифати энергияи электрикӣ
НЭТ	Низоми электротаъминкунӣ

РБ	Реҷаҳои барқароршуда
РБС	Реҷаи баъдисадамавӣ
РҒР	Реҷаҳои ғайрихаттии резонансӣ
РҒС	Реҷаҳои ғайрисинусоидалӣ
РКҒ	Реҷаҳои кории ғайрисинусоидалӣ
РР	Реҷаҳои резонансӣ
РШИ	Реакторҳои шунтии идорашаванда
СЭ	Системаҳои электроэнергетикӣ
СЭЭ	Сифати энергияи электрикӣ
ТАБ	Тавсифи амплитудавию басомадӣ
ТБФ	Табдили босуръати Фурйе
ТВА	Тавсифоти волт-амперӣ
ТГОҶ	Ташкилкунандаҳои гармоникаҳои олии ҷараён
ТГОШ	Ташкилдиҳандаҳои гармоникии олии шиддат
ТСТО	Таҳлили спектралии тартиби олӣ
ТТВ	Тавоноии таҳрифии воридотӣ
ТТВҶ	Тавоноии таҳрифии воридотии ҷоизӣ
ТЭ	Таҷҳизоти электрикӣ
УТЗ	Усули тӯдаи зарраҳо
УТС	Усули тӯдаи салпҳо
УГХ	Усули гургҳои хокистарӣ
ХИБ	Хати интиқоли барқ
ҲР	Ҳодисаҳои резонансӣ
ҲТТ	Ҳосилшавии тавоноии таҳрифӣ
ҶГО	Ҷараёнҳои гармоникии олӣ
ҶТ	Ҷумҳурии Тоҷикистон
ШБ	Шиддати баланд
ШЭ	Шабакаҳои электрикӣ
ЭЭ	Энергияи электрикӣ

МУҚАДДИМА

Мубрамии мавзуи таҳқиқот. Энергияи электрикӣ ҳамчун мол бояд ба талаботи сифат ҷавобгӯ бошад. Мувофиқи талаботи банди 4.2-и ҳуҷҷати меъёрии ГОСТ 32144-2013: «нишондиҳандаҳои сифати энергияи электрикӣ дар нуқтаҳои пайвастшавии умумии шабакаҳои электрикӣ бояд ба талаботи стандарти мазкур мутобиқат кунад» [1, с. 8]. Нишондиҳандаҳои асосии сифати энергияи электрикӣ (СЭЭ) мувофиқи ҳуҷҷати меъёрии ГОСТ-32144-2013 ба 11 намуд ва мувофиқи китоби Карташев И.И. ба се гурӯҳ ҷудо мешаванд: «Ба гурӯҳи якум, майлкунии басомад (Δf), майлкунии манфӣ ($\delta U_{(-)}$) ва мусбати ($\delta U_{(+)}$) шиддат; ба гурӯҳи дуюм, нишондиҳандаҳои тавсифдиҳандаи шакли каҷхаттаи шиддат (зариби гармоникаи тартиби n – уми шиддат ($K_{U(n)}$), зариби умумии ташкилдиҳандаҳои гармоникаи шиддат (K_U)), инчунин шиддати ғайрисимметрӣ дар шабакаҳои сефаза (зариби ғайрисимметрии шиддат аз рӯи пайдарпайии баръакс (K_{2U}) ва сифрӣ (K_{0U})) ва тағйирёбии тези шиддат (ларзиши кӯтоҳмуддат (P_{st}) ва дарозмуддати (P_{lt}) фликер) ва ба гурӯҳи сеюм бошад, нишондиҳандаҳои тавсифдиҳандаи ҳодисаҳои тасодуфии электромагнитӣ ва равандҳои электромагнитӣ дар шабакаҳои электрикӣ (давомнокии пастшавии шиддат ($\Delta t_{\text{п}}$), давомнокии қатъшавии шиддат ($\Delta t_{\text{к}}$) ва ғайраҳо) дохил мешаванд» [2, с. 5].

Яке аз хосиятҳои асосии энергияи электрикӣ (ЭЭ) шакли каҷхаттаи шиддат (нишондиҳандаҳои тавсифдиҳандаи шакли каҷхаттаи шиддат K_U ва $K_{U(n)}$ маҳсуб меёбанд) мебошад. Ин нишондиҳандаҳо ҳам аз манбаъҳои энергияи электрикӣ ва ҳам аз истеъмолкунандагони он вобастагӣ доранд. Шакли каҷхаттаи шиддат дар тахтасимҳои неругоҳҳои барқӣ нисбатан ба синусоиди идеалӣ наздик аст, вале ҳангоми интиқол ва тақсимоти ЭЭ дар гиреҳҳои шабакаҳои электрикӣ (ШЭ), ки дорои қабулкунакҳои электрикии (ҚЭ) тавсифоти волт-амперии (ТВА) ғайрихаттӣ мебошанд, шакли каҷхаттаи шиддат таҳриф меёбад. Зеро ин гуна қабулкунакҳо манбаи ташкилкунандаҳои гармоникаҳои олии ҷараён (ТГОҶ) маҳсуб мешаванд. Бинобар ин, вуҷуд доштани сифати ЭЭ дар тахтасимҳои неругоҳҳои барқӣ сифати онро дар бандакҳои қабулкунакҳои электрикӣ кафолат намедиҳад.

Дар солҳои охир дар сохтори истеъмолкунандагони ЭЭ афзоиши назарраси шумора ва тавоноии қабулкунакҳои барқии дорои тавсифоти волт-амперии ғайрихаттӣ (дар идома – «бори ғайрихаттӣ») мушоҳида мешавад. Дар шабакаҳои электрикӣ техникаҳои табдилдиҳандаи қуввагӣ, системаҳои идоракунии рақамӣ ва технологияҳои каммасрафи энергия пайваст карда мешаванд. Мувофиқи таҳқиқоти Карташев И.И.: «истифодаи оммавии ҳаракатоварҳои барқии танзимшаванда, дастгоҳҳои пуриқтидори росткунанда, манбаъҳои бефосилаи барқ, аз он ҷумла, манбаъҳои энергияи барқароршаванда боиси афзоиши назарраси ҳиссаи элементҳои ғайрихаттӣ дар шабакаҳои электрикӣ мегардад» [2]. Ин раванд дар ниҳоят, ба пайдоиши ҷараёнҳои гармоникаҳои тартиби олӣ дар шабакаҳо ва таҳрифи шакли каҷхаттаи шиддат оварда мерасонад.

Яке аз оқибатҳои хавфноктарини таҳрифи шакли каҷхаттаи шиддат ва ҷараён пайдоиши ҳодисаҳои резонансӣ (ҲР) дар басомадҳои гармоникаҳои олӣ (ГО) мебошад. Ба вуҷуд омадани резонанс (ҳам параллелӣ ва ҳам пайдарпай) боиси якбора зиёд шудани қиматҳои амалкунандаи шиддату ҷараён ва афзоиши зарибҳои тавсифдиҳандаи шакли каҷхаттаи шиддат дар муқоиса бо нишондиҳандаҳои меъёрӣ мегардад. Ин раванд ба фарсудашавии босуръати изолятсия, аз кор баромадани таҷҳизоти электрикӣ (ТЭ), зиёд шудани талафоти ЭЭ ва дигар оқибатҳои манфӣ оварда мерасонад.

Яке аз мушкилоти асосӣ ҳангоми реҷаҳои кории ғайрисинусоидалӣ (РКҒ) дар системаҳои электроэнергетикӣ (СЭ) паҳншавии гармоникаҳои олии ҷараён мебошад, ки аз ҷониби манбаъҳои ҷараён ба вуҷуд меоянд. Ин раванд асосан аз нақшаи конфигуратсияи СЭ, параметрҳои он ва хусусиятҳои конструктивии элементҳо вобастагӣ дорад. Ин мушкилот асосан барои коркарди усулҳои паст кардани сатҳи ГО бо истифода аз усулҳои ҳисобию ченкунӣ, моделҳои математикӣ ва таҳлили таъсири манфии онҳо мавриди таҳқиқот қарор мегирад. Дар аксари ҳолатҳо, новобаста аз мавҷудияти манбаъҳои гармоникаҳои олии ҷараён дар шабакаҳои электрикӣ, қиматҳои зарибҳои K_U ва $K_{U(n)}$ аз меъёрҳои муқарраршуда зиёд намешаванд, аммо ҳангоми кори шабака дар реҷаҳои

резонансӣ ва ё наздик ба он, ин зарибҳо аз ҳадди ҷоизии меъёрӣ боло мераванд. Бинобар ин, зарур аст, ки ҳудуди қиматҳои ташкилдиҳандаҳои гармоникаҳои олии ҷараён ва муқовиматҳои гиреҳии нақшаи таҳқиқшаванда муайян карда шаванд, то ки бузургии зарибҳои K_U ва $K_{U(n)}$ аз меъёрҳои муқарраршуда зиёд нагарданд. Қобили зикр аст, ки усулҳои мавҷудаи баҳодиҳии реҷаҳои резонансӣ (РР) бештар бар моделҳои сода такя намуда, хусусияти динамикии параметрҳои шабакаро пурра ба назар намегиранд. Бинобар ин, такмили усулҳои пешгӯии ҳодисаҳои резонансӣ бо мақсади аниқ муайян кардани хатари реҷаҳои садамавӣ дар марҳилаҳои лоиҳакашӣ ва истифодабарии шабакаҳои электрикӣ масъалаи муҳимми илмию техникӣ ба шумор меравад.

Дараҷаи таҳқиқи мавзуи илмӣ. Таҳқиқот дар самти беҳтар кардани сифати энергияи электрикӣ, махсусан омузиши реҷаҳои ғайрисинусоидалӣ ва ҳодисаҳои резонансӣ дар шабакаҳои электрикӣ, дар конференсияҳои байналмилалӣ, ба монанди CIRED (конференсияи байналмилалӣ оид ба низомҳои тақсимоти энергияи электрикӣ) ва созмонҳои илмии байналмилалӣ: CIGRE (шурои байналмилалӣ оид ба системаҳои бузурги электрикӣ), IEEE (институти муҳандисони электротехника ва радиоэлектроника, зеркумитаи сифати энергияи электрикӣ) пайваста пешниҳод ва баррасӣ мегарданд. Дар рушди усулҳои таҳқиқот, назария ва равишҳои амалии ҳалли ин масъалаҳо олимони хориҷӣ, аз ҷумла Аррилага Ҷ. [3], Эммануил А.Е. [4], Вилкош К. [5], Фукс Э. [6], В. Сюй [7] ва дигарон саҳми арзанда гузоштаанд. Аз олимони русзабон ба ҳалли ин мушкилот Жежеленко И.В. [8], Железко Ю.С. [9], Карташев И.И. [2], Смирнов С.С. [10], Коверникова Л.И. [11], Курбатский В.Г. [12], Тулский В.Н. [13], Осипов Д.С. [14] ва дигарон машғул шудаанд. Дар Тоҷикистон ин масъаларо Назиров Х.Б. [15] ва Ҷӯразода Ш.Ҷ. [16] мавриди омузиш қарор додаанд. Вале дар корҳои зикршуда ба мушкилоти меъёрбандии қимати муқовиматҳои гиреҳӣ дар нақшаҳои дилхоҳи шабакаи электрикӣ ҳангоми реҷаҳои гуногуни кории он диққати зарурӣ дода нашудааст.

Робитаи таҳқиқот бо барномаҳо (лоиҳаҳо) ва мавзуи илмӣ. Корҳои илмии дар доираи кори диссертатсионӣ иҷрошуда ба талаботи меъёрии як қатор

барномаҳо ва стратегияҳои давлатӣ мувофиқ меояд, аз ҷумла: Стратегияи рушди миллии Ҷумҳурии Тоҷикистон дар давраи то соли 2030 (фармони № 392 аз 01.10.2016 с.), Қонуни Ҷумҳурии Тоҷикистон дар бораи энергетика (фармони № 1909 аз 19.07.2022 с.), Қарори Ҳукумати Ҷумҳурии Тоҷикистон 30 июли соли 2020, № 427 Оид ба Нақшаи чорабиниҳо барои солҳои 2020 – 2025 оид ба татбиқи эълони солҳои 2020 – 2040 ҳамчун «Бистсолаи омузиш ва рушди илмҳои табиӣ, дақиқ ва риёзӣ дар соҳаи илм ва маориф».

ТАВСИФИ УМУМИИ ТАҲҚИҚОТ

Мақсади таҳқиқот. Такмили усули пешгӯии ҳодисаҳои резонансӣ дар шабакаҳои электрикии дорои бори ғайрихаттӣ.

Вазифаҳои таҳқиқот. Барои расидан ба мақсади гузошташуда ҳалли вазифаҳои зерин зарур аст:

1. Гузаронидани таҳлили ҳамаҷонибаи усулҳои мавҷудаи баҳодиҳии РҒР (реҷаҳои ғайрихаттии резонансӣ) ва муайян кардани сабабҳои асосии камбудиҳо ҳангоми пешгӯии резонанс дар басомадҳои баланд.

2. Коркарди модели математикии шабакаи электрикӣ дорои бори ғайрихаттӣ (дар мисоли шабакаҳои электрикии Ҷумҳурии Тоҷикистон) ба назар гирифтани тағйирёбии конфигуратсияи он барои баҳодиҳии пурраи шароити бавуҷудоии ҳодисаҳои резонансӣ. Санҷиши (верификатсияи) модели коркардшуда. Дар асоси модели коркардшуда таҳлил намудани паҳншавии гармоникаҳои олӣ дар шабакаҳои электрикӣ ҳангоми реҷаҳои ғайрихаттии резонансӣ (РҒР). Баҳо додан ба паҳншавии ташкилдиҳандаҳои гармоникаҳои олии ҷараён дар шабакаҳои электрикии Ҷумҳурии Тоҷикистон.

3. Коркарди алгоритми пешгӯии ҳодисаҳои резонансӣ дар гиреҳҳои шабакаҳои электрикӣ ҳангоми РҒР ва муайян кардани қиматҳои ҷоизии муқовиматҳои гиреҳӣ бо назардошти қиматҳои меъёрии ташкилдиҳандаҳои гармоникии олии шиддат (ТГОШ) ва ҷараён (ТГОҶ).

4. Такмили усули пешгӯии ҳодисаҳои резонансӣ (ҲР) дар гиреҳҳои шабакаҳои электрикӣ ҳангоми реҷаҳои резонансӣ ва коркарди таъминоти барномавӣ барои пешгӯӣ ва муайян кардани ҲР дар ШЭ.

5. Сохтани алгоритми ҷустуҷӯи автоматикунонидашудаи қиматҳои аз меъёр зиёди зарибҳои K_U ва $K_{U(n)}$ аз сабаби ҳодисаҳои резонансӣ дар шабакаҳои электрикӣ бо истифода аз усулҳои беҳинсозии метаэвристикӣ барои муайян кардани реҷаҳои хавфноктарин ва баҳодиҳии натиҷаҳои истифодаи алгоритмҳои коркардшуда дар шабакаҳои электрикӣ ҶТ, барои аниқ намудан ва пешгӯии ҳодисаҳои резонансӣ.

Объекти таҳқиқот. Шабакаҳои электрикие, ки дорои ҳиссаи назарраси бори ғайрихаттӣ мебошанд.

Предмети таҳқиқот. Равандҳои бавуҷудоӣ ва паҳншавии гармоникаҳои олӣ, инчунин шароити ба миён омадани резонансҳои басомадӣ дар шабакаҳои электрикӣ ҳангоми реҷаҳои гуногуни кори бори ғайрихаттӣ ва конфигуратсияи шабака.

Асосҳои назариявии таҳқиқот. Базаи назариявӣ ва методологии кори диссертатсиониро қоидаҳои бунёдии электротехникаи назариявӣ, назарияи занҷирҳои электрикӣ ва назарияи реҷаҳои ғайрисинусоидалӣ бо истифода аз таҳлили гармоникӣ (усули ҷудокунӣ ба қатори Фурйе) ташкил медиҳанд. Дар тавсифи математикии реҷаҳои кори шабакаҳои мураккаби электрикӣ усулҳои назарияи графҳо барои тартибдиҳии матритсаҳои пайвастшавии гиреҳҳову шохаҳо, инчунин матритсаҳои ноқилиятҳо ва муқовиматҳои гиреҳӣ истифода шудаанд. Барои ҳалли вазифаи беҳинсозии бисёрмеъёрии ҷойҳои ҷойгиркунонии дастгоҳҳои ҷубронкунанда усулҳои муосири зеҳни сунъӣ, аз ҷумла алгоритмҳои метаэвристикӣ (яъне усули тӯдаи салпҳо) истифода шудаанд.

Навгонии илмӣ. Дар рафти иҷрои кори илмӣ-таҳқиқотӣ бори аввал натиҷаҳои зерин ба даст оварда шудаанд:

1. Усули пешгӯии ҳодисаҳои резонансӣ дар СЭ коркард карда шудааст, ки ба таҳлили тавсифи амплитудавии басомадии (ТАБ) гиреҳҳо асос ёфтааст. Ба фарқ аз усулҳои мавҷудабуда, ин усул зариби пешгӯишавандаи бавуҷудоии резонансро (ЗПБР) истифода мебарад, ки аз тарафи муаллиф ва тавассути нисбати муқовимати хусусии гиреҳ дар гармоникаи олӣ ба муқовимати хусусии

гиреҳ дар басомади асосии гиреҳ ифода меёбад. Ин имкон медиҳад, ки баҳодиҳии ҳассосияти гиреҳ ба таҳрифи гармоникӣ ба назар гирифта шавад.

2. Шартҳои ҳаддии мавҷудияти резонанси хавфнок асоснок карда шудаанд, ки зариби ҳисобии ЗПБР – ро бо нишондиҳандаҳои меъёрии сифати энергияи электрикӣ – $K_{U(n)}$, $K_{I(n)}$ пайваст мекунанд. Меъёри математикии пешниҳодшудаи $K_{\text{рез}} \geq K_{\text{рез.ҷоизӣ}}$ имкон медиҳад, ки аз таҳлили сифатии басомадӣ ба баҳодиҳии миқдории мувофиқати реҷа ба талаботи мутобиқати электромагнитӣ (МЭМ) гузарем.

3. Вобастагии аналитикии қимати меъёрии ЗПБР аз синфи шиддати шабака ва тавони табиии ($P_{\text{таб}}$) хати интиқоли барқ (ХИБ) муқаррар карда шудааст. Ин мутобиқшавии усулро ба конфигуратсияҳои гуногуни СЭ таъмин намуда, маҳдудиятҳои физикии тавонои интиқолии шабакаро ҳангоми пешгӯии хатарҳои резонансӣ ба инобат мегирад.

4. Алгоритми ҷустуҷӯи автоматикунонидашудаи қиматҳои аз меъёр зиёди зарибҳои K_U ва $K_{U(n)}$ аз сабаби ҲР дар ШЭ бо истифода аз усулҳои беҳинсозии метаэвристикӣ (усулҳои гургҳои хокистарӣ, тӯдаи зарраҳо ва тӯдаи салпҳо) барои муайян кардани реҷаҳои хавфноктарин дар шабакаҳои электрикӣ сохта шудааст.

Нуктаҳои ба ҳимоя пешниҳодшаванда:

1. Усул, алгоритм ва барномаи компютерии пешгӯии ҳодисаҳои резонансӣ дар шабакаҳои электрикии дорои бори ғайрихаттӣ таҳия ва асоснок карда шудаанд. Ин усул ба таҳлили ТАБ ва ҳисоби ЗПБР асос ёфта, имкон медиҳад, ки гиреҳҳои ҳассоси шабака бо дақиқии баланд муайян гарданд ва хавфҳои бавуҷудоии резонанс дуруст баҳо дода шаванд.

2. Қиматҳои ҷоизӣ ва ҳисобии ЗПБР дар реҷаҳои муътадил ва баъдисадамавӣ барои гиреҳҳои шабакаҳои электрикии дорои бори ғайрихаттӣ (дар мисоли шабакаҳои электрикии Ҷумҳурии Тоҷикистон) муайян карда шудаанд, ки онҳо имкони ошкор намудани минтақаҳои хавфноки резонансиро ҳангоми тағйирёбии сохтор ва реҷаҳои кори шабака фароҳам меоранд.

3. Усул ва алгоритми беҳинсозии бисёрмеъёрии интихоби ҷои насб ва тавоноии батареяҳои конденсаторҳои статикӣ (дастгоҳҳои ҷубронкунанда) дар асоси алгоритми метаэвристикии тӯдаи салпҳо таҳия ва такмил дода шудааст, ки дар он шартҳои пайдоиши резонанси басомадӣ ҳамчун функсияи ҷаримавӣ мувофиқи меъёри ЗПБР ба раванди ҷустуҷӯи итератсионӣ ворид карда шуда, кафолати канорачӯӣ аз минтақаҳои резонансӣ ва паст кардани талафоти тавоноии фаъолро таъмин мекунанд.

Аҳамияти назариявӣ ва амалии таҳқиқот:

Аҳамияти назариявии таҳқиқот аз рушди усули пешгӯии ҳодисаҳои резонансӣ дар шабакаҳои электрикии дорои бори ғайрихаттӣ иборат буда, бо пешниҳоди ЗПБР ва шарти математикии он, муайян намудани вобастагии таҳлилӣ аз синфи шиддат ва тавоноии табиии ХИБ ва такмили усули беҳинсозии метаэвристикии ҷои насб ва тавоноии ДҶ бо назардошти эҳтимолияти бавуҷудоии ҲР дар доираи талаботи меъёрии электромагнитӣ асоснок карда мешавад.

Аҳамияти амалии таҳқиқот бо татбиқи зерин тасдиқ карда мешавад.

1. Усул, алгоритм ва барномаи компютерии коркардшударо пажӯҳишгоҳҳои лоиҳакашӣ ва ташкилотҳои электротаъминкунӣ метавонанд барои ошкор намудани гиреҳҳои ҳассос ва осебпазири ШЭ ҳангоми тағйир ёфтани сохтори шабака ва насби манбаъҳои нави гармоникаҳои олӣ (борҳои ғайрихаттӣ) истифода шаванд.

2. Усули таҳияшудаи беҳинсозии бисёрмеъёрии ҷои насб ва тавоноии батареяҳои конденсаторҳои статикӣ ба хадамоти диспетчерӣ ва пажӯҳишгоҳҳои лоиҳакашӣ имкон медиҳад, ки нуқтаҳои пайвасткунии дастгоҳҳои ҷубронкунандаро барои кафолати канорачӯӣ аз минтақаҳои резонансӣ, меъёрбандии сатҳи шиддат ва паст кардани талафоти тавоноии фаъол дар шабакаҳои электрикӣ боасос интихоб намоянд.

3. Натиҷаҳои кори диссертатсионӣ ҳангоми омода намудани донишҷӯён аз рӯйи ихтисосҳои «Неругоҳҳои электрикӣ» ва «Электротаъминкунӣ» ҳангоми омузиши фанҳои «Масъалаҳои математикӣ дар

электроэнергетика» ва «Мутобиқати электромагнитӣ» дар Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, Донишкадаи энергетикии Тоҷикистон, Филиали Донишкадаи миллии тадқиқотии «Донишкадаи энергетикии Москва» дар шаҳри Душанбе истифода бурда мешаванд.

Дараҷаи эътимоднокии натиҷаҳои диссертатсия: Асоси муқаррароти илмӣ, хулосаҳо ва тавсияҳои дар кори илмӣ овардашударо татбиқи саҳеҳи қонунҳои бунёдии назарияи электротехника, усулҳои ҳисоби ададӣ ва воситаҳои математикии алгебраи матритсавӣ ташкил медиҳанд.

Эътимоднокии натиҷаҳо бо сатҳи баланди мувофиқати натиҷаҳои ҳисобҳои аналитикӣ бо маълумоти модели математикӣ, ки дар барномаи муосири санҷидашудаи (верификатсияшудаи) ETAP 19.0.1 ба даст омадааст, тасдиқ мегардад (саҳвияти нисбии ҳисоби муқовиматҳои гиреҳӣ барои шабакаҳои 500 кВ аз 4,54 % зиёд нашуд). Ҳамзамон, мувофиқати моделҳои коркардшуда бо истифодаи параметрҳои воқеии элементҳои шабакаи электрикӣ ва маълумот дар бораи таркиби гармоникии ҷараёнҳои корхонаи амалкунандаи саноатӣ (КВД «ШАТ») асос меёбад. Ҳамгироии бомуваффақияти натиҷаҳои беҳинсозии метаэвристикӣ (дар итератсияи 25-уми АТС) қобилияти корӣ ва устувории алгоритмҳои пешниҳодшударо исбот менамояд.

Мутобиқати диссертатсия ба шиносномаи ихтисоси илмӣ.

Диссертатсия мутобиқи бахшҳои зерини Шиносномаи номгӯи ихтисосҳои кормандони илмӣ иҷро шудааст: аз рӯи ихтисоси 6D071801 – Неругоҳҳои барқӣ ва системаҳои электроэнергетикӣ алоқаманд мебошанд, аз ҷумла:

• банди 2 «Таҳиясозии асосҳои илмӣ (равишҳо) ҷиҳати…» – ба коркарди усули пешгӯии эҳтимолияти бавуҷудоии ҳодисаҳои резонансӣ дар шабакаҳои электрикии дорои бори ғайрихаттӣ тааллуқ дорад;

• банди 3 «Таҳиясозии усулҳои ҳисоб, пешбиниҳо, оптимизатсия…» – дар рисолаи мазкур усули пешгӯии эҳтимолияти пайдоиши ҳодисаҳои резонансӣ дар шабакаҳои электрикӣ бо назардошти конфигуратсияи шабака ва талаботи ҳуҷҷатҳои меъёрии сифати энергияи электрикӣ коркард ва пешниҳод гардидааст;

• банди 6 «Таҳиясозии усулҳои моделсозии математикӣ….» – дар кор амсилаи имтатсионӣ барои ҳисоби реҷаҳои кори ғайрисинусоидалии қисми ҷанубии системаи электроэнергетикии Ҷумҳурии Тоҷикистон барои муайян намудани тавсифи басомадии гирехҳои система таҳия гардидааст;

• банди 12 «Таҳиясозии усулҳои назорат ва таҳлили сифати…» – дар диссертатсия алгоритм барои беҳтарин ҷои насб ва тавоноии дастгоҳҳои ҷубронкунии филтрӣ барои муътадилсозии сатҳи шиддат дар бандакҳои қабулкунакҳои электрикӣ ва паст намудани талафи тавоноӣ бо назардошти эҳтимолияти ба вуҷуд омадани резонанс коркард шудааст.

Саҳми шахсии довталаби дараҷаи илмӣ дар омодасозии диссертатсия дар муайян намудани ҳадаф ва вазифаҳои таҳқиқот; интихоби заминаи методологӣ ва иттилоотӣ; анҷом додани таҳқиқот, таҳияи усулҳо ва алгоритмҳо; инчунин коркарди барномаи компютерӣ ифода меёбад.

Тасвиб ва амалисозии натиҷаҳои таҳқиқот: Муқаррароти асосии диссертатсия, қисмҳои ҷудогонаи он, инчунин натиҷаҳои таҳқиқот дар конференсияҳои зерин гузориш ва муҳокима карда шудаанд: конференсияи байналмилалии илмӣ-амалӣ дар мавзуи: «Энергетика — соҳаи калидии рушди иқтисоди миллӣ» Донишкадаи энергетикаи Тоҷикистон — Кӯшониён, 25 декабри соли 2023; конференсияи байналмилалии илмӣ-амалӣ дар мавзуи: «Энергетика — соҳаи калидии рушди иқтисоди миллӣ» Донишкадаи энергетикаи Тоҷикистон — Кӯшониён, 20 апрели соли 2024; конференсияи байналмилалии илмӣ-амалӣ дар мавзуи: «Саноати рақамӣ ва рушди энергетика аз нигоҳи олимон ва таҳқиқотчиён», бахшида ба Иди илми тоҷик ва «Бистсолаи омузиш ва рушди фанҳои табиатшиносӣ, дақиқ ва математика» дар соҳаи илму маориф (2020–2040) Кӯшониён, 25 апрели соли 2025; конференсияи байналмилалии илмии таҳқиқотчиёни ҷавон дар соҳаи электротехника, автоматизатсия ва системаҳои идоракунӣ ElCon 2026 (IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, IEEE Russia North West Section) — Санкт-Петербург, 3–5 феврали соли 2026 (видеоконференсия);

семинарҳои илмии кафедраи «Неругоҳҳои электрикӣ»-и Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ.

Интишорот аз рӯйи мавзуи диссертатсия. Муҳтавои кори диссертатсионӣ дар мақолаҳо ва баромадҳои муаллиф баён гардидааст. Доир ба мавзуи диссертатсия 12 кори чопӣ, аз ҷумла 5 мақолаи илмӣ дар нашрияҳои ба феҳристи тавсияшудаи КОА ҶТ ва Федератсияи Россия (ФР) дохилшаванда, 1 мақола дар маводҳои конференсия, ки ба пойгоҳи маълумотии IEEE ва Scopus шомил аст, 5 мавод дар конференсияҳои байналмилалӣ ва 1 шаҳодатнома дар бораи бақайдгирии давлатии барнома барои МЭҲ ва пойгоҳи маълумот ба нашр расидаанд.

Сохтор ва ҳаҷми диссертатсия. Диссертатсия аз муқаддима, чор боб, хулоса, феҳристи адабиёт ва замимаҳо иборат мебошад. Ҳаҷми умумии кор 180 саҳифаи матни чопшударо ташкил медиҳад (аз ҷумла 132 саҳифа матни асосии диссертатсия). Матни таҳқиқот бо 19 расм аёнӣ карда шуда, дорои 13 ҷадвал мебошад. Феҳристи библиографӣ 117 номгӯи сарчашмаҳоро худ дар бар мегирад. Ба кори диссертатсионӣ 5 замима илова карда шудааст.

БОБИ 1. ПАҲНШАВИИ ГАРМОНИКАҲОИ ОЛИИ ҶАРАЁН ВА ШИДДАТ ҲАНГОМИ РЕҶАҲОИ ҒАЙРИСИНУСОИДАЛӢ

1.1 Таъсири гармоникаҳои олии ҷараён ва шиддат ба реҷаҳои кории таҷҳизот ва қабулкунакҳои электрикӣ

Таъмини сифати энергияи электрикӣ (СЭЭ) яке аз масъалаҳои калидӣ дар системаҳои электроэнергетикии муосир ба шумор меравад. Вақтҳои охир дар таркиби истеъмолкунандагони энергияи электрикии системаҳои электроэнергетикӣ (СЭ) афзоиши босуръати шумора ва тавоноии борҳои ғайрихаттӣ мушоҳида мешавад. Чӣ хеле ки Каратшев И.И. қайд мекунад: «зиёдшавии ҳиссаи борҳои ғайрихаттӣ дар ҳамаи бахшҳои СЭ, шуруъ аз истеъмолкунандагони коммуналӣ-маишӣ (таҷҳизоти маишӣ ва дорои манбаъҳои таъминоти импулсӣ), асбобҳои равшанидиҳанда (люминисентӣ, газӣ-тахлиявӣ, симобӣ) то корхонаҳои саноатӣ (печҳои электрикӣ-камонӣ, печҳои индуксионӣ, росткунакҳо, инверторҳо, табдилдиҳандаҳои басомадӣ) ба таври назаррас ба чашм мерасад» [2].

Истифодаи васеи борҳои ғайрихаттӣ ба пайдоиши реҷаҳои ғайрисинусоидалии кори ШЭ оварда мерасонад, яъне дар чунин реҷаҳо шароитҳои идеалӣ – шакли синусоидалии каҷхатҳои ҷараён ва шиддат тақрибан дида намешавад. Хусусияти чунин истеъмолкунандагон дар он аст, ки онҳо ташкилкунандаҳои гармоникаҳои олии ҷараёнро ҳосил мекунанд. Мувофиқи назарияи реҷаҳои ғайрисинусоидалӣ (қатори гармоникии Фуре) дилхоҳ функсияи даврии ғайрисинусоидалии $f(t)$ – ро метавон дар шакли зерин ифода намуд:

$$f(t) = F_0 + \sum_{k=1}^{\infty} F_{km} \cdot \sin(k \cdot \omega \cdot t + \psi_k). \qquad (1.1)$$

ки дар ин ҷо, F_0 – ташкилдиҳандаи доимӣ, F_{km} – амплитудаи гармоникаи n – ум, ω – басомади кунҷии гармоникаи асосӣ (якум), ψ_k – фазаи ибтидоии гармоникаи n-ум, k – рақами тартибии гармоника.

Мувофиқи қатори гармоникии Фуре, формулаи қимати лаҳзавии ҷараёнро дар реҷаҳои ғайрисинусоидалии кори шабакаи электрикӣ метавон дар шакли зерин навишт:

$$i(t) = I_0 + I_{1m} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_{I1}) + I_{2m} \cdot \sin(2 \cdot \omega \cdot t + \psi_{I2}) + \ldots + I_{km} \cdot \sin(k \cdot \omega \cdot t + \psi_{Ik}) =$$

$$= I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} I_{km} \cdot \sin(k \cdot \omega \cdot t + \psi_{Ik}) \qquad (1.2)$$

Чуноне ки қайд шуд, борҳои ғайрихаттӣ манбаъҳои ТГОҶ мебошанд. Сарфи назар аз он ки шакли каҷхаттаи шиддати шабака ба синусоида хеле наздик аст, паҳншавии ТГОҶ дар шабака, ҳангоми гузаштан аз муқовимати элементҳои шабака дар басомадҳои баланд афтиши шиддатро ба вуҷуд меорад. Афтиши шиддат дар басомадҳое, ки аз гармоникаи асосӣ фарқ мекунанд, бо шиддати шабака ҷамъ шуда, дар натиҷа ба таҳрифи шакли каҷхаттаи шиддат оварда мерасонад. Раванди мазкурро ба тарзи математикӣ чунин ифода кардан мумкин аст:

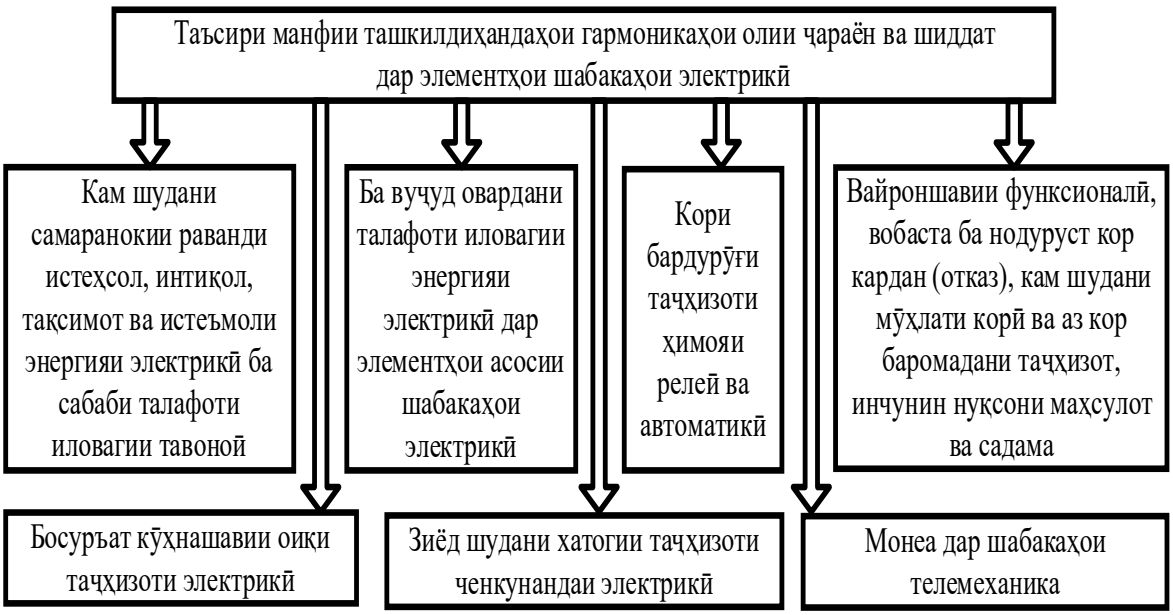
$$\Delta U_{\text{бор}}(t) = U_{\text{шабака}}(t) - I(t) \cdot Z_{\text{шабака}} \qquad (1.3)$$

дар ин ҷо, $\Delta U_{\text{бор}}(t)$ – синусоидаи таҳрифшудаи шиддат дар бандакҳои бор; $U_{\text{шабака}}(t)$ – шиддати синусоидалии шабака; $I(t)$ – ҷараёни таҳрифшудаи бор; $Z_{\text{шабака}}$ – муқовимати пурраи шабака.

Мавҷудияти ТГОҶ ва ташкилкунандаҳои гармоникаҳои олии шиддат (ТГОШ) дар СЭЭ ба реҷаҳои кори таҷҳизоти электрикӣ таъсири манфӣ мерасонад. Мушкилот дар он аст, ки таҷҳизоти электрикӣ барои кор дар басомади асосӣ (50 Ҳс) ҳисоб карда шудааст, вале ТГОҶ ва ТГОШ басомадҳои баландтаре доранд, ки ба басомади асосӣ каратианд (масалан, 150, 250, 350 Ҳс ва ғайра). Ҷараёнҳои мазкур ба талафоти иловагии тавоноии фаъол дар элементҳои шабака оварда мерасонанд, ки ин ба баланд шудани ҳарорат дар элементҳои шабака мусоидат намуда, дар ниҳоят. боиси кам шудани муҳлати истифодабарии

элементҳои шабака мегардад [2]. Оқибатҳои асосии манфии ТГОҶ ва ТГОШ дар расми 1.1 оварда шудаанд.

Ҳамон тавре ки Жежеленко И.В. қайд намудааст, ТГОҶ ва ТГОШ ба оқибатҳои манфии зерин оварда мерасонанд: «дар мошинҳои электрикӣ, трансформаторҳо ва шабакаҳо талафоти иловагӣ ба вуҷуд меоянд; ҷубронкунии тавоноии ғайрифаъол тавассути батареяҳои конденсаторӣ душвор мегардад; муҳлати хизмати изолятсияи мошинҳо ва таҷҳизоти электрикӣ коҳиш меёбад; кори дастгоҳҳои автоматика, телемеханика ва алоқа бад мегардад» [8, с. 14]. Омилҳои асосии манфии таъсири ташкилкунандаҳои гармоникаҳои олии ҷараён ва шиддат ба элементҳои шабакаи электрикӣ дар расми 1.1 дар шакли блок-нақша оварда шудаанд.



Расми 1.1. – Омилҳои манфии таъсири ташкилкунандаҳои гармоникаҳои олии ҷараён ва шиддат ба элементҳои шабакаи электрикӣ

1.2 Манбаҳои гармоникаҳои олӣ дар шабакаҳои электрикӣ ва таъсири онҳо ба реҷаҳои кори таҷҳизоти электрикӣ

Дар солҳои охир дар таркиби шабакаҳои электрикии аксар кишварҳои ҷаҳон шумораи зиёди истеъмолкунандагони дорои ТВА – и ғайрихаттӣ фаъолият мекунанд, ки онҳо шакли каҷхаттаи ҷараёни истеъмолшаванда ва шиддатро

таҳриф медиҳанд. Дар неругоҳҳои электрикӣ шиддати энергияи электрикии истеҳсолшаванда тақрибан шакли каҷхаттаи синусоидалиро доро мебошад. Аз ин рӯ, «шакли каҷхаттаи шиддат ҳангоми интиқол ва тақсими энергияи электрикӣ тавассути шабакаҳои электрикӣ дараҷаҳои гуногуни шиддат таҳриф меёбад» [3, 8]. Тибқи ақидаи Жежеленко И.В. маъмултарин манбаъҳои таҳрифи гармоникӣ дар системаҳои электрикӣ инҳо мебошанд: «дастгоҳҳои росткунанда; нақлиёти барқӣ; техникаи электронӣ; асбобҳои равшанидиҳанда; таҷҳизоти барқӣ бо ТВА – и ғайрихаттӣ ва ғайра» [8, саҳ. 34].

Дастгоҳи росткунанда. Дар айни замон, калонтарин манбаъҳои таҳрифи шакли каҷхатҳои ҷараён ва шиддат дар СЭ, борҳое мебошанд, ки тавассути дастгоҳҳои росткунанда пайваст карда шудаанд. Оркина Б.Г. таъкид намудааст, ки «дар аввал дастгоҳи росткунанда танҳо фоизи ками бори умумии системаи энергетикиро ташкил медоданд, аммо шуруъ аз солҳои асри гузашта миқдор ва шумораи ин гуна истеъмолкунандагон афзуда истодаанд» [17]. Ҳоло вазъият пурра тағйир ёфтааст ва дар маҷмуъ, ҳиссаи назаррасро аз тавоноии муқарраршудаи СЭ ташкил медиҳанд.

Олимон Фишлер Я.Л. ва Курбатский В.Г. баён менамоянд: «дар корхонаҳои металлургӣ барои табдилдиҳандаҳои пуриқтидор нақшаи пулии сефазаи росткунӣ (нақшаи Ларионов) васеъ истифода мешавад, ки ин имкон медиҳад нақшаи росткунии шашпулсӣ амалӣ карда шавад. Пайвасткунии пайдарпай ё параллелӣ ду ва ё якчанд чунин пулҳои росткунанда нақшаҳои 12, 18, 24, ... – фазагиро таъмин менамояд, ки онҳо вобаста ба шумораи фазаҳои нақшаи табдилдиҳанда, ҷараёнҳои гармоникаҳои олии тартибҳои гуногунро ҳосил мекунанд» [12, 18].

Нақлиёти барқӣ ва зеристгоҳҳои кашишии ҷараёни тағйирёбанда (27 кВ ва зиёдтар) яке аз манбаъҳои асосии таҳрифи шакли каҷхаттаи ҷараён ва шиддат дар шабакаҳои электрикӣ ба шумор мераванд. Олими шинохта Ҷ. Ариллага аҳамияти ин масъаларо чунин шарҳ додааст, ки «дар зеристгоҳҳои кашишӣ зуд-зуд росткунакҳое истифода мешаванд, ки аз рӯи нақшаҳои шашпулсӣ кор мекунанд, ки ин боиси афзоиши зариби умумии ташкилкунандаҳои гармоникии

ҷараён ва шиддат мегардад» [3]. Бори чунин зеристгоҳҳо хусусияти ғайрисинусоидалӣ, ғайрисимметрӣ ва зудтағйирёбанда дошта, боиси дар ҳудуди васеъ тағйир ёфтани бузургии ҷараёнҳо ва шиддати басомадҳои олӣ мегардад.

Техникаи электронӣ. Сарчашмаи дигари ГО дар шабакаҳои шиддати паст – ин техникаи электронӣ мебошад, ки таркиби ин гуна истеъмолкунандагон аз росткунаки дорои филтри пуриқтидори ғунҷоишӣ дорад. Симуткин М.Г. иброз медорад, ки «техникаи электронии муосир бо табдилдиҳандаҳои дорои даромадгоҳи бетрансформаторӣ муҷаҳҳаз мебошад (ноутбукҳо, мониторҳо, протсессорҳо, телевизорҳо ва ғ.). Сабаби пайдоиши чунин монеаҳо ин табдилдиҳии ҷараёни тағйирёбанда ба ҷараёни доимӣ мебошад. Чунин реҷаи кори манбаъҳои импулсӣ ба таҳрифи шакли каҷхаттаи шиддат дар шабакаи электрикии таъминкунанда оварда мерасонад. Ҳамзамон, худи ин дастгоҳҳо бо паст шудани сифати энергияи электрикӣ хеле ҳассос мебошанд. Ин мушкилот махсусан, ҳангоми электротаъминкунии биноҳои маъмурӣ, ки дар онҳо намудҳои зикршудаи истеъмолкунандагони энергияи электрикӣ бештар васеъ паҳн гардидаанд, шадид зоҳир мегардад» [19, 20].

Асбобҳои равшанидиҳанда. Ҳамзамон, ҳиссаи истифодаи манбаъҳои равшанидиҳандаи каммасраф дар тиҷорат ва рӯзгор ҳамасола афзоиш меёбад. Сарфи назар аз арзиши нисбатан баланди онҳо, муҳлати хизмати ин гуна лампаҳо то 5 – 15 маротиба аз лампаҳои анъанавӣ зиёдтар буда, истеъмоли энергияи электрикӣ дар онҳо то 3 – 5 маротиба камтар мебошанд [19].

Симуткин М.Г. дар асоси таҳқиқоти илмиаш иброз медорад, ки «аксари лампаҳои каммасраф (бо арзиши то 250 рубл), ки дар бозори маҳсулоти электротехникии Русия муаррифӣ шудаанд, ҷараёнеро истеъмол мекунанд, ки шакли он аз синусоида хеле фарқ мекунад» [19].

Таҷҳизоти электрикии дорои ТВА – и ғайрихаттӣ. Иловатан, ба истеъмолкунандагони электрикии дар боло зикр гардида, таҷҳизоти электрикии шабакаи тақсимотӣ низ дар навбати худ метавонанд манбаи ГО дар шабакаҳои электрикӣ гарданд. Дар кори илмии олимони рус Олексюк Б.В. ва дигарон дарҷ гардидааст, ки «ҳангоми мавҷуд набудани бор шиддати ибтидои трансформатор

тақрибан ба қувваи электроҳаракатдиҳанда (ҚЭҲ) баробар аст, зеро дар ҷараёнҳои хурд таъсири муқовимати фаъол ва пароканиш хеле кам аст. Ҳангоми мавҷуд набудани бор, шиддати синусоидалӣ боиси пайдоиши сели синусоидалӣ мегардад, вале дар айни замон ҷараёни ибтидоӣ комилан синусоидалӣ нахоҳад буд, зеро сел ба ҷараёни магнитнокшуда ба таври ғайрихаттӣ мутаносиб аст» [20]. Ба ақидаи Шаров Ю.В. «мошинҳои электрикӣ низ манбаи ГО дар шабакаҳои электрикӣ мебошанд. Бинобар хусусиятҳои конструктивии худ, мошинҳои электрикӣ ҷараёнҳои гармоникаҳои олиро ҳосил мекунанд. Инчунин таҳқиқоти гузаронидашуда нишод дод, ки тоҷи электрикӣ дар хатҳои интиқоли барқ низ ба сифати энергияи электрикӣ аз рӯи ташкилкунандаи гармоникии *n*-уми ҷараён ва шиддат таъсир мерасонад ва боиси пайдоиши онҳо дар хати интиқол мегардад» [21, 22].

Кори таҷҳизоти барқӣ бо бори дорои тавсифоти волт-амперии ғайрихаттӣ. Таъсири манфии ГО ба элементҳои гуногуни шабакаҳои электрикӣ ҳанӯз дар аввали солҳои 20-уми асри гузашта маълум гардида буд. Дар мақолаҳои илмии олимон Лютер Р.А., Костенко М.П. ва Володин В.В. мушкилоти бартараф намудани таъсири манфии ГО ба миён омада буд ва таъсири онҳо ба элементҳои шабакаҳои электрикӣ баррасӣ шуда буданд: «ГО – и ҷараён ва шиддат ба таҷҳизоти дастгоҳҳои электрикии қуввагӣ, баъзе намудҳои ҳифзи релеӣ, асбобҳои ченкунӣ ва системаҳои автоматика таъсири номусоид расонида, дар айни замон боиси талафоти иловагии энергияи электрикӣ мегарданд ва муҳлати хизмати изолятсияро кӯтоҳ мекунанд» [23-25].

Таҳқиқоти пайвастаи СЭЭ собит месозанд: «дар системаҳои дорои истеъмолкунандагони пуриқтидори таҳрифкунанда ғайрисинусоидалӣ шудани каҷхаттаҳои ҷараёну шиддат аз мушкилоти аслии соҳа ба шумор меравад» [3, 17, 26-29].

Маълумоти назорати СЭЭ дар шабакаҳои электрикии дорои бори пуриқтидори ғайрихаттӣ собит сохт, ки «зариби ғайрисинусоидалии шиддат на танҳо дар тахтасимҳои истеъмолкунандагон, балки дар шабакаҳои шиддати баланд низ аз меъёрҳои муқарраршуда зиёд мебошад» [30-33].

1.3 Резонанс дар шабакаҳои электрикӣ

Резонанс – ин равандҳои гузариши электромагнитӣ мебошад, ки пайдоиши онҳо ба нишондиҳандаҳои СЭЭ таъсир мерасонад. Дар кори мазкур баҳодиҳии эҳтимоли пайдоиши онҳо дар шабакаҳои электрикии шиддати баланд иҷро карда мешавад.

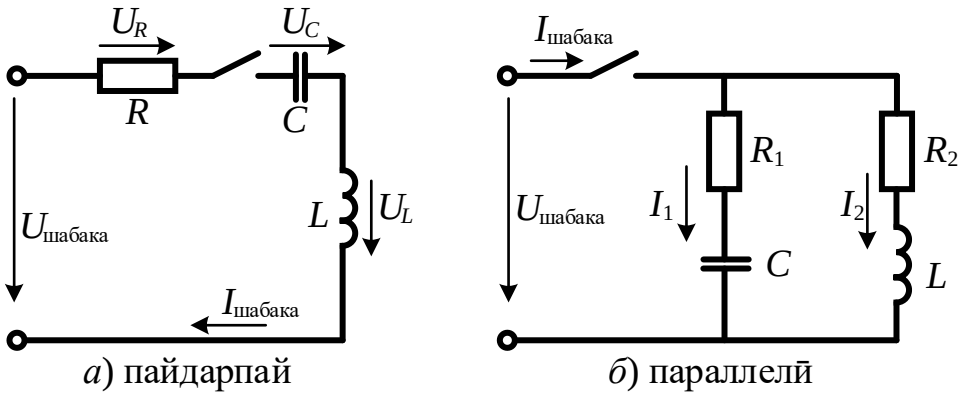
Ҳодисаи резонанс дар шабакаҳои электрикии ҷараёни тағйирёбанда ҳангоми мавҷуд будани элементҳои ғайрифаъол, ҳам индуктивӣ ва ҳам ғунҷоишӣ ба вуҷуд меояд. Барои пайдоиши резонанс дар система мавҷудияти ду намуди захираи энергия зарур аст, ки дар ин ҳолат энергия даврӣ аз як шакл ба шакли дигар ва баръакс табдил меёбад: дар системаҳои механикӣ ин энергияи кинетикӣ ва потенсиалӣ, дар системаҳои электрикӣ бошад – энергияи электрикӣ ва магнитӣ мебошанд. Ҳамин тариқ, занҷирҳои электрикии дорои майдонҳои магнитӣ ва электрикӣ қобилияти якдигарро ҷуброн намуданро доранд. Ба ақидаи Бессонов Л.А. «резонанси электрикӣ вақте ба вуҷуд меояд, ки талабот ба энергияи магнитӣ ва электрикӣ баробар бошад, яъне дар чунин ҳолатҳо энергияҳои магнитӣ ва электрикӣ якдигарро комилан ҷуброн мекунанд» [34].

Ҳодисаи резонанс дар баъзе соҳаҳо, хусусан дар радиотехника, татбиқи хеле муфид дорад. Дар СЭ резонанс барои кам намудани ТГОҶ (ташкилкунандаҳои гармоникаҳои олии ҷараён) бо ёрии филтрҳои ғайрифаъол истифода мешавад. Олим Аминӣ М.А. қайд менамояд, ки «аз ҷониби дигар, ҳодисаи резонансӣ метавонад дар системаҳои энергетикӣ хеле харобкунанда бошад, бинобар ин ҳангоми лоиҳакашӣ ва истифодабарии шабакаҳои электрикӣ эҳтиёти махсус лозим аст» [35], зеро пайдоиши резонанс дар басомади саноатӣ (50 Ҳс) бояд пешгирӣ карда шавад. Бояд қайд кард, ки резонанс инчунин метавонад дар басомадҳои дигар низ ба вуҷуд ояд, агар дар шабака манбаъҳои ҷараён ва ё шиддати гармоникаҳои олӣ мавҷуд бошанд. Пайдоиши резонанс ба зиёдшавии шиддат оварда мерасонад, ки метавонад боиси сербори ва осеб дидани таҷҳизоти электрикӣ гардад. Резонанси электрикӣ дар занҷир вақте ба вуҷуд меояд, ки муқовиматҳои ғунҷоишӣ ва индуктивӣ дар басомади муайян ба якдигар баробар шаванд. Ин басомад, ки онро инчунин басомади хусусӣ ё

басомади резонансӣ меноманд, ки бо ифодаи зерин муайян карда мешавад [34, 36]:

$$f_n = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}. \qquad (1.4)$$

Вобаста ба нақшаи пайвасткунии элементҳои RLC – ду намуди резонанс мавҷуд аст: пайдарпай ва параллелӣ (мувозӣ). Нақшаи асосии резонанси пайдарпай дар расми 1.2*а* ва резонанси параллелӣ дар расми 1.2*б* нишон дода шудаанд.



а) пайдарпай *б*) параллелӣ

Расми 1.2. – Нақшаи электрикии резонанси пайдарпай (а) ва параллелӣ (б)

Барои қиматҳои дилхоҳи L ва C танҳо як басомад мавҷуд аст (ҳам дар занҷирҳои пайдарпай ва ҳам дар занҷирҳои параллелӣ), ки боиси мувофиқати дақиқи X_L ва X_C (b_L ва b_C) мегардад.

Дар ҳолати резонанси пайдарпай (расми 1.2*а*) ҳамаи элементҳои занҷир дар як шоха бо ҷараёни умумӣ қарор доранд ва муқовимати умумии занҷир бо ифодаи зерин муайян карда мешавад:

$$Z_{\text{пайдарпай}} = R + j\left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right) \qquad (1.5)$$

Ҳангоми пайвасти пайдарпай дар басомади резонансӣ муқовиматҳои индуктивӣ $(\omega \cdot L)$ ва ғунҷоишии $\left(\frac{1}{\omega \cdot C}\right)$ якдигарро ҷуброн мекунанд ва

муқовимати натиҷавии занҷир комилан фаъол (R) мегардад. Шиддат дар ғалтаки индуктивӣ (U_L) ва дар конденсатор (U_C) дорои амплитудаҳои калон мешаванд (дар ҳолатҳои алоҳида аз шиддати манбаъ $U_{\text{шабака}}$ зиёд мешаванд), вале кунҷҳои фазавии муқобил доранд ва якдигарро мутақобилан ҷуброн менамоянд. Ҳангоми резонанси пайдарпай ҷараёни занҷир танҳо бо резистори R то қимати $I_{\text{шабака}} = \dfrac{U_{\text{шабака}}}{R}$ маҳдуд аст.

Дар ҳолати резонанси параллелӣ ҳамаи элементҳои занҷир ба таври параллелӣ пайваст мешаванд ва дорои шиддати якхела мебошанд (расми 1.2*б*). Аввал ноқилияти ҳар як шохаро дар алоҳидагӣ муайян мекунем:

$$\begin{cases} Y_1 = \dfrac{1}{R_1 - j\dfrac{1}{\omega \cdot C}} = \dfrac{R_1}{R_1^2 + \dfrac{1}{\omega^2 \cdot C^2}} + j\dfrac{\dfrac{1}{\omega \cdot C}}{R_1^2 + \dfrac{1}{\omega^2 \cdot C^2}} = g_1 + jb_1, \\ Y_2 = \dfrac{1}{R_2 + j\omega \cdot L} = \dfrac{R_2}{R_2^2 + \omega^2 \cdot L^2} - j\dfrac{\omega \cdot L}{R_2^2 + \omega^2 \cdot L^2} = g_2 - jb_2. \end{cases}$$

Мувофиқи шарти резонанси параллелӣ $b_1 = b_2,$ метавон чунин навишт:

$$\frac{\dfrac{1}{\omega \cdot C}}{R_1^2 + \dfrac{1}{\omega^2 \cdot C^2}} = \frac{\omega \cdot L}{R_2^2 + \omega^2 \cdot L^2}$$

Агар муқовиматҳои фаъол ба сифр баробар бошанд, яъне $R_1 = R_2 = 0,$ он гоҳ ноқилияти пурраи занҷир бо ифодаи зерин муайян карда мешавад:

$$Y_{\text{параллел}} = j \cdot \omega \cdot C - j\frac{1}{\omega \cdot L} \qquad (1.6)$$

Басомади резонансӣ ҳангоми пайвасти параллелӣ мувофиқи ифодаи (1.6) муайян карда мешавад. Бессонов Л.А. қайд мекунад, ки «дар басомади

резонансии пайвасти параллелӣ ноқилиятҳои индуктивӣ $\left(\frac{1}{\omega \cdot L}\right)$ ва ғунҷоишӣ $(\omega \cdot C)$ якдигарро ҷуброн мекунанд ва ноқилияти натиҷавӣ ба $G = \frac{1}{R}$ баробар мешавад» [22]. Ҷараёнҳои I_C ва I_L ба амплитудаҳои калон мерасанд (дар ҳолатҳои алоҳида аз ҷараёни умумии шабака $I_{\text{шабака}}$ зиёд мешаванд), вале кунҷҳои фазавии муқобил доранд ва якдигарро мутақобилан ҷуброн мекунанд. Ҳангоми резонанси параллелӣ шиддати занҷир танҳо бо ноқилияти фаъол G маҳдуд мешавад. Ҳамин тариқ, метавон хулоса бароварда, ки дар реҷаи резонанс ҳангоми пайвасти пайдарпай муқовимати умумии занҷир минималӣ ва ҳангоми пайвасти параллелӣ ноқилияти умумии занҷир минималӣ хоҳад буд. Дар реҷаҳои резонансӣ қиматҳои ТГОҶ ва ТГОШ дорои нишондиҳандаҳои максималӣ мебошанд, ки аз меъёрҳои муқарраршуда мувофиқи [1] зиёданд.

1.4 Ҳолати мушкилоти сифати энергияи электрикӣ аз рӯи ғайрисинусоидалӣ будани шакли каҷхаттаи шиддатҳо дар шабакаҳои электрикии Ҷумҳурии Тоҷикистон

Истеъмолкунандагони асосии ЭЭ дар шабакаҳои электрикӣ Ҷумҳурии Тоҷикистон, аҳолии шаҳр ва деҳот, пойгоҳҳои обкашӣ (асосан дар давраи тобистон), инчунин бори пуриқтидори ғайрихаттӣ дар мисоли Ширкати алюминии тоҷик (ШАТ) ташкил медиҳанд. Агар қаблан дар таркиби бории коммуналӣ-маишии ҷумҳурӣ асосан қабулкунакҳои электрикии (ҚЭ) дорои тавсифоти волт-амперии хаттӣ мавҷуд буданд, ҳоло таркиби бор ба куллӣ тағйир ёфтааст ва дар таркиби қабулкунакҳои электрикии бахши коммуналӣ-маишӣ, ҚЭ бо ТВА-и ғайрихаттӣ хеле зиёд шуданд. Аён аст, ки ин гуна қабулкунакҳои электрикӣ манбаъҳои ТГОҶ мебошанд ва дар шабакаҳои электрикӣ паҳн шуда, сифати энергияи электрикиро аз рӯи шакли каҷхаттаи шиддат пас мекунад. Дар кори [16] оварда шудааст, ки истеҳсоли энергияи электрикӣ дар шабакаҳои электрикии Ҷумҳурии Тоҷикистон, дар неругоҳи барқи обӣ (НБО) амалӣ мегардад, ки тавоноии дастраси онҳо аз фасли сол вобаста аст.

Ба ақидаи Ҷӯразода Ш.Д.: «бо баробари дар давраи зимистон ҳангоми кам шудани серобии дарёҳо, барои таъмини кори устувори шабакаҳои электрикии Ҷумҳурии Тоҷикистон, истеъмоли энергияи электрикӣ бори коммуналӣ-маиширо маҳдуд мекунанд ва тавонои истеъмолшавандаи корхонаи воҳиди давлатии (КВД) «ШАТ»-ро кам намекунанд, зеро ҳаҷми истеҳсоли алюминий ба сатҳи маҷмуи маҳсулоти дохилии (ММД) Ҷумҳурии Тоҷикистон таъсири назаррас мерасонад. Ҳамин тариқ, ҳиссаи фоизи тавоноии истеъмолшавандаи КВД «ШАТ» аз тавоноии умумии шабакаҳои электрикии Ҷумҳурии Тоҷикистон зиёд мешавад, ки ин барои паст шудани сифати энергияи электрикӣ дар гиреҳҳои шабакаҳои электрикӣ дорои шиддати 10 – 500 кВ шароит ба вуҷуд меорад» [16].

Ин маънои онро дорад, ки дар шабакаҳои электрикии Ҷумҳурии Тоҷикистон сатҳи ТГОҶ ва ТГОШ на танҳо дар шабакаҳои 6 – 10 кВ ва аз он пасттар аҳамияти назаррас дорад, балки бинобар шароити кори ШАТ, зарибҳои тавсифдиҳандаи шакли каҷхаттаи шиддат аз ҳудуди меъёрҳои ҳуҷҷати танзимкунандае, ки дар ҳудуди Ҷумҳурии Тоҷикистон амал мекунад [1], берун мебароянд. То имрӯз бо масъалаи таҳқиқи мушкилоти таъмини сифати энергияи электрикӣ дар шабакаҳои электрикӣ Ҷумҳурии Тоҷикистон Назиров Х.Б. [15, 27], Ҷӯразода Ш.Ҷ. [16, 30, 31], Иноятов М.Б. [37], Камолов М.М. [38] ва Амирхонов А.С. [39] машғул шудаанд. Корҳои илмии олимони номбурда асосан ба баҳодиҳии СЭЭ равона карда шудаанд, аз ҷумла: «ғайрисинусоидалӣ будани шиддат ва ҷараён дар элементҳои шабакаҳои электрикӣ, таҳлили вазъи электромагнитии СЭ Ҷумҳурии Тоҷикистон; имкониятҳои танзими шиддат дар гиреҳҳо ва усули интихобу ҷойгиркунии батареяҳои конденсаторӣ дар баъзе зеристгоҳҳои қисми марказии СЭ Ҷумҳурии Тоҷикистон; инчунин чорабиниҳо оид ба таъмини СЭЭ равона карда шудаанд» [15, 16, 37 – 39].

Аммо ҳангоми таҳлили реҷаҳои ғайрисинусоидалии кори системаҳои электроэнергетикӣ, интихоби ҷойи насб ва тавоноии таҷҳизоти ҷубронкунанда, эҳтимолияти ба вуҷуд омадани резонанс ба назар гирифта нашудааст. Натиҷаҳои ченкунӣ ва моделсозӣ аз рӯи ғайрисинусоидалӣ будани шакли каҷхаттаи шиддат дар муқоиса бо ҳуҷҷати меъёрии [1] дар ҷадвали 1.1 оварда шудаанд.

Ҷадвали 1.1. – Натиҷаҳои ченкунии нишондиҳандаҳои сифати энергияи электрикӣ дар СЭ – и Ҷумҳурии Тоҷикистон дар солҳои гуногун

$U_{ном}$, кВ	НСЭЭ, тавсифкунандаи ғайрисинусоидалӣ будани шиддат					
	K_U			$K_{U(n)}$		
	2011 [15]	2015 [16]	2022 [38]	2011 [15]	2015 [16]	2022 [38]
500 кВ	+	+		+	+	
220 кВ	+	+		+	–	
110 кВ	+	–	–	+	–	–
10 кВ	–	–	–	+	–	–
15,75 кВ	–	+		+	+	
380 В	–	–	–	+	–	–
220 В	–	–	–	+	–	–

+/ - Мувофиқат мекунад ва мувофиқат намекунад ба меъёрҳои ГОСТ 32144-2013.

Дар асоси ченкуниҳои Назиров Х.Б. ва Ҷӯразода Ш.Ҷ. аз ҷадвали 1.1 чунин хулосабарорӣ кардан мумкин аст: «ғайр аз шабакаи 500 кВ, амалан дар тамоми синфҳои шиддат риоя нашудани зарибҳои тавсифкунандаи ғайрисинусоидалӣ будани шакли каҷхаттаи шиддат мушоҳида карда мешавад» [15, 16]. Бояд қайд кард, ки ҳангоми ченкунӣ Ширкати алюминии тоҷик бо тавоноии пурраи худ кор намекард (тахминан 30% – и тавоноии пурра) ва ба ғайр аз ин, ҳангоми ба кор оғоз намудани лоиҳаи CASA-1000, ки дар он интиқоли энергияи электрикӣ тавассути ҷараёни доимӣ сурат мегирад, сатҳи ғайрисинусоидалӣ будан метавонад дар шабакаҳои шиддаташон 500 кВ низ афзоиш ёбад.

Бинобар ин, таваҷҷуҳи махсусро бояд ба паҳншавии ТГОҶ дар шабакаҳои электрикии дараҷаҳои гуногуни шиддат равона кард. Барои ин, лозим аст, ки таркиби қабулкунакҳои электрикӣ муайян карда шавад ва ҳамаи қабулкунакҳои электрикии ба шабака пайвастшударо ба гурӯҳҳои зерин тақсим намудан зарур аст: бории табдилдиҳанда (КВД «ШАТ»), электроникаи маишӣ, элементҳои нимноқилӣ, манбаъҳои рӯшноии газҳои разрядӣ ва ғайра, ки манбаъҳои ТГОҶ мебошанд, инчунин ҳамаи қабулкунакҳои электрикӣ дорои ТВА – и хаттӣ, ё ба таври кӯтоҳ «борҳои хаттӣ». Бо назардошти афзоиши шадиди борҳои ғайрихаттӣ дар таркиби истеъмолкунандагони ЭЭ ва эҳтимолияти ба вуҷуд омадани

резонанс дар шабака бинобар мавҷудияти ТГОҶ, масъалаи омузиши реҷаҳои ғайрисинусоидалии кори шабака мубрам мебошад [16, 31].

1.5 Гармоникаҳои олӣ дар шабакаҳои электрикӣ. Тавоноии таҳрифӣ

Меъёрҳои гармоникаҳои олӣ дар шабакаҳои электрикӣ дар асоси қиматҳои зарибҳои тавсифкунандаи шакли каҷхаттаи шиддат K_U ва $K_{U(n)}$ мувофиқи ҳуҷҷати меъёрии [1] муайян карда мешаванд. Зарибҳои тавсифкунандаи шакли каҷхатти ҷараёни K_I ва $K_{I(n)}$ дар Ҷумҳурии Тоҷикистон меъёрбандӣ карда намешаванд, вале мувофиқи стандарти умумиҷаҳонии [40] онҳо меъёрбандӣ карда мешаванд.

Ҳамин тариқ, қимати зариби $K_{U(n)}$ мавҷудияти монеаҳоро дар шабака нишон диҳад, қимати зариби $K_{I(n)}$ бошад – бузургии монеаҳоеро, ки аз ҷониби манбаъҳои гармоникаҳои олӣ (ГО) ба шабака ворид карда мешаванд, ифода менамояд [10]. Дар асоси натиҷаҳои ченкуниҳое, ки дар солҳои 1994 – 2004 дар шабакаҳои Сибири Шарқӣ [10] ва дар шабакаҳои электрикии Ҷумҳурии Тоҷикистон дар солҳои гуногун [15, 16, 30] гузаронида шудаанд, хосиятҳои зерини реҷаҳои гармоникаҳои олӣ муқаррар карда шудаанд:

1. Қимати $K_{U(n)}$ метавонад дар давоми шабонарӯз зуд ва ба таври назаррас тағйир меёбад, инчунин ғайрисимметрӣ будани ин зарибро мушоҳида кардан мумкин аст, яъне дар фазаҳои гуногуни шабакаи электрикии шиддати баланд аз якдигар ба таври назаррас фарқ мекунад;
2. Ҳангоми пайваст ва хомуш намудани элементҳо дар шабака қимати $K_{U(n)}$ метавонад дар ҳудудҳои бениҳоят калон тағйир ёбад, ки зиёдшавии назарраси он метавонад дар гиреҳҳои шабака, ки аз ҷойи пайвасту хомушкунӣ дур ҷойгиранд, ба вуҷуд ояд;
3. Зариби $K_{U(n)}$ ҳангоми пайваст шудани бори ғайрихаттии пуриқтидори нав дар шабака вобаста ба мавқеи ҷойгиршавии гиреҳ меафзояд;
4. Дар шабакаҳои шиддати баланд хосиятҳои мавҷии ХИБ-ҳои дароз зоҳир мегарданд ва боиси афзоиши қиматҳои $K_{U(n)}$ дар шумораи зиёди гиреҳҳои шабака оварда мерасонад.

Тавоноии таҳрифӣ. Барои ҳисоб ва таҳлили реҷаҳои кории шабакаҳои электрикӣ асосан тавоноиҳои фаъол, ғайрифаъол ва пурра истифода мешаванд. Ҳангоми реҷаҳои кории ғайрисинусоидалии шабакаҳо раванди мураккаби интиқоли тавоноӣ мушоҳида мешавад [4, 41, 42]. Дар асоси гуфтаҳои Тонкал В.Е.: «ҳангоми реҷаҳои ғайрисинусоидалӣ, тавоноии пурраи S – ро метавон тавассути қиматҳои лаҳзавии ҷараён ва шиддат чунин ифода кард» [41]:

$$s(t) = u(t) \cdot i(t),$$

ё дар шакли комплексӣ:

$$S = U \cdot I = \sqrt{\left(\sum_{n=1}^{40} U_{(n)}^2\right) \cdot \left(\sum_{n=1}^{40} I_{(n)}^2\right)} =$$

$$= \sqrt{\sum_{n=1}^{40} P_{(n)}^2 + \sum_{n=1}^{40} Q_{(n)}^2 + \sum_{n=1}^{40} D_{I(n)}^2 + \sum_{n=1}^{40} D_{U(n)}^2 + \sum_{i=2}^{40} \sum_{\substack{j=2 \\ j \neq i}}^{40} D_{(i,j)}^2} \approx$$

$$\approx \sqrt{P_{(1)}^2 + Q_{(1)}^2 + \sum_{n=2}^{40} D_{I(n)}^2}, \qquad (1.7)$$

дар ин ҷо, $P_{(n)}$ – тавоноии фаъоли гармоникаи тартиби n;

$$P_{(n)} = U_{(n)} \cdot I_{(n)} \cos\varphi_{(n)},$$

$Q_{(n)}$ – тавоноии ғайрифаъоли гармоникаи тартиби n:

$$Q_{(n)} = U_{(n)} \cdot I_{(n)} \sin\varphi_{(n)},$$

$D_{I(n)}$ ва $D_{U(n)}$ – мувофиқан тавоноиҳои таҳрифие мебошанд, ки дар натиҷаи таъсири мутақобилаи ҷараёни гармоникаи тартиби n бо шиддати гармоникаи асосӣ ва ҷараёни гармоникаи асосӣ бо шиддати гармоникаи тартиби n ба вуҷуд омадаанд:

$$D_{I(n)} = U_{(1)} \cdot I_{(n)},$$
$$D_{U(n)} = U_{(n)} \cdot I_{(1)},$$

$D_{(i,j)}$ – тавоноии таҳрифие мебошад, ки дар натиҷаи таъсири мутақобилаи ҷараёни гармоникаи тартиби *i* бо шиддати гармоникаи тартиби *j* вобастагӣ доранд:

$$D_{(i,j)} = U_{(i)} \cdot I_{(j)}.$$

Аз тамоми ташкилдиҳандаҳои номбаршудаи тавоноӣ барои муайян кардани тавоноӣ дар реҷаҳои ғайрисинусоидалӣ, тавоноиҳои таҳриф, ки дар натиҷаи таъсири мутақобилаи ҷараёни гармоникаи асосӣ бо шиддати гармоникаи тартиби *n* ($D_{U(n)}$) ва таъсири мутақобилаи ҷараёни гармоникаи тартиби *i* бо шиддати гармоникаи тартиби *j* ($D_{(i,j)}$), ба вуҷуд меоянд, инчунин тавоноиҳои фаъол ($P_{(n)}$) ва ғайрифаъол ($Q_{(n)}$) гармоникаи тартиби *n* (ба ғайр аз гармоникаи асосӣ) қиматҳои хурд доранд, зеро манбаъҳои ГО дар шабакаҳои электрикӣ асосан гармоникаҳои олии ҷараёнро ҳосил мекунанд. Бинобар ин, барои баҳодиҳии реҷаҳои ғайрисинусоидалӣ истифода бурдани тавоноии таҳрифи $D_{I(n)}$, ки дар натиҷаи таъсири мутақобилаи гармоникаи якуми шиддат бо гармоникаи *n*-уми ҷараён пайдо мешавад, мақсаднок аст. Дар шабакаҳои электрикии шиддати баланд бо борҳои пуриқтидори ғайрихаттӣ, қиматҳои тавоноии таҳрифӣ бо қимати тавоноиҳои фаъол ва ғайрифаъол гармоникаи асосӣ қобили муқоиса мебошанд. Масалан, дар монографияи Смирнов С.С. кайд карда шудааст, ки «барои бори кашиши роҳи оҳан бузургии тавоноии таҳрифӣ 15 – 18 % – ро аз тавоноии фаъоли бор ташкил медиҳад ва дар филтрҳои резонансӣ – то 70 % аз тавоноии пурра ташкил медиҳад» [10, с. 27].

Мувофиқи назарияи Шултс Ю.: «тавоноии таҳрифӣ, ба фарқ аз ҷараён, ҳангоми табдил шуданаш тавассути трансформатори идеалӣ, тағйир намеёбад. Истифодаи тавоноии таҳрифӣ ҳангоми таҳлили реҷаҳои гармоникаҳои олӣ равандҳоро дар шабакаҳои дорои шиддатҳои номиналии гуногун муқоисапазир мегардонад ва имкон медиҳад, ки раванди интиқоли тавоноии таҳрифӣ аз як шабака ба шабакаи дигар таҳлил карда шавад» [43].

Маълум аст, ки хароҷот барои таҷҳизоти система аслан бо тавоноии он алоқамандӣ доранд. Барои ҳамин, Смирнов С.С. пешниҳод мекунад, ки «ин нишондиҳандаҳо аҳамияти иқтисодӣ доранд. Қобилияти муқоисапазирии тавоноии таҳрифӣ бо тавоноии фаъол меъёрбандии халалҳоро аз борҳои ғайрихаттӣ, ки ба сатҳҳои гуногуни шиддат пайваст карда шудаанд, осон мегардонад» [10].

Дар доираи модели дуқутбаи фаъол тахмин карда мешавад, ки манбаи ҷараён ҳамчун генератори тавоноии таҳрифӣ амал мекунад. Дар ин ҳолат, ҳосилшавии тавоноии таҳрифӣ (ҲТТ) аз ҷониби истеъмолкунандагони ғайрихаттӣ дар гиреҳи муайяни шабака бо тавоноии таҳрифкунандаи манбаи ҷараёни эквивалентии ин гиреҳ назаррас мебошад [10].

$$D_{Gi(n)} = U_{i(1)} \cdot I_{Gi(n)}.$$

Бо назардошти кунҷи лағжиши фазавии манбаи ташкилдиҳандаи гармоникаи олии ҷараён, қимати комплексӣ ҲТТ барои гармоникаи тартиби n истифода мешавад:

$$\dot{D}_{Gi(n)} = U_{i(1)} \cdot I_{Gi(n)}.$$

Тавоноии таҳрифии воридотӣ (ТТВ) дар ин ҳолат ба тавоноии таҳрифии ноқилияти дуқутба ҳангоми $K_{U(n)} = 1$ % будан баробар аст:

$$\dot{D}_{Yi(n)} = 0,01 \cdot U^2_{i(1)} \cdot Y_{i(n)}.$$

Аммо тавоноии таҳрифии воридотии ҷоизӣ (ТТВҶ) барои гиреҳи дилхоҳ ба тавоноии таҳрифии ноқилияти гиреҳ ҳангоми зариби ҷоизии гармоникаи n $K_{U(n)\text{ҷоиз}}$ баробар хоҳад буд:

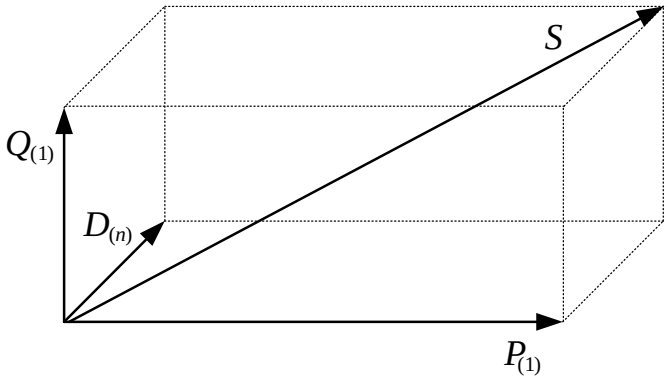
$$\dot{D}_{Yi(n)чоиз.} = K_{U(n)\text{чоиз.}} \cdot \dot{D}_{Yi(n)}. \quad (1.8)$$

Дар асоси назарияи Смирнов С.С.: «ифодаи (1.8) хусусияти комплексии ноқилияти гиреҳ ва сатҳи ҷоизии гармоникаро ифода намуда, дискретӣ мебошад,

зеро миқдорҳои ҷоизии коэффитсиентҳои гармоника танҳо барои қиматҳои дискретии *n* дода шудаанд» [10].

Ҳамин тариқ, формулаи содакардашудаи тавоноиҳо ҳангоми мавҷудияти ТГОҶ дар шабакаҳои электрикӣ чунин муайян карда мешавад:

$$S = \sqrt{P_{(1)}^2 + Q_{(1)}^2 + D_{(n)}^2}, \tag{1.9}$$



Расми 1.3. – Диаграммаи вектории тавоноиҳо ҳангоми реҷаҳои ғайрисинусоидалии кори шабакаҳои электрикӣ

Диаграммаи вектории тавоноиҳо ҳангоми реҷаҳои ғайрисинусоидалии кори шабакаҳои электрикӣ дар расми 1.3 оварда шудааст.

1.6 Баҳодиҳии паҳншавии ташкилкунандаҳои гармоникаҳои олии ҷараён дар СЭЭ дар шароити резонанс

Тавре ки дар боло нишон дода шуд, яке аз шароитҳои асосии кори муътадил ва бесадамавии СЭ, ин сифати шиддат дар тахтасимҳои зерисгоҳҳои он мебошад, ки бо хусусиятҳои техникии кори элементҳои он муайян карда мешавад. Аммо дар баъзе ҳолатҳо, дар шабакаҳои шиддати паст, баланд ва аз ҳад баланд, фузуншиддати дар гиреҳҳо ё зиёдшавии ҷараёнҳо дар шохаҳо мушоҳида мешавад, ки сабаби онҳо резонансҳои шиддат ё ҷараён мебошанд.

Манбаи резонансҳои шиддат ва ҷараён конденсаторҳо, реакторҳо ва комбинатсияи якҷояи онҳо, дастгоҳҳои FACTS ба сифати манбаи тавоноиҳои ғайрифаъол ё фаъол барои танзими шиддат дар СЭ ва зиёд кардани қобилияти

интиқоли ХИБ, ки дар СЭ истифода бурда мешавад, ба ҳисоб мераванд. Дар ин ҳолат, вобаста ба нақшаи шабака ва ҷойгиршавии элементҳои *L* ва *C*-и он, резонанси параллелӣ ва пайдарпай фарқ карда мешаванд

Резонанси параллелӣ бо муқовимати баланди гармоника дар басомади резонансӣ тавсиф дода мешавад. Дар резонанси пайдарпай, аз сабаби паст шудани муқовимати контури резонансӣ махсусан, дар басомадҳои баланди ҷараён, дар контур ва шиддат, дар элементҳои он ба қадри кофӣ калон мешаванд ва хатари ҷиддиро барои таҷҳизоти электрикии СЭ ба вуҷуд меоранд.

Ҳамин тариқ, бартарафкунии ҳодисаи резонансӣ, муайян кардани басомадҳое, ки дар онҳо ба вуҷуд меоянд ва инчунин элементҳои СЭ, ки ба таъсири ГО дучор мешаванд, манфиати илмӣ ва амалӣ дорад.

Смирнов С.С. қайд мекунад, ки «реҷаҳои резонансӣ дар гармоникаҳои олӣ ҳангоми тағйирёбии нақшаҳои шабака, ки аз ҳисоби васл ва хомушшавии ХИБ, конденсаторҳо, филтрҳо ва тағйирёбии тавоноии бор алоқамандand, ба таври тасодуфӣ вуҷуд меоянd» [10].

Бисёр таҳқиқотҳо мавҷуданд, ки ба омузиши ҳодисаҳои резонансӣ равона карда шудаанд. Дар кор [44] муаллифони мақола як қатор масъалаҳоро овардаанд, ки ҳалли онҳо барои омузиши ҳодисаҳои резонансӣ зарур аст. Ба онҳо муайян кардани эҳтимолияти ҷои пайдоиши ҳодисаи резонансӣ, муайян кардани сабабҳои (манбаъҳои) резонанс, муайян кардани элементҳои низоми электротаъминкунӣ (НЭТ), ки метавонанд ба ҳодисаи резонансӣ дар ин гиреҳ таъсир расонад ва баҳодиҳии миқёсии паҳншавии резонанс дар СЭ дучор шаванд, тааллуқ дорад.

Дар маҷмуъ, мувофиқи назарияи Карташев И.И.: «гиреҳҳои резонансӣ ва басомадҳои резонансиро ҳангоми ҳисоби тавсифи басомадии муқовимати беруна ва ё ноқилияти гиреҳҳои шабака барои конфигуратсияи гуногуни нақша ва реҷаҳои бор муайян кардан мумкин аст» [2]. Аммо барои шабакаҳои дорои шумораи зиёди гиреҳҳо ва шохаҳо – ин як масъалаи мураккаб аст, зеро баҳисобгирии шумораи зиёди элементҳои НЭТ ва вақти ҳисобкуниро талаб мекунад.

Дар мақолаи [7] усули нави ҷустуҷӯи гирехҳои резонансӣ ва гармоникаҳо дар шабакаҳои электрикии калонҳаҷм пешниҳод шудааст. Усул ба муайян кардани гирехҳои шабака ва тартиби гармоника, ки дар ин гирехҳо вуҷуд доранд ва ё реҷаи резонансӣ шуданаш мумкин аст, равона карда шудааст. Усул барои муайянкунии тавоноии таҳрифӣ ва тавсифи басомадии система асос ёфтааст.

Барои ин, параметрҳои зерин дар басомадҳои гармоникаҳои тартиби гуногун ҳисоб карда мешаванд: шиддат дар гирехҳои НЭТ, тавоноии пурраи таҳрифӣ, тавоноии таҳрифии истеъмолшаванда, тавоноии фаъол ва ғайрифаъолии таҳрифии истеҳсолшуда. Дар ин ҳолат, ба сифати аломатҳои пайдоиши резонанс дар ин ё он гирех ва басомаде, ки тағйири аломати тавоноии ғайрифаъоли таҳрифӣ ё қимати тавоноии пурраи истеъмолшуда ва қимати тавоноии ғайрифаъоли таҳрифии истеҳсолшуда байни якдигар баробаранд ва ё қимати тавоноии ғайрифаъоли таҳрифии истеҳсолшуда аз қимати тавоноии фаъоли таҳрифии истеҳсолшуда камтар аст, пешниҳод карда мешавад.

Усул, ба ақидаи муаллифон, имкон медиҳад, ки хароҷоти меҳнатӣ ва вақт ҳангоми баҳодиҳии реҷаҳои резонансӣ кам карда шавад.

Дар [45] усули муайян кардани басомадҳои резонансӣ дар асоси таҳлили матритсаи ноқилият пешниҳод шудааст. Дар ин ҳолат, фарз карда мешавад, ки басомад резонансӣ аст, вақте ки ноқилияти гирехии матритсаи шабакаи баррасишаванда ғайримуқаррарӣ мешавад.

Дар [5] усули муайян кардани гирехҳои резонансӣ ва басомадҳои резонансӣ пешниҳод шудааст. Дар ин усул таҳлил дар ду марҳила сурат мегирад: аввал тақрибан гирехҳое муайян карда мешаванд, ки дар он ҷо резонансҳо имконпазиранд ва басомадҳои мувофиқ ба онҳо, сипас ин хусусиятҳо дақиқ карда мешаванд.

Ҳангоми таҳқиқи ҳодисаҳои резонансӣ дар ҳарду марҳила, усул ба муодилаи ҳолати шабакаи электрикӣ асос ёфтааст [46]:

$$\dot{x} = \dot{A} \cdot \dot{x} + \dot{B} \cdot \dot{u}, \qquad (1.10)$$

дар ин ҷо, $\dot{x} = \left[\dot{u}_c^T, \dot{i}_l^T \right]$; $\dot{x}$ – векторҳои шиддат дар элементҳои ғунҷоишӣ $\dot{u}_c^T$ ва ҷараёнҳо дар шохаҳо, ки дорои элементҳои индуктивӣ $\dot{i}_l^T$ мебошанд;

$\dot{A} = \begin{bmatrix} C^{-1} \cdot G & C^{-1} \cdot Q_c \\ L^{-1} \cdot Q_l & L^{-1} \cdot R \end{bmatrix}$; C – матритсаи квадратии ғунҷоишӣ (нисбат ба гиреҳҳои шабакаи электрикӣ);

L – матритсаи квадратии индуктивӣ, ки бо борҳо, ХИБ, трансформаторҳо ва ғайра алоқаманданд;

R – матритсаи муқовиматҳои фаъоли шохаҳои шабакаи электрикӣ;

G – матритсаи ноқилияти элементҳои шунтӣ;

Q_l – матритса, ки алоқаи байни шиддати гиреҳҳо ва ҷараёнҳои шохаҳоро тавсиф мекунад;

Q_c – матритса, ки алоқаи байни ҷараёнҳои шохаҳо ва шиддатҳои гиреҳҳоро тавсиф мекунад;

$\dot{u}$ – вектори параметрҳои воридотӣ, ки элементҳои он манбаъҳои ҷараён ва шиддат мебошанд.

Сипас, аз муодилаи (1.10) дифференсиал гирифта, муодилаи тартиби дуюмро ба даст меоварем:

$$\dot{x} + \left(-\dot{A}^2 \right) \cdot \dot{x} = W\left(\dot{u}, \dot{u} \right), \tag{1.11}$$

дар он ҷо, $W\left(\dot{u}, \dot{u} \right) = \dot{A} \cdot \dot{B} \cdot \dot{u} + \dot{B} \cdot \dot{u}.$

Ҳангоми ворид кардани ишора $\dot{q} = \dot{V}^{-1} \cdot \dot{x},$ муодилаи (1.11) ба шакли зерин табдил меёбад:

$$\dot{q} + \operatorname{diag}\left(\dot{\alpha}_0^2 \right) \cdot \dot{q} = W_q\left(\dot{u}, \dot{u} \right), \tag{1.12}$$

дар ин ҷо, $\operatorname{diag}\left(\dot{\alpha}_0^2 \right) = -\dot{V}^{-1} \cdot \dot{A}^2 \cdot \dot{V},$ $\dot{\alpha}_0^2$ – қимати хусусии матритса и $-\dot{A}^2$, $\dot{V}$ – матритсаи векторҳои хусусии матрисаи $-\dot{A}^2$, $W_q\left(\dot{u}, \dot{u} \right) = \dot{V}^{-1} \cdot W\left(\dot{u}, \dot{u} \right).$

мебошанд.

Формулаи (1.12)-ро дар шароити резонанс таҳлил карда, яъне таносуби байни қисми тасаввурӣ ва қисми воқеии қимати хусусии матритсаи – A^2 имконияти пайдоиши резонанс дар басомади додашударо баҳо додан мумкин аст, аниқтараш, чӣ қадаре ки ин қимат кам бошад, ҳамон қадар эҳтимолияти пайдоиши резонанс зиёдтар аст. Барои муайян кардани ҷои бо эҳтимолияти зиёди пайдоиши резонанс муаллифон таҳлили минбаъдаи алоқамандии ин қиматҳо ва векторҳои хосро пешниҳод мекунанд.

Дар марҳилаи дуюм таҳлили дақиқи ҳодисаҳои резонансӣ бо назардошти он, ки ҳангоми резонанс ҷуброни пурраи тавоноии ғайрифаъоли истеъмолшаванда ва истеҳсолшаванда сурат мегирад, гузаронида мешавад. Дар нуқтаи резонанс вектори ҷараёни аз ҳамин гиреҳ гузаранда ва шиддат дар ҳамин гиреҳ бояд аз рӯи фаза дар басомади резонансӣ мувофиқат кунанд.

Бояд қайд кард, ки усули пешниҳодшудаи муайян кардани ҳодисаҳои резонансӣ дар [5] ба қадри кофӣ мураккаб аст ва татбиқи он барои шабакаҳои электрикии мураккаб бо андозаи калон душвор аст.

Маълум аст, ки ҳисоб кардани параметрҳои реҷавии НЭТ метавонад бо ёрии матритсаи муқовимати гиреҳӣ амалӣ гардад [47]. Таҳлили рафтори матритсаи муқовимати гиреҳӣ ва муқоисаи хусусиятҳои он бо хусусиятҳои рафтори матритсаи ноқилияти гиреҳӣ ҳангоми вуҷуд доштани ҳодисаҳои резонансӣ барои таҳқиқот қобили таваҷҷуҳ мебошад. Азбаски ғайр аз гармоникаҳои олии басомади асосии саноатӣ дар шабакаҳои электрикӣ, интергармоника (басомадҳои байни гармоникаҳои ба гармоникаи асосӣ, каратӣ, масалан, басомадҳои аз 50 Ҳс калон ва аз 100 Ҳс хурд) ва субгармоника (басомадҳои аз гармоникаи асосӣ хурд 50 Ҳс) низ сабт шудаанд, пас таҳлили ҳодисаҳои резонансӣ бояд дар ҳамаи ҳудудҳои басомад гузаронида шавад, на танҳо дар гармоникаҳои басомади асосӣ.

1.7 Талабот ба реҷаҳои гармоникаҳои олӣ дар шабакаҳои шиддати баланд

Параметрҳои реҷаҳои гармоникаҳои олӣ нишондиҳандаҳои мутобиқати электромагнитӣ реҷаҳои шабака ва таҷҳизоти ба он пайвастшуда мебошанд

[6, 48 – 55]. Чӣ хеле ки Смирнов С.С. қайд мекунад: «талабот ба реҷаҳои гармоникаҳои олӣ тавассути бузургии зариби таҳрифи синусоидалии каҷхаттаҳои шиддат K_U ва ҷараён K_I ва зарибҳои гармоникаҳои олии шиддат $K_{U(n)}$ ва ҷараён $K_{I(n)}$ муайян карда мешаванд. Қиматҳои ҷоизии ин зарибҳо тавассути стандартҳои миллӣ оид ба сифати энергияи электрикӣ (СЭЭ) танзим карда мешаванд, ки мутобиқати электромагнитии реҷаҳои шабака ва дастгоҳҳои ба он пайвастшударо таъмин менамоянд» [10, с. 16]. Аз ин рӯ, талабот ба реҷаҳои гармоникаҳои олӣ тавассути бузургии зариби таҳрифии шакли синусоидалии каҷхаттаҳои шиддат ва ҷараён K_U ва K_I, зарибҳои гармоникаҳои олии шиддат $K_{U(n)}$ ва ҷараён $K_{I(n)}$ муайян карда мешаванд. Мувофиқи ақидаҳои олимон дар солҳои гуногун, ба монанди Геддей Д.К. (дар соли 1988), Железко Ю.С. (дар соли 2000) ва Воронин В.П. (дар соли 2004): «бузургиҳои ҷоизии зарибҳои тавсифдиҳандаи шакли каҷхаттаи шиддат тавассути стандартҳои сифати энергияи электрикӣ танзим карда мешаванд, ки мутобиқати электромагнитии реҷаҳои шабака ва таҷҳизоти ба он пайвастшударо таъмин менамоянд. Қиматҳои $K_{U(n)}$ мавҷудияти халалҳоро (монеаҳоро) дар шабака ва $K_{I(n)}$ бузургии халалҳои аз ҷониби истеъмолкунанда ба шабака воридшавандаро нишон медиҳад. Стандартҳои дар ҳудуди давлатҳои иттиҳодияи мустақил амалкунанда созиши байни хароҷот барои таъмини СЭЭ дар шабака ва хароҷот барои таъмини кори таҷҳизоти истеъмолкунандагони ба шабака пайвастшуда мебошанд. Стандартҳо бояд хусусиятҳои ҳудудӣ ва техникии шабакаҳои шиддатҳояшон гуногуни кишвар ва имкониятҳои иқтисодии онро ба назар гиранд» [9, 56 – 59].

Дар ҶТ нишондиҳандаҳои СЭЭ (НСЭЭ) айни замон мувофиқи ҳуҷҷати меъёрии ГОСТ 3144–2013 танзим карда мешавад [1]. Усулҳои гузаронидан ва таҳлили НСЭЭ дар асоси ҳуҷҷатҳои меъёрии [60, 61] ба танзим дароварда мешаванд. Мувофиқи [1]: «ба нишондиҳандаҳои СЭЭ зариби таҳрифи синусоидалии каҷхаттаи шиддат K_U ва зарибҳои ташкилдиҳандаҳои гармоникии шиддат $K_{U(n)}$ дохил мешаванд. Барои ин бузургиҳо қиматҳои меъёрии ҷоизии муқаррарӣ ва ҷоизии ниҳоӣ (ҳаддӣ) муайян карда мешаванд» (ҷадвали 1.2 ва 1.3 дар асоси меъёри стандартӣ [1]). Қиматҳои ҷоизии ҳаддии бузургиҳои $K_{U(n)}$ аз

қиматҳои ҷоизии муқаррарӣ 1,5 баробар зиёд мебошанд. Мувофиқи банди 6.2-и ҳуҷҷати меъёрии «ГОСТ 32145—2013. Энергияи электрикӣ. Мувофиқаи электромагнитии воситаҳои техникӣ. Назорати сифати энергияи электрикӣ дар СТБ-и таъиноташон умумӣ» муддати ченкуниҳои нишондиҳандаҳои СЭЭ на камтар аз 7 шабонарузро ташкил диҳад, яъне: «ҳангоми гузаронидани назорати даврии СЭЭ давомнокии умумии андозагириҳои бефосилаи қиматҳои НСЭЭ мувофиқи ГОСТ 32144-2013 бояд 7 шабонарӯз бошад. Кам намудани давомнокии умумии назорати СЭЭ дар ҳолате иҷозат дода мешавад, ки агар дар як ҳафта ба таври эътимоднок шабонарӯзе (ё якчанд шабонарӯз) муайян карда шавад, ки натиҷаҳои ченкунии қиматҳои НСЭЭ барои давраи якҳафтаина намояндагӣ басанда мебошанд. Дар ин ҳолат, давомнокии андозагириҳои бефосилаи ҳар як НСЭЭ (ба истиснои давомнокии афтиши шиддат) бояд аз 24 соат кам набошад» [60].

Ба сифати фосилаи камтарини вақти ченкунӣ як шабонарӯз қабул карда шудааст. Дар давоми 95 %-и вақти ченкунӣ бузургиҳои K_U ва $K_{U(n)}$ набояд аз қиматҳои ҷоизии муқаррарӣ зиёд шаванд, ҳамзамон қиматҳои максималӣ дар давоми тамоми фосилаи ченкунӣ бояд аз қиматҳои ҷоизии ниҳоӣ камтар бошанд. Барои нишон додани мувофиқати реҷа ба стандарт чунин параметрҳо истифода мешавад: вақти аз меъёр зиёд шудан аз қимати ҷоизии муқаррарии T_1; вақти аз меъёр зиёд шудан аз қимати ҷоизии ниҳоии T_2; бузургтарин қимати ба эҳтимолияти 95 % мувофиқаткунанда ва қимати максималӣ.

Меъёрҳои зикршуда ба меъёрҳои стандарти аврупоии EN 50160, ки барои шабакаҳои 0,4 – 35 кВ таҳияшуда, наздиканд. Тавре ки Смирнов С.С қайд мекунад: «дар ин кишварҳо ба сабаби зичии баланди борҳо ва неругоҳҳои электрикӣ сатҳи гармоникаҳо дар шабакаҳои шиддати баланд паст мебошанд.

Ҷадвали 1.2. – Қимати зариби таҳрифи синусоидалии кӯҳхаттаи шиддат (K_U) [%]

Қимати ҷоизии муқаррарӣ ҳангоми $U_{ном}$, кВ				Қимати ҷоизии ҳаддӣ ҳангоми $U_{ном}$, кВ			
0,38	6 – 20	35	>110	0,38	6 – 20	35	>110
8,0	5,0	4,0	2,0	12,0	8,0	6,0	3,0

Ҷадвали 1.3. – Қиматҳои зариби ташкилдиҳандаи гармоникии *n*-уми шиддат ($K_{U(n)}$) [%]

Гармоникаҳои тоқи ба 3 каратӣ набуда, ҳангоми $U_{ном}$, кВ					Гармоникаҳои тоқи ба 3* каратӣ, ҳангоми $U_{ном}$, кВ					Гармоникаҳои ҷуфт, ҳангоми $U_{ном}$, кВ				
n	0,38	6 – 20	35	>110	*n*	0,38	6 – 20	35	>110	*n*	0,38	6 – 20	35	>110
5	6,0	4,0	3,0	1,5	3	5,0	3,0	3,0	1,5	2	2,0	1,5	1,0	0,5
7	5,0	3,0	2,5	1,0	9	1,5	1,0	1,0	0,4	4	1,0	0,7	0,5	0,3
11	3,5	2,0	2,0	1,0	15	0,3	0,3	0,3	0,2	6	0,5	0,3	0,3	0,2
13	3,0	2,0	1,5	0,7	21	0,2	0,2	0,2	0,2	8	0,5	0,3	0,3	0,2
17	2,0	1,5	1,0	0,5	>21	0,2	0,2	0,2	0,2	10	0,5	0,3	0,3	0,2
19	1,5	1,0	1,0	0,4						12	0,2	0,2	0,2	0,2
23	1,5	1,0	1,0	0,4						>12	0,2	0,2	0,2	0,2
25	1,5	1,0	1,0	0,4										
>25	0,2+1,3 ×25/*n*	0,2+0,8 ×25/*n*	0,2+0,3 ×25/*n*	0,2+0,2 ×25/*n*										

Эзоҳ: *n* – рақами ташкилдиҳандаи гармоникӣ.

*Қиматҳои ҷоизии муқаррарӣ барои гармоникаҳои *n* = 3 ва 9 ба шабакаҳои электрикии якфазавӣ тааллуқ доранд. Дар шабакаҳои электрикии сефазавии сеноқила ин қиматҳо нисбат ба нишондиҳандаҳои дар ҷадвали 1.3 овардашуда 2 баробар камтар қабул мегарданд.

Барои манбаи борҳои кашиши роҳҳои оҳан шабакаҳои махсус истифода мешаванд» [10]. Ба ақидаи олимон Курбатский В.Г., Кордюков Е.И., Галанов В.П. ва Тимофеев Д.В.: «дар Русия зеристгоҳҳои электрикии кашиши роҳҳои оҳан аз ХИБ-и дорои шиддати 110 – 220 кВ манбаи барқ мегиранд, ки ин ба зиёдшави $K_{U(n)}$ дар ин шабакаҳо меорад» [62 – 65]. Шабакаҳои 110 – 220 кВ ҳудудҳои васеъро бо зичии пасти борҳо бо барқ таъмин менамоянд. Дар ҶТ бошад барои таъмини энергияи электрикии борҳои кашиши роҳҳои оҳан шабакаҳои электрикии шиддаташон 27 кВ истифода мешаванд.

Дар ҳуҷҷати меъёрии ГОСТ 32144 – 2013 талаботи зиёдшуда ба бузургии $K_{U(n)}$ барои гармоникаҳо, оғоз аз гармоникаи 13-ум, бе асосноккунии иқтисодӣ муқаррар карда шудаанд. Қайд намудан лозим аст, ки «ин ҳодиса боиси он гардид, ки ҳуҷҷати меъёрии мазкур, чун қоида, дар Сибир ва Шарқи Дур риоя

намегарданд. Кори дарозмуддати шабакаҳои 110 – 220 кВ бо қиматҳои $K_{U(n)}$ барои ин гармоникаҳо, ки аз 2 то 3 баробар зиёданд, нишон медиҳад, ки онҳо барои истеъмолкунандагон хавфнок нестанд» [10].

Дар ИМА, Чин ва як қатор кишварҳои дигар талабот ба сифати энергияи электрикӣ вобаста ба гармоникаҳои олӣ тавассути стандарти байналмилалии IEEE Std 519–92 [66] муайян карда мешаванд, ки дар он барои шабакаҳои баланд қиматҳои K_U = 1,5 % ва $K_{U(n)}$ = 1 %. муқаррар гардидаанд. Ин стандарт хусусиятҳои физикии ХИБ-ҳои масофаашон тӯлониро ва мавҷудияти борҳои бузурги таҳрифкунандаро дар шабака бештар ба назар мегирад. Талаботи ин стандарт нисбат ба талаботи стандарти амалкунандаи имрӯза барои ҶТ низ мувофиқ мебошанд.

Муҳаққиқони рус Железко Ю.С., Соколов В.С. ва Тулский В.Н. дар ин назаранд, ки «талабот ба андозаи монеаҳое, ки аз ҷониби истеъмолкунандагони таҳрифкунанда ворид карда мешаванд, метавонад тавассути ҳиссаи истеъмолкунанда дар қиматҳои $K_{U(n)}$ нишон дода шавад. Қимати ҷоизии $K_{U(n)}$ дар байни борҳои пайвастшуда ва шабака тақсим карда мешавад. Камбудии ин усул вобастагии назарраси $K_{U(n)}$ аз хусусиятҳои шабака мебошад. Ин усул танҳо дар ҳолате дуруст буд, ки тавоноии борҳои таҳрифкунанда чандон калон набуд. Усули дуюм, вақте ки ҷараёнҳои гармоникаҳои олии борҳо меъёрбандӣ карда мешаванд, ба принсипи мутобиқати электромагнитӣ таҷҳизот ва шабака мувофиқат мекунад ва имкон медиҳад, ки ба таҷҳизоти истеъмолкунанда сарфи назар аз хусусиятҳои шабакаи таъминкунанда талабот пешниҳод карда шавад» [13, 67 – 69]. Дар асоси ҳуҷҷати «Қоидаҳои пайвастшавии технологии таҷҳизоти барқкабулкунакҳои (дастгоҳҳои энергетикӣ) шахсони ҳуқуқӣ ва физикӣ ба шабакаҳои электрикӣ: «шабакаи электрикӣ бояд бо назардошти хусусиятҳои борҳои пайвастшаванда лоиҳакашӣ карда шавад. Ин усул дар қоидаҳои пайвастшавии борҳо ба шабакаи таъиноти умумӣ ҷои худро ёфтааст» [70]. Дар ҳуҷҷати меъёрии IEEE Std 519–92 ҷой насб ва тавоноии таҷҳизоти ба шабака ва дар назди истеъмолкунанда насбшавандаро, ки барои таъмини СЭЭ зарур аст, оварда шудааст: «бо назардошти ин қоидаҳо, ширкати таъминкунандаи ЭЭ ҷои

насб ва тавоноии таҷҳизоти ба шабака пайвастшавандаро муайян ва асоснок менамояд [40]. Инчунин дар стандарти мазкур меъёрҳо барои бузургиҳои ҷараёнҳои гармоникаҳои олии истеъмолкунандагон муқаррар карда шудаанд (ҷадвали 1.4). Талаботи монанд дар стандартҳои ҷопонӣ ва аврупоӣ низ мавҷуданд.

Ҷадвали 1.4. – Қиматҳои ҷоизи гармоникаҳои олии ҷараёни истеъмолкунандагони таҳрифкунанда барои шабакаҳои шиддаташон аз 165 кВ боло ($K_{I(n)}$) мувофиқи Std 519–98, [%]

$I_C/I_н$	$n < 11$	$11 < n < 17$	$17 < n < 23$	$25 < n < 35$	K_I
< 50	2,0	1,0	0,75	0,3	2,5
> 50	3,0	1,5	1,15	0,45	3,75

Дар стандартҳои нави таҳияшавандаи Русия ва Иттиҳоди Давлатҳои Мустақил ин усул танҳо барои истеъмолкунандагони тавоноиашон хурд бо ҷараёни то 16 А дар ГОСТ Р 51317.3.2–2006 мавриди истифода қарор гирифт [71].

1.8 Тавсифи шабакаҳои шиддати баланд ҳамчун объекти таҳқиқот

Тавре ки олимон Глинтерник С.Р. ва Курбатский В.Г. ишора менамоянд: «ба шабакаҳои шиддати баланди 110 кВ ва аз он боло миқдори зиёди борҳои бузурги таҳрифкунанда – зеристгоҳҳои кашиши роҳи оҳан, заводҳои алюминий ва корхонаҳои металлургӣ пайваст карда шудаанд. Ин борҳо ба афзоиши шиддатҳои гармоникаҳои олӣ меоранд. Маълум аст, ки шабакаҳои шиддати баланд тамоми минтақаҳои кишварро фаро мегиранд: ҳам шаҳрҳои пураҳолӣ ва мегаполисҳо ва ҳам минтақаҳои камаҳолӣ. Ба қимати зариби $K_{U(n)}$ дар шабакаҳои шиддати баланд зичии борҳои электрикӣ таъсири ҷиддӣ мерасонад. Ба минтақаҳои зичии борҳояшон баланд (шаҳрҳои бузург ва мегаполисҳо) сатҳҳои пасти зарибҳои гармоникаҳои олӣ хосанд ва бинобар ин, гузаронидани чорабиниҳо оид ба меъёрдарории реҷаҳои гармоникаҳои олӣ талаб карда намешавад» [72 – 74]. Смирнов С.С. дар монография худ қайд мекунад, ки «барои шабакаҳои 110 ва 220 кВ-и Сибир ва Шарқи Дур зичии ками борҳо, дарозии

бузурги (ҳазорҳо километр) шабакаҳо ва фоизи баланди борҳои таҳрифкунанда фарқ мекунанд. Дар бисёр гиреҳҳои ин шабакаҳо сифати энергияи электрикӣ, ки ба гармоникаҳои олии шиддат алоқаманд аст, вайрон гардидааст ва таҳияву гузаронидани чорабиниҳо оид ба меъёрдарории сатҳҳои гармоникаҳои олӣ талаб карда мешавад» [10, с. 18].

Смирнов С.С. иброз медорад, ки «барои шабакаҳои шиддати баланд (ШБ) тағйироти назарраси шабонарӯзии тавоноии борҳо дар гиреҳҳои шабака ва ҷараёнҳои алоқавии энергияи электрикӣ байни системаҳо хос мебошанд. Дар шабакаҳо шумораи зиёди коммутатсияҳои элементҳои асосӣ анҷом дода мешаванд, ки ин боиси тағйирёбии реҷаҳои гармоникаҳои олӣ мегардад» [10].

Аз рӯи натиҷаҳои таҳлили андозагириҳои реҷаҳои гиреҳҳо ва борҳо, ки аз тарафи Смирнов С.С. солҳои 1994 – 2004 дар шабакаҳои Сибири Шарқӣ гузаронида шудаанд, хусусиятҳои зерини реҷаҳои гармоникаҳои олӣ муайян карда шудаанд: «$K_{U(n)}$ дар давоми шабонарӯз зуд ва ба таври назаррас тағйир меёбад; $K_{U(n)}$ дар фазаҳои шабака ба таври назаррас аз якдигар фарқ мекунанд; ҳангоми пайвасту хомушшавӣ дар шабака $K_{U(n)}$ метавонад бо қимати калон иваз шавад, ин ҳолат қимати бузурги $K_{U(n)}$ метавонад дар гиреҳҳои шабакаҳое бошад, ки дар мавқеи дуртар аз ҷои пайвасту хомушшавӣ ҷойгир бошанд; афзоиши $K_{U(n)}$ дар гиреҳ вобаста ба пайваст шудани бори ғайрихаттии пуриқтидори нав дар шабака аз мавқеи ҷойгиршавии гиреҳ вобаста мебошад; дар шабакаҳои шиддати баланд хосиятҳои мавҷии ХИБ-ҳои дароз зоҳир мегарданд ва боиси афзоиши қиматҳои $K_{U(n)}$ дар шумораи зиёди гиреҳҳои шабака оварда мерасонад.

Смирнов С.С. инчунин қайд мекунад, ки «воситаҳо ва моделҳое, ки барои ҳисобу таҳлили реҷаҳои кории шабака истифода бурда мешаванд, бояд ҷанбаҳои муҳимми онро нишон диҳанд. Дар ин ҷо, дар навбати аввал, хусусиятҳои омории тақсимоти бузургиҳои тасодуфии ҷараёнҳои манбаъҳои таҳрифкунанда ва хосиятҳои мавҷии хатҳои интиқоли барқ (ХИБ) нақши калидиро мебозанд» [10].

Барои гузаронидани таҳқиқоти вобаста бо таҳлил ва меъёрбандии реҷаҳои гармоникаҳои олӣ маҷмуи барномаҳои «Гармоники» истифода мешавад, ки он

барномаҳои таҳлили андозагириҳо, ҳисоби реҷаҳои гармоникаҳои олӣ ва ҳисоби филтрҳоро дар бар мегирад.

Шарҳи заминаи меъёрӣ барои ҳисоб ва баҳодиҳии реҷаҳои ғайрисинусоидалии кори шабакаҳои электрикӣ, тақсимкуниро ба стандартҳое, ки қиматҳои ниҳоӣ (меъёрҳои сифати энергияи электрикӣ)-ро муқаррар менамоянд ва стандартҳову тавсияҳое, ки усулҳои ҳисоб ва андозагириро танзим мекунанд, талаб менамояд.

Ҳангоми моделкунони шабакаҳо бо бори ғайрихаттӣ ва пешгӯии ҳодисаҳои резонансӣ маҳз ҳамин ҳуҷҷатҳо шартҳои ҳудудиро барои моделҳои математикӣ муайян мекунанд.

1.9 Таъсироти асосии манфии гармоникаҳои олӣ ба таҷҳизоти электрикӣ ва баррасии усулҳои мавҷуда

Мувофиқи ҳуҷҷати меъёрии ГОСТ 32144 – 2013, ки дар ҳудуди Федератсияи Русия ва Ҷумҳурии Тоҷикистон амал мекунад, сатҳи ғайрисинусоидалӣ бо нишондиҳандаҳои зерин баҳодиҳӣ мешавад: зариби ташкилдиҳандаи гармоникавии n-уми шиддат ($K_{U(n)}$) ва зарибҳои умумии ташкилдиҳандаҳои гармоникавии шиддат (K_U) [1]. Натиҷаҳои таҳқиқоти сершумор нишон медиҳанд, ки қимати зарибҳои зикршуда, ки шакли каҷхаттаи шиддатро тавсиф мекунанд, чанд баробар аз қиматҳои меъёрӣ боло мебошанд [10]. Ченкуниҳои дар шабакаҳои электрикии ҶТ гузаронидашуда низ тасдиқ мекунанд, ки қиматҳои нишондиҳандаҳои тавсифкунандаи ғайрисинусоидалии шакли каҷхаттаи шиддат аз ҳудуди қиматҳои меъёрӣ берун мебароянд [15]. Мувофиқи [1] сатҳи ғайрисинусоидалӣ танҳо аз рӯи шакли каҷхаттаи шиддат баҳодиҳӣ мешавад ва аз рӯи шакли каҷхаттаи ҷараён меъёрбандӣ карда нашудааст. Дар шабакаҳои электрикӣ чунин ҳолатҳое мешаванд, ки зарибҳои $K_{U(n)}$ ва K_U дар ҳудуди қиматҳои меъёрӣ қарор доранд, аммо ТГОҶ қиматҳои калон дошта, боиси афзоиши назарраси талафоти тавоноӣ дар шабакаҳо, баланд шудани ҳарорат дар қисмҳои ҷараёнгузари элементҳои шабака ва кам шудани муҳлати хизмати онҳо мегардад [16]. Чунин реҷа барои он СЭ хос аст, ки дар

онҳо масофаи байни манбаъҳои гармоникаҳои олӣ ва неругоҳҳои барқӣ чандон калон нест. Намунаи чунин СЭ метавонад системаи энергетикии ҶТ бошад, ки дар он тавассути хати интиқоли барқи 500 кВ алоқаи барқӣ байни бори ғайрихаттии пуриқтидор (корхонаи алюминийи тоҷик) ва неругоҳи барқи обии Норак мавҷуд аст.

Аз тарафи дигар, қиматҳои ТГОҶ ва ТГОШ метавонанд ҳангоми ба вуҷуд омадани ҳодисаҳои резонансӣ дар шабакаҳои электрикӣ афзоиш ёбанд. Резонанс дар шабакаҳои электрикӣ - ин чунин реҷаи корӣ мебошад, ки дар он муқовимати (ноқилияти) индуктивии шабака ба муқовимати (ноқилияти) ғунҷоишӣ баробар мешавад ва дар натиҷа, муқовимати (ноқилияти) умумии занҷир пурра фаъол мегардад. Ба ибораи дигар, элементҳои ғайрифаъоли занҷир якдигарро ҷуброн мекунанд. Дар реҷаҳои резонансӣ қимати ҷараён (ҳангоми пайвастшавии мувозии элементҳои *RLC*) ва ё шиддат (ҳангоми пайвастшавии пайдарпайи элементҳои *RLC*) чанд маротиба нисбат ба қимати номиналӣ зиёд шуда, боиси зуд аз кор баромадани дастгоҳҳои электрикӣ дар ШЭ мегардад. Карташев И.И. қайд мекунад, ки «реҷаҳои резонансӣ на танҳо дар басомади асосӣ, балки дар басомадҳои дигар низ ба вуҷуд меоянд, аз ин рӯ, ҳангоми дар шабака мавҷуд будани манбаъҳои ҷараён ё шиддати басомадҳои дигар, қиматҳои ТГОҶ ва ТГОШ метавонад бо ҷараёнҳо ва шиддатҳои басомади асосӣ қобили муқоиса (ҳамчен ва ё қариб баробар) бошанд» [2]. Ба масъалаҳои пайдоиши резонанс дар шабакаҳои электрикӣ ва оқибатҳои манфии онҳо корҳои илмии зиёди муҳаққиқони рус ва хориҷӣ бахшида шудаанд.

Дар кори [75] таъсири асосии манфии ҳодисаҳои резонансӣ дар шабакаҳои электрикӣ оварда шудаанд. Модел барои таҳқиқи низоми электротаъминкунӣ бо бори росткунаки пуриқтидор дар муҳити MATLAB/Simulink таҳия карда шудааст. Натиҷаҳои моделсозӣ нишон медиҳанд, ки рақами гармоникае, ки дар он резонанс ба амал меояд, аз дарозии хати интиқоли барқ вобаста аст. Муайян карда шудааст, ки ҳангоми резонанс тавассути манбаи таъминотии система ТГОҶ-и максималӣ гардиш мекунад. Дар ҳамин ҳол, дар охири хат дар ин лаҳза

ТГОҶ қимати минималиро соҳиб мешавад, аммо ТГОШ-и мувофиқ зуд афзоиш меёбад.

Муносибати нави маҷмуӣ ба таҳқиқи ҳодисаҳои резонанс ва феррорезонанс дар системаи энергетикии воқеӣ, дар мисоли ширкати минтақавии барқии Хӯзистон (Эрон), дар кори [35] пешниҳод шудааст.

Чӣ хеле ки Аминӣ М. қайд менамояд: «барои таҳқиқоти ҳодисаҳои феррорезонанс дар шабакаҳои электрикӣ роҳи ҳалли мукаммали нав пешниҳод намудан зарур аст. Усули пешниҳодшуда марҳалаҳои гуногунро дар бар мегирад, аз ҷумла моделсозии таҷҳизоти зеристгоҳҳо, равандҳои гузарандаи электромагнитии ҳодисаҳои эҳтимолии коммутатсия, баҳодиҳии натиҷаҳои мутобиқат ва дар ниҳоят, муайян кардани эҳтимолияти ба амал омадани феррорезонанс. Иловатан, усули нави омузиши резонанс низ пешниҳод гардидааст. Барои муайян кардани меъёри муқовимат ва ноқилият баҳодиҳии резонанс дар тахтасимҳои шабакаҳои электрикӣ, маҳдудиятҳои шиддат ва ҷараён татбиқ карда шудаанд. Усули пешниҳодшуда барои омузиши резонанс ва феррорезонанс дар ҳама зеристгоҳҳои шиддати баланди шабакаҳои электрикии минтақавии Хӯзистон амалӣ карда шуд. Тавассути гузаронидани арзёбиҳои пешниҳодшуда, шароитҳои эҳтимолие, ки метавонанд ба пайдоиши резонанс ва феррорезонанс оварда расонанд, муайян карда шуданд» [35]. Тарзи ҳисоби пешниҳод намудаи Аминӣ М. аз ду марҳала иборат аст: «дар марҳалаи аввал таҷҳизоти зеристгоҳ барои ҳисоби равандҳои гузариши электромагнитӣ барои ҳодисаҳои эҳтимолии коммутатсионӣ моделсозӣ карда шуда, сипас, натиҷаҳои бадастомада баҳодиҳӣ мешаванд; дар марҳалаи дуввум эҳтимолияти ба вуҷуд омадани феррорезонанс муайян карда мешавад» [35]. Барои муайян кардани меъёрҳои муқовимати умумӣ ҳангоми баҳодиҳии резонанс дар тахтасимҳои шабака қиматҳои ниҳоии шиддат ва ҷараён истифода мешаванд. Ҳамчун мисол натиҷаҳои баҳодиҳии муфассали зеристгоҳи «Андимешк» бо шиддати 230 кВ пешниҳод шудааст. Дар асоси иҷрои таҳлили пешниҳодшуда шароитҳои эҳтимолие, ки метавонанд боиси ба вуҷуд омадани резонанс ва феррорезонанс шаванд, ошкор карда шудаанд. Натиҷаҳои бадастомада барои муайян ва пешгирӣ

намудани пайдоиши фузуншиддатии ғайричашмдошт аз сабаби резонанс заруранд. Баҳодиҳии феррорезонанс дар асоси ҳудудҳои муайяншудаи таҳрифи шиддати гармоникавӣ иҷро карда мешавад. Стандарти IEEE 519 таҳрифҳои гармоникӣ, зариби умумии таҳрифҳои гармоникавӣ (K_U) ва қиматҳои миёнаи квадратиро барои дараҷаҳои гуногуни шиддат дар шабакаҳои электрикӣ муайян мекунад. Илова бар ин, ҳудудҳои ҷоизии ҷараён ва шиддат барои муайян кардани ҳудуди ҷоизии тавсифоти басомадии муқовимати умумӣ дар ҳар як сатҳи шиддат ва ҷараён истифода мешаванд. Ҳодисаҳои резонанс ва феррорезонанс дар натиҷаи ҳодисаҳои шабакавӣ, ба монанди амалиёти нақшавӣ ё ғайринақшавии васлакҳо ба вуҷуд меоянд. Барои гузаронидани таҳқиқоти мукаммал ҷиҳати ошкор намудани шароитҳои эҳтимолии пайдоиши резонанс ва феррорезонанс, ҳамаи амалиёти васлакҳо, аз ҷумла якфазавӣ, дуфазавӣ ва сефазавӣ дар ҳар як зеристгоҳ баррасӣ ва баҳодиҳӣ шудаанд. Осиллограммаҳои натиҷавии шиддат дар тахтасимҳои ҳар як зеристгоҳ дар се фосилаи вақт баҳодиҳӣ карда шуданд: то ба кор даромадани васлак, пас аз ба кор даромадани васлак ва пас аз дубора васл шудани васлак.

Тавассути иҷрои баҳодиҳои пешниҳодшуда шароитҳои эҳтимолие, ки боиси ба вуҷуд омадани резонанс ва феррорезонанс мегарданд, ошкор карда шуданд. Натиҷаҳои бадастомада барои операторони шабака бо мақсади пешгирӣ намудани фузуншиддатии ғайричашмдошт манфиати илмию амалӣ доранд.

Дар кори [76] ҳодисаи феррорезонанс бо истифода аз усулҳои таҳлили спектралии тартиби олӣ (ТСТО) омӯхта шудааст. Натиҷаҳо нишон медиҳанд, ки ТСТО метавонад таҳлили ҳамаҷонибаи ҷанбаҳои ғайрихаттии феррорезонансро дар системаҳои электрикӣ таъмин намояд. Дар таҳқиқот нишон дода шудааст, ки истифодаи лаҳзаҳо ва зарибҳои тартиби олӣ (кумулянтҳо) дар ТСТО метавонад ҳангоми таҳлили равандҳои ғайридоимӣ, ки таҳлили онҳо бо усулҳои анъанавӣ душвор аст, натиҷаҳои беҳтар диҳад. Илова бар ин, дар ин таҳқиқот муносибати тақсимоти Вигнер-Вилл бо мақсади таъмин намудани фаҳмиши муфассали спектри энергетикӣ аз нуқтаи назари тавоноии лаҳзавӣ ва басомад дар вақт татбиқ карда шудааст. Натиҷаҳои бадастомадаи таҳқиқот ба дарки амиқтари

манбаъҳои пайдоиш ва пешгирии ҳодисаҳои феррорезонансӣ дар хатҳои интиқоли барқ мусоидат намуда, барои таъмини самаранокӣ, эътимоднокӣ ва бехатарии фаъолияти СЭ аҳамияти муҳим доранд.

Кори [77] ба таҳлили реҷаҳои ғайрисинусоидалии ғайридоимии шабакаҳои электрикӣ бо ёрии табдилдиҳии вейвлетҳо бахшида шудааст. Барои баҳодиҳии дурусти реҷаҳои ғайрисинусоидалии ғайридоимӣ дар асоси назарияи табдилдиҳии вейвлетҳо, дар маҷмуи барномавии MATLAB/Simulink модели имитатсионӣ таҳия карда шудааст. Модели таҳияшуда бо ёрии зарибҳои вейвлет тавоноиҳои фаъол, реактивӣ ва инчунин тавоноии таҳрифиро дар реҷаҳои ғайрисинусоидалии ғайридоимӣ муайян мекунад. Натиҷаҳои таҳқиқот метавонанд барои ширкатҳои элекротаъминкунӣ барои таҳлили амиқ ва муайян намудани зарибҳои $K_{U(n)}$ ва K_U истифода бурда шаванд. Донистати қимати аниқи зарибҳои $K_{U(n)}$ ва K_U имконияти баҳодиҳии дурусти нишондиҳандаҳои техникӣ-иқтисодии истифодаи таҷҳизоти ҷубронкунандаи гармоникаҳои олиро медиҳад.

Дар [78] алгоритм барои ҳисоби талафоти тавоноӣ дар қисмҳои ҷараёнгузари НЭТ дар реҷаҳои ғайрисинусоидалии ғайристатсионарӣ (ғайридоимӣ), аз ҷумла интергармоникаҳо пешниҳод шудааст. Алгоритми таҳияшуда ба истифодаи табдилдиҳии пакети вейвлетӣ асос ёфтааст, ки он имкон медиҳад сигналҳо на танҳо дар соҳаи басомад, балки дар соҳаи вақт низ таҳлил карда шаванд. Ҳангоми гузаронидани таҷриба нақши бори ғайрихаттиро дар НЭТ табдилдиҳандаи 6-пулса иҷро намуд. Ҳисоби талафоти тавоноӣ дар сурати мавҷуд будани интергармоникаҳо дар шабака бо ёрии алгоритми пешниҳодшуда иҷро карда шудааст.

Дар мақолаҳои баррасишуда танҳо қисмҳои алоҳидаи шабакаи электрикӣ дида шудаанд, ки равандҳои эҳтимолии резонансиро дар ин шабакаҳо пурра ба назар намегиранд. Маълум аст, ки маҳз конфигуратсияи шабака ва параметрҳои он ба пайдоиши ҳодисаҳои резонансӣ таъсир мерасонанд. Барои баланд бардоштани дақиқияти натиҷаҳои ҳисоби ҳодисаҳои резонансӣ, ба назар гирифтани конфигуратсия ва параметрҳои шабака дар умум зарур аст. Инчунин донистани қиматҳои ҳудудии мушаххаси муқовиматҳои гиреҳӣ ҳангоми

резонанс зарур мебошад. Аз ин рӯ, таҳия намудани алгоритм барои шабакаҳои мураккаби электрикӣ ва муайян кардани ҳудуди қимати ниҳоии муқовимат (ноқилият) ҳангоми ба вуҷуд омадани резонанс зарур аст.

Конфигуратсияи нақшаи бадалии системаи электрикиро метавон дар шакли граф тасвир кард. Назарияи графҳо ба таври муфассал дар [79] оварда шудааст. Барои графи дилхоҳи шабакаи электрикӣ муайян кардани матритсаи пайвастшавии шохаҳо дар гиреҳҳо (M_Σ) ва матритсаи пайвастшавии шохаҳо дар контурҳои новобаста (N), ки барои тасвири умумикардашудаи аналитикии граф хизмат мекунанд, имконпазир аст [79 – 81]. Ҳангоми ҳисоби реҷаҳои шабакаҳои электрикӣ матритсаҳои асосии зерини нақшаи бадалӣ истифода мешаванд: матритсаҳои диагоналии муқовиматҳо ($Z_{ш}$) ва ноқилиятҳои ($Y_{ш}$) шохаҳо, матритсаҳои муқовиматҳои гиреҳӣ (Z) ва ноқилиятҳои гиреҳӣ (Y) ва дигар матритсаҳое, ки конфигуратсияи нақшаи барқиро муайян мекунанд [80]. Матритсаҳои мазкур метавонанд ҳам барои басомади асосӣ ва ҳам барои басомадҳои олӣ тартиб дода шаванд.

Олимони рус Солодовников В.Е., Флёров А.Н., Тулский В.Н. ва дигарон қайд мекунанд, ки: «масъалаи асосӣ барои системаҳои электроэнергетикии (СЭ) дорои қабулкунандаҳои пуриқтидори энергияи электрикии тавсифи волт-ампериашон ғайрихаттӣ ҳастанд, фаъолият менамоянд, пайваста ичро нашудани талабот ба таҳрифҳои ҷоизии гармоникии шиддат, аз ҷумла дар шабакаҳои электрикии шиддати 110 кВ ва аз он боло мебошад. Дар баробари ин, равишҳои амалии мавҷуда ба моделсозии СЭ дар басомадҳои гармоникаҳои олӣ хеле содакардашуда буда, танҳо барои ба даст овардани баҳодиҳиҳои тахминии басомадҳои резонансӣ ва қиматҳои чашмдошти зарибҳои гармоникаҳои n-уми ҷараён ва шиддат имкон медиҳанд, ки ин самаранокии тадбирҳои таҳияшавандаро оид ба меъёрбандии сифати энергияи электрикӣ ба таври назаррас коҳиш медиҳад. Барои бартараф намудани хатари зикршуда усули ташаккули модели математикии СЭ барои ҳисоби реҷаҳои барқароршудаи ғайрисинусоидалӣ ва таҳқиқи ҳодисаҳои резонансӣ пешниҳод шудааст» [82, с. 54]. Боиси ёдоварист, ки дар шароити ба таври оммавӣ ва мунтазам аз

меъёр зиёд шудани сатҳи зарибҳои $K_{U(n)}$ ва K_U дар СЭ, усулҳои содакардашудаи амалкунанда, ки ба муодиликунонӣ аз рӯи ҷараёнҳои расиши кӯтоҳ асос ёфтаанд, имкон намедиҳанд, ки ҳодисаҳои резонансӣ ва зарибҳои тавсифдиҳандаи шакли каҷхаттаи шиддат дуруст ва боэътимод баҳогузорӣ карда шаванд. Барои бартараф кардани ин маҳдудият усули нави сохтани амсилаи математикии СЭ таҳия гардидааст, ки ҳисобкунии реҷаҳои муътадилро дар басомади асосӣ ва басомадҳои ГО бо таҳқиқи тавсифҳои басомадии муқовиматҳои воридотӣ муттаҳид мекунад. Алгоритми пешниҳодшуда ба васеъкунии итератсионии амсила нисбат ба нуқтаи аввала то ба даст овардани мувофиқати қобили қабули тавсифҳои басомадӣ ва минбаъд фишурдани он то ба гиреҳҳое, ки параметрҳои СЭЭ маълуманд, асос ёфтааст. Ба ҳисоб гирифтани хусусиятҳои амсиласозӣ дар басомади асосӣ дақиқияти баланди ҳисобҳоро таъмин мекунад, ки ин бо зарурати санҷиши амалии онҳо аз рӯи маълумоти андозагириҳои табиӣ тасдиқ карда мешавад.

Дар таҳқиқоти олимон Солодовников В.Е., Флёров А.Н., Тулский В.Н. ва дигарон оварда шудааст, ки: «тавсифи барномаи баҳодиҳии қиматҳои $K_{U(n)}$ дар тахтасимҳои шиддати паст ва баланди яке аз зеристгоҳҳои 110/6 кВ-и СЭ оварда шуда, таҳлили қонуниятҳои ошкоршудаи тағйирёбии онҳо пешниҳод гардидааст. Аз рӯи натиҷаи таҳлили иҷрошуда тасдиқи саҳеҳияти модели математикии СЭ дар шароити норасоии ченкуниҳои $K_{U(n)}$ муайян карда шудааст. Нишон дода шудааст, ки модели таҳияшуда бо дақиқияти зарурӣ тағйироти бақайдгирифташудаи $K_{U(n)}$ – ро дар вазъиятҳои гуногуни нақшавию реҷаӣ инъикос менамояд. Аз рӯи натиҷаи ҳисоби тавсифҳои басомадӣ нишон дода шудааст, ки афзоиши $K_{U(n)}$ аз қиматҳои ҷоизӣ зиёд дар тахтасимҳои зеристгоҳҳо метавонад на танҳо бо фаъолияти элементҳои ғайрихаттӣ, балки бо тағйироти нақша ва реҷаҳои кории шабакаи электрикии 110 кВ ва аз он боло, инчунин бо ҳайати батареяҳои конденсатории статикии (БКС) пайвастшуда дар шабакаи 0,4 кВ вобаста бошад» [83, с. 72]. Гуфтан зарур аст, ки санҷиши амалии усули таҳияшудаи сохтани амсилаи математикии СЭ дар мисоли воқеӣ бо муқоисаи қиматҳои ҳисобшудаи бадастомада бо натиҷаҳои ченкуниҳои зарибҳои $K_{U(n)}$ ва

K_U оварда шудааст. Санҷиши анҷомёфта эътимоднокии баланд ва қобилияти татбиқи алгоритми итератсионии пешниҳодшударо барои таҳлили реҷаҳои муътадили ғайрисинусоидӣ ва ҳодисаҳои резонансӣ дар шабакаҳои дорои борҳои ғайрихаттӣ тасдиқ мекунад. Истифодаи ин амсила имкон медиҳад, ки басомадҳои резонансӣ ва ҳайати гармоникӣ ба таври муассир баҳогузорӣ карда шаванд, ки ин эътимоднокӣ ва дақиқияти банақшагирии чорабиниҳоро ҷиҳати ба танзим даровардани СЭЭ ба таври назаррас боло мебардорад.

1.10 Хулосаҳо оид ба боби аввал

1. Истифода ва воридсозии оммавии қабулкунакҳои электрикӣ бо тавсифи волт-амперии ғайрихаттӣ ба шабакаҳои электрикии муосир боиси пайдоиши реҷаҳои устувори ғайрисинусоидалӣ мегардад. Ташкилдиҳандаҳои гармоникаҳои олии ҷараён ва шиддати ҳосилшуда боиси талафоти иловагии тавоноии фаъол, кори нодурусти автоматика ва фарсудашавии босуръати изолятсияи таҷҳизоти электрикӣ мегарданд;

2. Реҷаҳои кории СЭЭ-и ҶТ бо нобаробарии мавсимии истеҳсоли энергияи электрикӣ дар НБО ва таъсири бартаридоштаи бори пуриқтидори табдилдиҳандаи ғайрихаттии КВД «Ширкати алюминийи тоҷик» ва дигар борҳои ғайрихаттӣ мураккаб мегарданд. Ҳангоми амалӣ сохтани лоиҳаҳои интиқоли ҷараёни доимӣ (CASA-1000) боиси аз ҳудудҳои ҷоизии ГОСТ 32144-2013 баромадани нишондиҳандаҳои ғайрисинусоидалии каҷхаттаи шиддат дар тамоми синфҳои шиддат, то ба шабакаҳои магистралии 500 кВ мегардад;

3. Мавҷудияти элементҳои ғунҷоишӣ ва индуктивӣ дар шабакаи электрикӣ контурҳоро ба вуҷуд меорад, ки дар онҳо ҳангоми мувофиқ омадани басомадҳои гармоникаҳои ҳосилшаванда бо басомадҳои худии шабака резонансҳои параллелӣ ё пайдарпайро ба миён меоранд. Дар реҷаҳои резонансӣ сатҳҳои ТГОҶ ва ТГОШ метавонанд аз меъёрҳои муқарраршуда чандҳо маротиба зиёд гарданд, ки ин боиси фузуншиддатӣ ва зиёд шудани ҷараён мегардад.

4. Барои баҳодиҳии комплексии реҷаҳои ғайрисинусоидалии шабакаҳои электрикӣ усулҳои анъанавии ҳисоби тавоноии фаъол ва ғайрифаъол кофӣ

нестанд, бинобар ин истифодаи тавоноии таҳрифӣ имкон медиҳад, ки равандҳо дар шабакаҳои электрикӣ дорои шиддатҳои гуногуни номиналӣ дуруст муқоиса карда шаванд. Чунин равиш ҳангоми табдилдиҳӣ тавассути трансформатори идеалӣ тағйир намеёбад, ки ин вазифаи меъёрбандии монеаҳоро аз манбаъҳои гармоникаҳо сода мегардонад.

5. Равишҳои математикии мавҷуда барои муайян кардани ҳодисаҳои резонансӣ дар шабакаҳои дорои андозаи калон, ки ба таҳлили матритсаҳои ноқилиятҳо ва муқовиматҳои гиреҳӣ асос ёфтаанд, хеле заҳматталаб боқӣ мемонанд. Барои пешгӯии дақиқи резонансҳо дар тамоми ҳудуди басомадҳо такмили алгоритмҳо ва меъёрҳои баҳодиҳии паҳншавии ТГОҶ бо назардошти омили ҳосили тавоноии таҳрифӣ зарур аст.

БОБИ 2. КОРКАРДИ МОДЕЛИ МАТЕМАТИКИИ ШАБАКАҲОИ ЭЛЕКТРИКИИ ҶУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН БАРОИ ҲИСОБИ РЕҶАҲОИ ҒАЙРИСИНУСОИДАЛӢ

2.1 Усулҳои ҳисоби реҷаҳои ғайрисинусоидалӣ

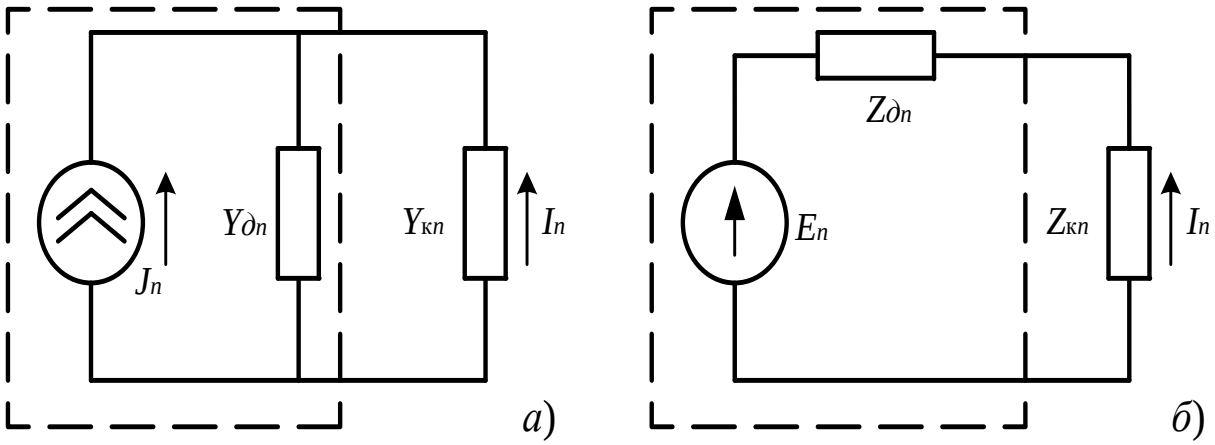
Мавҷудияти қабулкунакҳои электрикӣ ва таҷҳизоти электрикии дорои ғайрихаттии тавсифи волт-амперӣ дар шабакаҳои электрикӣ боиси паст шудани сифати энергияи электрикӣ аз рӯи шакли синусоидалии қаҷхаттаи шиддат мегардад. Афзоиши миқдор ва тавоноии онҳо, ки танҳо дар ҳамаи системаҳои электроэнергетикӣ мушоҳида мешавад, сифати энергияи электрикиро боз ҳам пасттар мекунад [2, 3]. Илова бар ин, метавонанд ҳолатҳое пеш оянд, ки ҳангоми кори шабака дар реҷаи резонансӣ ё наздик ба резонансӣ, қимати зарибҳои тавсифкунандаи шакли каҷхаттаи шиддат аз ҳудуди қиматҳои ҷоизиашон берун мебароянд. Аз ин рӯ, омузиши реҷаҳои ғайрисинусоидалӣ дар СЭ бо назардошти реҷаҳои резонансӣ ё наздик ба он вазифаи ниҳоят муҳим ба шумор меравад, зеро дар таркиби СЭ миқдори зиёди қабулкунакҳои электрикӣ ва таҷҳизоти электрикии ба афзоиши зарибҳои K_U, $K_{U(n)}$ ва ТГОҶ ҳассос фаъолият мекунанд.

Маълум аст, ки ба вуҷуд омадани резонанс танҳо аз параметрҳо ва конфигуратсияи шабакаҳои электрикӣ вобаста набуда, балки ба мавҷудияти ТГОҶ низ алоқаманд мебошад. Аз ин рӯ, барои таҳқиқи пурраи реҷаҳои ғайрисинусоидалии кори шабака, баҳодиҳии дуруст ва моделсозӣ кардани ҳамаи элементҳои ба таркиби СЭ дохилшаванда зарур аст. Чӣ хеле ки Ариллага Дж. иброз медорад: «барои баҳодиҳии ба вуҷуд омадани реҷаи резонансӣ дар шабака, ба назар гирифтани ҳамаи омилҳо, аз ҷумла ноқилиятҳои (муқовиматҳои) ғунҷоишӣ ва индуктивии элементҳои шабака, тағйирёбии конфигуратсияи шабакаҳои электрикӣ, миқдор ва тавоноии манбаъҳои тавоноии ғайрифаъол ва филтрҳо барои ҷуброни ТГОҶ ва ҷараёнҳои пайдарпайи баръакс ва сифрӣ зарур аст» [3]. Илова бар ин, вазифаи асосӣ ҳангоми ҳисобкунии реҷаҳои ғайрисинусоидалии СЭ моделсозии манбаъҳои ТГОҶ ва борҳои ғайрихаттӣ мебошад. Дар асоси ақидаи Жежеленко И.В.: «элементҳои ғайрихаттии

шабакаҳои электрикии ҷараёни тағйирёбанда метавонанд бо ду намуди нақшаи бадалӣ тасвир карда шаванд: бо манбаи ҷараёни гармоникаи υ-юм $J_υ$ ва ноқилияти дохилии $Y_{вτυ}$ ва бо манбаи ҚЭҲ $E_υ$ ва муқовимати дохилии $Z_{вτυ}$; бор ҳамчун муқовимати контури коммутатсия $Z_{кυ}$ (ноқилияти $Y_{кυ}$) истифода мешавад. Ҳангоми ҳисоби $J_υ$ ва $E_υ$ муқовимати контури коммутатсияро, чун қоида, индуктивӣ меҳисобанд. Нақшаи бадалӣ бо манбаи ҚЭҲ ҳангоми муайян кардани қиматҳои гармоникаи ҷараён дар батареяҳои конденсаторҳо дар реҷаи резонанси ҷараёнҳо ба басомадҳои яке аз гармоникаҳо зарур мебошад. Нақшаи бадалӣ бо манбаи ҷараёни $J_υ$ ё ҷараёни шабакавии (додашудаи) $I_υ$ бештар истифода бурда мешавад» [8, с. 34]. Вобаста ба пешниҳоди Жежеленко И.В. борҳои ғайрихаттиро ҳангоми ҳисобкунии реҷаҳои ғайрисинусоидалии СЭ, алалхусус дар реҷаҳои резонансӣ, дар намудҳои зерин моделсозӣ менамоем:

– дар намуди манбаи ҷараёни гармоникаи *n*-ум J_n бо ноқилияти дохилии $Y_{∂n}$, ки параллел ба ноқилияти контури коммутатсияи $Y_{кn}$ пайваст карда шудааст (расми 2.1*а*);

– дар намуди манбаи ҚЭҲ-и E_n гармоникаи *n*-ум бо муқовимати дохилии $Z_{∂n}$, ки пайдарпай ба муқовимати контури коммутатсияи $Z_{кn}$ пайваст карда шудааст (расми 2.1*б*).



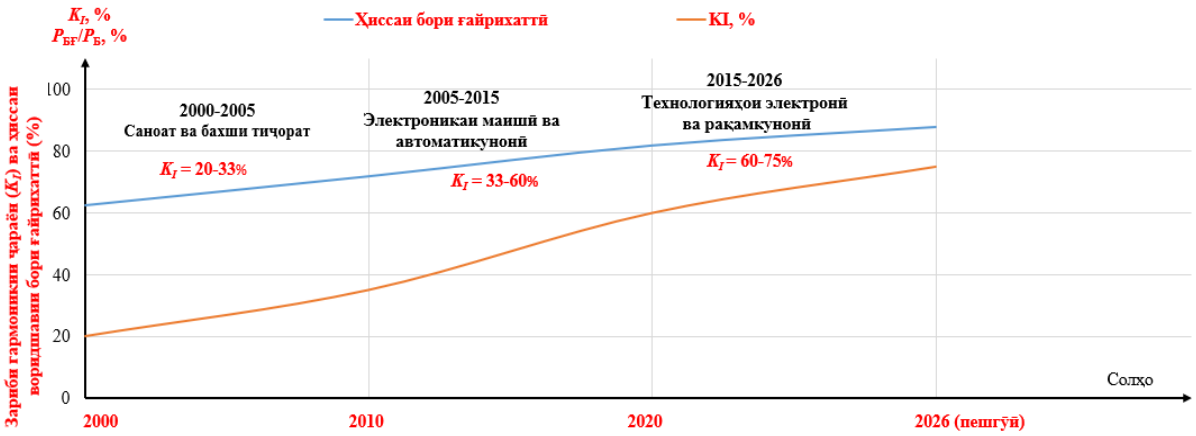
Расми 2.1. – Нақшаҳои бадалии борҳои ғайрихаттӣ ҳангоми ҳисоби реҷаҳои ғайрисинусоидалии шабакаҳои электрикӣ

Дар бештари ҳолатҳо барои муайян кардани қимати ТГОҶ дар батареяҳои конденсаторӣ дар реҷаҳои резонансӣ ва наздик ба он нақшаи бадали бо манбаи ҚЭҲ истифода бурда мешавад. Аммо усули паҳншудатарини ҳисоби реҷаҳои ғайрисинусоидалӣ усули ҳисоби ГО ба воситаи нақшаи бадалӣ бо манбаи ҷараёни J_n мебошад [8]. Усули мазкур бо назардошти он, ки қабулкунакҳои электрикии ғайрихаттӣ аслан манбаъҳои ТГОҶ мебошанд, васеъ паҳн гардидааст.

Натиҷаҳои таҳлили маълумоти оморӣ нишон медиҳанд, ки дар аввали солҳои 2000-ум ҳиссаи борҳои ғайрихаттӣ ҳудуди 62,6 %-ро ташкил медод, аммо дар солҳои 2026-ум вобаста ба татбиқи васеи рӯшноидиҳии светодиодӣ, нақлиёти электрикӣ ва дигар борҳои ғайрихаттӣ, ин нишондиҳанда дар СЭ пешрафта аз 88 % гузашт, ки ин бозбинӣ кардани усулҳои пешгӯии ҳодисаҳои резонансиро талаб мекунад [10]. Динамикаи афзоиши борҳои ғайрихаттӣ ва сатҳи ТГОҶ дар системаҳои электроэнергетикӣ дар давраи аз соли 2000 то соли 2026 дар расми 2.2 оварда шудааст. Бояд таъкид кард, ки зариби умумии ташкилдиҳандаҳои гармоникии ҷараён (K_I) дар солҳои охир ба таври назаррас афзоиш меёбад, хусусан дар давраи байни солҳои 2010 ва 2020 қимати ин зариб аз 35% то 60% афзудааст, дар ин ҳол ҳиссаи бори ғайрихаттӣ дар таркиби қабулкунакҳои электрикии СЭЭ тақрибан аз 72% то 82% расидааст. Ҳамчунин пешгӯӣ карда мешавад, ки қимати ин зариб дар охири соли 2026 то 75% афзоиш ёфта, ҳиссаи бори ғайрихаттӣ беш аз 88%-ро ташкил медиҳад. Илова бар ин, дар солҳои охир афзоиши шадиди гармоникаҳои тоқи ҷории тартиби каратии се (гармоникаҳои 3-юм, 9-ум, 15-ум ва ғайра) ё бо ибораи кӯтоҳ, триплетҳо мушоҳида мешавад, ки дар ноқилҳои нейтралии системаҳои сефазавии чорноқила (асосан дар шабакаҳои 0,38 кВ) ба вуҷуд меоянд.

Маълум аст, ки бо зиёд шудани шумора ва тавоноии борҳои ғайрихаттӣ дар шабакаҳои электрикӣ қимати ТГОҶ низ зиёд мешавад. Афзоиши қимати ТГОҶ асосан ба таркиби қабулкунакҳои электрикӣ ва истифодаи фаъоли манбаъҳои барқароршавандаи энергия (МБЭ) вобаста мебошад. Масалан, агар қаблан (дар солҳои 2000-ум) дар СЭ манбаъ ва истеъмолкунандаи асосии

энергияи электрикӣ мутаносибан неругоҳҳои барқии анъанавӣ (НБО, маркази барқию гармидиҳӣ (МБГ), неругоҳи барқи конденсатсионӣ (НБК) ва ғайра) ва қабулкунакҳои электрикии дорои ТВА-и хаттӣ ба шумор мерафтанд, пас ҳоло (соли 2026) шумора ва тавоноии неругоҳҳои барқӣ дар асоси манбаъҳои барқароршаванда (хусусан НБОф- неругоҳҳои барқии офтобӣ), ки ба шабакаҳои электрикӣ тавассути инверторҳо пайваст мешаванд ва қабулкунакҳои электрикии дорои ТВА-и ғайрихаттӣ (қабулкунакҳои электрикӣ рақамии муосир) афзоиш ёфтаанд. Чунин қабулкунакҳо ва манбаъҳои энергияи электрикӣ шароити мусоидро барои пайдоиши ТГОҶ ва ТГОШ эҷод мекунанд, ки онҳо аз қиматҳои ҷоизии мувофиқи [1] зиёд мебошанд. Бинобар ин, гузаронидани баҳодиҳӣ ва таҳлили СЭЭ аз рӯи ғайрисинусоидалӣ будани шиддат ва ҷараён зарур аст.



Нишондиҳанда	2000	2010	2020	2026 (пешгӯӣ
Ҳиссаи бори ғайрихаттӣ	62,6%	72%	82%	88%
(K_I) –и хоси шабака	20%	35%	60%	75%
Гармоникаҳои бартаридошта	5-ум, 7-ум	5-ум, 7-ум, 11-ум, 13-ум	5-ум то 25-ум +, зиёдшавии гармоникаҳои секарата	5-ум то 25-ум +, зиёдшавии гармоникаҳои секарата

Расми 2.2. – Диаграммаи тағйирёбии борҳои ғайрихаттӣ ва ТГОҶ дар давраи солҳои 2000 – 2026

Қобили қайд аст, ки вазифаи таъмини СЭЭ ҳам дар марҳилаи лоиҳакашӣ ва ҳам ҳангоми истифодабарии низоми электротаъминкунӣ ҳал карда мешавад [8]. Чӣ хеле ки Ҷӯразода Ш.Ҷ. қайд мекунад: «дар марҳилаи лоиҳакашӣ ва зимни

истифодабарии СЭ барои таҳлили реҷаҳои кории ғайрисинусоидалии СЭ ҳалли вазифаҳои асосии зерин зарур аст:

– пешгӯии СЭЭ ва ҳодисаҳои резонансӣ ҳангоми тағйирёбии нақшаи таъминоти борҳои таҳрифкунанда, пас аз азнавсозии шабакаи электрикии корхона ва умуман СЭ;

– баҳодиҳии мувофиқати нишондиҳандаҳои сифати энергияи электрикӣ, ки шакли каҷхаттаи шиддатро мутобиқи талаботи меъёрӣ нишон медиҳанд;

– идоракунии таҷҳизоти батанзимдарорандаи СЭЭ;

— муайян намудани масъулияти молиявӣ ва техникии тарафҳо барои риоя накардани ӯҳдадориҳои шартномавӣ оид ба паст кардани СЭЭ» [16, с. 48].

Аз ин аён мегардад, ки дар ин кор асосан сабабҳои асосии пайдоиш ва пешгирии ҳодисаҳои резонансӣ баррасӣ карда мешаванд. Ҳамчунин такмил додани усулҳои пешгӯии ҳодисаҳои резонансӣ зарур мебошад. Барои ин, аввал бояд усулҳо ва таъминоти барномавии мавҷуда барои таҳлил ва пешгӯии ҳодисаҳои резонансӣ омӯхта шаванд.

Мушкилоти омузиш ва таҳлили ҳодисаҳои резонансӣ дар шабакаҳои электрикӣ дар таҳқиқоти бисёр олимони ҷаҳон мавриди баррасӣ ва омузиш қарор гирифтааст.

Масалан, дар кори илмии [84] оид ба таъсири ҳодисаи резонанси басомадӣ ба қимати гармоникаҳои олии шиддат ва ҷараён дар низоми электротаъминкунӣ ҳангоми тағйир додани дараҷаи ҷуброн намудани тавоноии ғайрифаъол сухан маравад. Дар он роҳҳои муайян намудани басомадҳое, ки дар онҳо имконияти ба вуҷуд омадани резонанс ҳангоми иваз намудани тавоноии ғайрифаъоли таҷҳизоти ҷубронкунанда доранд, пешниҳод шудаанд. Ҳодисаҳои резонансӣ низ ба монанди гармоникаҳои олии ҷараён ва шиддат ба кори низоми электротаъминкунӣ таъсири манфӣ мерасонад. Маълум аст, ки ҳангоми пайвасти борҳои ғайрихаттӣ ба шабакаҳои электрикӣ боиси пайдоиши гармоникаҳои олии ҷараён мешаванд ва ё ба ибораи дигар «манбаи гармоникаи олӣ» дар шабака ба ҳисоб мераванд. Аз ин рӯ, ба сифати бори электрикӣ, ҳаракатоварандаи барқии танзимкунандаи басомад таваҷҷуҳ шудааст. Барои ҷуброни тавоноии

ғайрифаъол ва баланд бардоштани зариби тавоноии бор (cosφ) дар шабакаи электрикӣ, дар тахтасими 0,4 кВ батареяи статикии конденсаторӣ насб карда шудааст. Муаллиф дар асоси ҳисобҳо, ҳамаи басомадҳое, ки дар онҳо имконияти ба вуҷуд омадани резонанси ҷараён вуҷуд дорад, муайян кардааст. Илова бар ин, муаллиф бо роҳи ҳисобӣ саҳвияти муайян намудани басомади резонансиро ҳангоми ба назар нагирифтани ташкилдиҳандаи фаъоли ноқилияти контур муайян кардааст. Ин саҳвият камтар аз 0,1 % – ро ташкил додааст. Муайян намудани басомадҳои резонансӣ дар шабака, барои интихоби дурусти филтрҳо ва танзими онҳо, ки барои коҳиш додани сатҳи ҷараёнҳои гармоникии олӣ (ҶГО) ва инчунин басомадҳое, ки ба басомадҳои резонансӣ наздиканд, зарур аст. Ғайр аз ин, муайян кардани басомадҳои эҳтимолии резонансӣ барои баҳодиҳии мақсадноки истифодаи филтрҳои гармоникӣ низ муҳим мебошад.

Кори илмии Тугунсев С.Г. ба масъалаи таҳрифи каҷхаттаи шиддат аз синусоидаи идеалӣ дар якчанд хатҳои интиқоли барқи вилояти Иркутск (Федератсияи Россия), ки масъалаи муҳимми ҳалталаб барои таъмини сифати энергияи электрикӣ ва эътимоднокии шабакаҳои электрикӣ мебошад, бахшида шудааст. Мақсади таҳқиқоти мазкур коркарди чорабиниҳои техникӣ – ташкилӣ барои бартараф намудани ҳодисаҳои резонансӣ дар басомадҳои гармоникаҳои олӣ дар шабакаҳои электрикии шиддаташ 35 кВ, ки ба зеристгоҳи нақлиётӣ пайваст карда шудааст, мебошад. Объекти таҳқиқоти реҷаи кори ғайрисинусоидали ХИБ шиддаташ 35 кВ, ки ба печаи шиддати миёнаи трансформатори нақлиётии сепечака пайвастбуда, мебошад. Таҳқиқот бо истифода аз барномаи комплексии «Барномаи ҳисоби реҷаҳои ғайрисимметрӣ ва ғайрисинусоидалии шабакаҳои электрикӣ»ва бастаи Microsoft Excel гузаронида шудааст. Натиҷаҳои ҳисоб ва таҳлили реҷаҳои ғайрисимметрӣ ва ғайрисинусоидалии шабакаи электрикии дидашаванда баландшавии шиддатро аз ҳисоби резонанс дар дарозии хат дар басомадҳои тоқи гармоникаҳои олӣ нишон додаанд ва инчунин роҳҳои бартараф намудани ҳодисаҳои резонансро ҳангоми васли реактори ҷубронкунанда дар аввали хати 35 кВ пешниҳод карда шудаанд. Дар асоси ҳисобҳои гирифташуда тасвири графикии каҷхаттаҳои

ташкилкунандаҳои гармоникаҳои шиддат аз 3 то 39 сохта шудаанд. Аз ҳисоби натиҷаҳои гирифташуда чорабиниҳои техникӣ, яъне насби реактори ҷубронкунанда дар ибтидои хат, барои бартараф намудани ҳодисаҳои резонансӣ ва таъмини сифати энергияи электрикӣ кумак мерасонанд» [85].

Дар кори илмии [86] натиҷаҳои таҳлили гармоникаҳои тавоноиҳои фаъоли дар гиреҳҳои пайвастшавӣ ба шабакаи таъминкунандаи 220 кВ се борҳои ғайрихаттӣ (ба монанди корхонаи истеҳсоли алюминий, комбинати қоғазборӣ ва зеристгоҳи роҳи оҳан), ки тавоноии зиёд доранд, нишон дода шудааст. Одатан таҷҳизоти электрикии ин гуна корхонаҳо манбаи гармоникаҳои олӣ мебошанд. Таҳлил дар асосии натиҷаҳои ченкуниҳо иҷро карда шудааст. Мувофиқи ҷараёнҳо ва шиддатҳои ченкардашуда гармоникаҳои тавоноии фаъол аз 2-юм то 40-ум ҳисоб карда шудаанд. Дар натиҷаи таҳлили гармоникаҳои тавоноии фаъол нишон дода шудааст, ки самти ҷараёнҳои гармоникаҳои олӣ на фақат аз бори корхона ба шабакаи электрикӣ ва инчунин аз шабака ба бор равона шуда метавонанд. Самти ҷараёни гармоникаҳои олӣ асосан аз муқовимати умумии шабака дар гармоникаҳои муайян вобастагӣ дорад. Барои баҳодиҳии андозаи самти ҷараёни энергияи электрикӣ (дар гармоникаҳои олӣ), ки корхона ба шабака медиҳад ва ё аз шабака мегирад, лозим аст энергияи зарарноки гармоникаҳоро истифода бурд. Аз ин рӯ, қимати ТГОҶ бо воситаи ҳисобкунакҳои баркӣ ва ё асбобҳои махсус чен намудан зарур аст.

Дар кори илмии [87] усули муҳандисии пешгӯӣ намудани қиматҳои ҷараёнҳои асосӣ ва гармоникаҳои олиро дар шабакаҳои коммуналӣ – маишӣ дар асоси усулҳои эҳтимолию омории ҳисобкунии бор оварда шудааст.

Натиҷаҳои ҳисоб имкон медиҳанд, ки ҳангоми интихоби буриши ноқилҳо дар шабакаҳои биноҳои истиқоматӣ таркиби гармоникаҳои олии ҷараён ба назар гирифта шаванд. Айни замон, барои шабакаҳои биноҳои истиқоматӣ ва ҷамъиятӣ чунин ҳисобҳо ягона усули қобили қабул мебошад, зеро дар ин гуна шабакаҳо шумораи зиёди истеъмолкунандагони якфазаи электрикӣ вуҷуд доранд, ки реҷаҳои кории онҳо аз бисёр омилҳо вобаста мебошанд. Маълумоти ибтидоии (шумора ва миқдори қабулкунакҳои электрикӣ, зариби истифодабарӣ, талабот ва

пайвасткунӣ) дар формулаҳои овардашуда истифодашаванда ба осонӣ тафтиш ва ислоҳ карда мешаванд, ки ин ҳангоми баҳодиҳии эътимодноки натиҷаҳои ҳисоб барои як шаҳри муайян хеле муҳим мебошад.

Дар кори илмии [22] модели хати интиқоли барқи тағйирёбанда барои баҳодиҳии таъсири тоҷи электрикӣ ба сифати энергияи электрикӣ пешниҳод шудааст. Натиҷаҳои таҷриба дар хати интиқоли 500 кВ, инчунин муқоисаи онҳо бо натиҷаҳои моделсозии математикӣ оварда шудаанд. Нишон дода шудааст, ки таъсири тоҷи электрикӣ дар симҳои хатҳои баландшиддати интиқоли барқ ба СЭЭ вобаста ба ташкилдиҳандаҳои *n*-уми гармоникии шиддат ночиз аст. Натиҷаҳои таҳлил нишон доданд, ки дар таркиби ҷараёни тоҷи электрикӣ спектри гармоникаи 5-ум нисбат ба дигар гармоникаҳо зиёд буда, он ҳангоми таъсири безарядшавии тоҷ, ғунҷоиши эквивалентии фазаҳои хати интиқоли барқи таҳқиқшаванда тақрибан 9 % аз ғунҷоиши геометрӣ зиёдтар аст. Модели математикии пешниҳодшудаи хати интиқоли барқи ҳавоии 220 – 750 кВ имкон медиҳад, ки таъсири безарядшавии тоҷи электрикӣ дар симҳои хати интиқол ба сифати ЭЭ дар шабакаи электрикӣ баҳо дода шавад. Эътимоднокии модели пешниҳодшуда ба наздик будани натиҷаҳои таҷрибавӣ ва моделсозии математикӣ дар гармоникаи 3-юм тасдиқ карда мешавад. Аммо дар гармоникаҳои 5-ум ва 7-ум фарқияти назаррас байни натиҷаҳои моделсозӣ ва маълумоти таҷрибавӣ мушоҳида мешаванд. Дар асоси таҷрибавӣ ба қайд гирифта шудааст, ки таъсири тоҷи электрикӣ ба зарибҳои ташкилдиҳандаи гармоникии *n*-уми ҷараёни хати интиқол ва шиддат дар тахтасимҳои зеристгоҳҳо ночиз аст. Ин равандро инчунин натиҷаҳои ҳисобии модели математикии хати интиқол тасдиқ мекунад. Гармоникаҳои олии ҷараён, ки аз ҷониби хатҳои интиқоли барқи баландшиддат дар зери таъсири тоҷи электрикӣ ба вуҷуд меоянд, ҳатто дар зеристгоҳҳои калони системаи электроэнергетикӣ наметавонанд боиси таҳрифи назарраси шакли каҷхаттаи шиддат шаванд.

Ҳоло дар шабакаҳои электрикӣ ҳам ба резонанси мувозӣ (параллелӣ) ва ҳам ба пайдарпаӣ дар басомадҳои гармоникаҳои олӣ диққати махсус дода мешавад. Дар солҳои охир усули таҳлили модалӣ, ки дар асоси матритсаи

муқовимати гиреҳӣ ҳисоб карда мешавад, роҳи муфиди баҳодиҳии резонанси параллелиро нишон дод.

Дар мавриди резонанси пайдарпай бошад, дар мақолаи [88] усули нав пешниҳод шудааст, ки таҳлили модалиро бо усули шохаи сунъӣ муттаҳид мекунад. Дар ин усул барои ҳисоб кардани басомади резонанси пайдарпай ва маълумоти аниқ оид ба шохаҳо пешниҳод шудааст. Муайян шудааст, ки ҳангоми баҳодиҳии масъалаи резонанси пайдарпай бояд на матритсаи муқовимати гиреҳӣ, ки барои баҳодиҳии резонанси параллелӣ истифода бурда мешавад, балки матритсаи муқовимати контурӣ истифода шавад. Маълум аст, ки конфигуратсияи шабакаҳои электрикӣ доимо тағйир меёбад (иваз шудани шумораи шохаҳо дар шабакаҳо). Аз ин рӯ, пешниҳод шудааст, ки усули шохаи сунъӣ бояд ҳангоми таҳлил дохил карда шавад. Натиҷаҳои санҷиш ва татбиқи амалӣ, дурустӣ ва самаранокии ин усулро нишон медиҳанд, зеро нисбат ба усулҳои маъмулӣ маълумоти бештар дар бораи резонанси гармоникӣ дошта, барои санҷиши басомади резонанси филтрҳо низ истифода кардан мумкин аст.

Дар кори илмии [89] пешниҳод карда мешавад, ки таъсири дастгоҳҳои махсус, ки манбаи гармоникаҳои олӣ мебошанд, ба сифати энергияи электрикӣ аз рӯи саҳми нисбии ин дастгоҳҳо дар паст шудани нишондиҳандаҳои сифати энергияи электрикӣ ба инобат гирифта шавад. Натиҷаҳои ченкунии СЭЭ дар шабакаҳои амалкунандаи фаъоли 220 – 500 кВ ва баҳодиҳии таъсири реакторҳои шунтии идорашаванда (РШИ) ва компенсаторҳои статикӣ-тиристорӣ (КСТ) ба СЭЭ дар нуқтаҳои пайвастшавии онҳо ба шабакаи электрикӣ оварда шудаанд. Усули пешниҳодшуда имкон медиҳад, ки таъсири як манбаи лапиш ба сифати энергияи электрикӣ дар нуқтаи пайвастшавӣ ба шабакаи электрикӣ аз рӯи қиматҳои ченшудаи ҷараён ва шиддат дар нуқтаи пайвастшавии манбаъ баҳодиҳӣ шавад.

Саҳвияти натиҷаҳои ҳисобкунии шиддат дар басомади асосӣ аз 0,4 % шиддати ченшуда дар тахтасимҳои зеристгоҳ зиёд нест, ки ин имкон медиҳад дақиқияти баланди натиҷаҳо дар басомадҳои гармоникаҳои олӣ ба даст ояд.

Дастгоҳҳои реакторҳои шунтии идорашаванда ва компенсаторҳои статикӣ-тиристорӣ, ки барои кам кардани зарибҳои гармоникии тартиби 5-ум ва 7-уми шиддат истифода бурда мешаванд, боиси зиёд намудани гармоникии тартиби дигар мешаванд. Баҳодиҳии ташкилдиҳандаҳои гармоникаҳои олии шиддат баррасӣ нашудаанд, зеро онҳо дар спектрҳои шиддат, ки ҳангоми ченкунӣ ба даст оварда шудаанд, кам будаанд.

Дар кори илмии [14] алгоритме пешниҳод шудааст, ки он имконияти таҳлили ҳолатҳои эҳтимолии резонансро дар низоми таъминоти барқ медиҳад. Бо ёрии алгоритм ҳисобкунии параметрҳои гуногуни элементҳои НТБ, ба монанди муқовимати хатҳои интиқоли барқ, трансформаторҳо ва ғайра анҷом дода мешавад. Илова бар ин, ҳисобкунии параметрҳои реҷаи система, ба монанди ҷараён дар хатҳо, тавоноии бор, талафоти тавоноӣ дар элементҳои СТБ, инчунин муайян намудани басомадҳои резонансӣ ва сохтани тавсифи амплитудавӣ ва басомадии шабака низ иҷро мегардад. Алгоритм имкон медиҳад, ки чунин параметрҳо ҳангоми мавҷуд будани борҳои ғайрихаттӣ дар шабака таҳлил карда шаванд, ки онҳо метавонанд сабаби пайдоиши ҳолатҳои резонансӣ дар наздикии басомадҳои гармоникаҳои олии шабака гарданд. Дар натиҷаи ҳисобкунӣ вобастагиҳои графикӣ ноқилият ва муқовимати система (индуктивӣ, ғунҷоишӣ ва умумӣ) аз басомад барои ду реҷаи кори НЭТ ба даст оварда шудааст.

Дар таҳқиқи [90] оқибатҳои манфии таъсири гармоникаҳои олӣ ва резонанси ҷараёнҳо дар басомадҳое, ки ба басомадҳои гармоникаҳои олӣ наздиканд, дар НЭТ баррасӣ шудаанд. Илова бар ин, НЭТ**,** ки дорои қабулкунакҳои барқии хусусияти волт-амперии ғайрихаттист, мавриди таҳқиқ қарор дода шудааст. Ба сифати борҳои ғайрихаттӣ дар НЭТ ҳаракатоварҳои барқии идоракунандаи басомад истифода шудааст, ки дорои зарибии пасти тавоноии фаъол (cosφ) мебошанд**.** Барои баланд бардоштани cosφ дар шабака аз батареяи танзимшавандаи конденсаторҳои статикӣ (БТКС) истифода бурда шуд. Дар кор алгоритме пешниҳод шудааст, ки ҳамаи басомадҳои эҳтимолии резонансиро вобаста ба дараҷаи ҷуброни тавоноии ғайрифаъол (ҳангоми иваз

кардани зинаҳои БТКС) ҳангоми кори НЭТ дар реҷаи резонанси ҷараёнҳо ҳисоб мекунад. Ҳисоби басомадҳои резонанс дар ду маврид, яъне бо назардошт ва беназардошти муқовимати фаъоли элементҳои НЭТ анҷом дода шудааст. Дар асоси ҳисобҳо ҳамаи басомадҳои имконпазир, ки дар онҳо шарти резонанси ҷараёнҳо иҷро мегардад, муайян карда шудаанд. Ҳамчунин, бо роҳи ҳисобкунӣ саҳвияти муайянкунии басомади резонансӣ ҳангоми нодида гирифтани элементҳои фаъоли ноқилияти контур муайян карда шуд, ки он камтар аз 0,1 %-ро ташкил дод. Муайян кардани басомадҳои резонансӣ барои интихоб ва танзими филтрҳо зарур аст. Ин филтрҳо барои паст кардани сатҳи ҷараёнҳои гармоникаҳои олӣ дар шабака пешбинӣ шудаанд. Илова бар ин, муайян кардани басомадҳои эҳтимолии резонансӣ барои баҳодиҳии мақсаднокии истифодаи филтрҳои гармоникаҳо зарур аст.

Дар рисолаи [91] усули таҳлили гармоникаҳои олӣ дар шабакаҳои электрикии сарбасти мураккаби 110 кВ ва аз он боло, барои муайян кардани манбаъҳои асосии таҳриф оварда шудааст. Барои ҳар як гирехе, ки дар он ченкуниҳои нишондиҳандаҳои СЭЭ гузаронида шудаанд, пешниҳод мегардад, ки ҷараёнҳои эквивалентии гармоникаҳои олӣ ҳисоб карда шаванд. Ин ҷараёнҳо тавсифдиҳандаи манбаъҳои гармоникаҳои олӣ мебошанд, ки мустақиман ба гирехҳои додашуда пайваст шуда, шиддатеро ба вуҷуд меоранд, ки ба шиддати воқеии ченкардашудаи басомади муайян баробар мебошанд. Бо муқоисаи ҷараёнҳои эквивалентӣ барои гирехҳои гуногуни шабака пешниҳод карда мешавад, ки ҷойгиршавии манбаъҳои бузурги гармоникаҳои олӣ муайян карда шаванд. Натиҷаҳои тасдиқи усули пешниҳодшуда дар модели математикӣ ва натиҷаҳои ченкунии нишондиҳандаҳои СЭЭ дар шабакаҳои 110, 220 ва 500 кВ дар системаи энергетикии ҳақиқӣ оварда шудаанд. Усули мазкур метавонад мавқеи манбаи гармоникаҳои олии бузургро ба осонӣ муайян намояд.

Дар маводди илмии [92] имконияти ба вуҷуд омадани ҳодисаҳои резонанс дар шабакаҳои рӯшноидиҳӣ ҳангоми пайваст намудани чароғҳои светадиодӣ ва борҳои индуктивии беруна баррасӣ шудааст. Таҳлили кори чароғҳои светадиодӣ дар як корхонаи саноатӣ нишон дод, ки мавҷудияти борҳои берунаи фаъолу

индуктивӣ дар шабакаи рӯшноӣ ба тез вайрон шудани дастгоҳҳои рӯшноӣ, ҳатто ҳангоми ба меъёрҳои танзимкунандаи СЭЭ мувофиқ будани он, оварда мерасонад. Барои омузиши равандҳое, ки ҳангоми коммутатсия ба амал меоянд, алгоритми ҳисобкунии реҷаи кори шабакаи рӯшноидиҳӣ пешниҳод шудааст. Алгоритми мазкур имкон медиҳад, ки реҷаи кори шабакаи рӯшноидиҳиро пеш аз ва баъд аз пайваст кардани борҳои беруна ҳисоб кунад. Барои чароғҳои светадиодӣ осциллограммаҳои ҷараён ва шиддат гирифта мешавад ва дар асоси он тавсифи волт-амперии чароғҳои светадиодиро ба даст овардан мумкин аст. Бо назардошти ТВА, тағйироти каҷхаттаи ҷараёни чароғҳо пеш аз ва баъд аз пайваст кардани бори берунаи индуктивӣ таҳлил карда мешавад. Мавҷудияти кандашавӣ дар каҷхаттаи ҷараён ҳангоми коммутатсия нишон дод, ки раванди гузариш метавонад хусусияти резонансӣ дошта бошад ва ба тез вайрон шудани чароғҳо оварда расонад. Дар натиҷаи таҳқиқ имконияти ба вуҷуд омадани ҳодисаҳои резонансӣ дар шабакаҳои дорои чароғҳои светодиодӣ хулосаҳои зерин бароварда шуданд: таҷрибаи истифодаи чароғҳои светодиодӣ дар корхонаҳои саноатӣ нишон медиҳад, ки ҳангоми ба таври параллелӣ ба кор андохтани борҳои индуктивии маишӣ бо чароғҳои светодиодии тавоноиашон калон ба мунтазам аз кор баромадани чароғҳо оварда мерасонад. Таҳлили нишондиҳандаҳои СЭЭ дар чунин шабака нишон дод, ки сабаби вайроншавии чароғҳо танҳо ҳодисаҳои резонансӣ дар лаҳзаҳои коммутатсия шуда метавонанд. Барои аз байн бурдани ҳодисаҳои резонансӣ ва пеш аз муҳлат аз кор набаромадани чароғҳо, истифодаи схемаи таъминоти мустақил пешниҳод карда мешавад, ки дар он шабакаҳои электрикии рӯшноидиҳӣ аз дигар истеъмолкунандагон ҷудо карда мешаванд.

Дар таҳқиқот гармоникаҳои олии ҷараёнҳои магнитии трансформаторҳои пасткунанда, ки дорои магнитопроводи ғайрисимметрӣ мебошанд, [93] усули аналитикии ҳисобкунии векторҳои сефазаи гармоникаҳои олии ҷараёнҳои магнитӣ ва ташкилдиҳандаҳои симметрии онҳо пешниҳод шудааст. Саҳеҳии усул бо маълумоти таҷрибавӣ тасдиқ карда шуда, метавонад барои ҳисоб кардани реҷаҳои ғайрисинусоидалии НЭТ истифода шаванд.

Муаллифи кори илмии [94] алгоритмҳои истифодаи усули тавозуни гармоникиро барои сохтани барномаи ҳисобкунии реҷаҳои ғайрисинусоидалӣ ва ғайрисимметрӣ дар НЭТ бо конфигуратсияи дилхоҳ ва элементҳои маъмултарини бори ғайрихаттӣ (табдилдиҳандаҳои идорашаванда, шунтҳои магнитнокшудаи трасформаторҳо ва ғайраҳо) баён карда аст. Инчунин масъалаҳои истифода аз барномавии таҳияшудаи самарабахшро низ, баррасӣ кардааст.

Хусусияти системаҳои муосири таъмини энергияи электрикӣ дар он аст, ки онҳо миқдори зиёди таҷҳизоти электрикӣ доранд, ки ҷараёни ғайрисинусоидӣ истеъмол мекунанд. Намунаҳои ин гуна таҷҳизот инвертерҳои басомад ё росткунакҳои тавоноии калон мебошанд. Азбаски дар НЭТ элементҳои индуктивӣ ва ғунҷоишӣ мавҷуд ҳаст, пас дар ин гуна шабакаҳо эҳтимолияти ба вуҷуд омадани резонанс ҷой дорад.

Дар таҳқиқи [95] модели омузишии НЭТ ҳангоми дар он мавҷуд будани росткунакҳои электрикӣ дар барномаи MATLAB/Simulink таҳия карда шуд. Натиҷаҳои моделсозӣ нишон медиҳанд, ки дар НЭТ ҳодисаи резонанс ба амал омада, рақами гармоника, ки дар он резонанс ба вуҷуд меояд, аз дарозии хати интиқол вобаста аст. Дар ин ҳолат, нишондиҳандаҳои гармоникаи ҷараён ва шиддат дар аввал ва охири хат қиматҳои гуногун доранд. Ҳангоми резонанс гармоникаи максималии ҷараён тавассути манбаъ гардиш мекунад ва дар охири хат гармоникаи ҷараён қимати минималӣ дорад, аммо шиддат дар ҳамин гармоника қимати калонро соҳиб мешавад.

Таҳлили устувории резонанс дар шабакаи электрикӣ яке аз масъалаҳои мубрами системаҳои электроэнегетикӣ мебошад. Кори [96] маҳз ба ҳамин масъала бахшида шудааст. Бо истифода аз ин усули дар он пешниҳодшуда лаппишҳои мураккаб, ки дар системаи энергетикӣ мавҷуданд, метавонанд бо ёрии назарияи хуб таҳияшудаи математикии занҷирҳои хаттӣ таҳлил карда шаванд. Ин ба таҳлили устуворii резонансии шабакаи электрикӣ дар асоси матритсаи ноқилияти гиреҳии $Y(s)$ дар соҳаи s равона шудааст. Барои шабакаи электрикӣ мутобиқати қиматҳои хоси он ва нуқтаҳои сифрии $Y(s)$ аввал

тавассути таҳлили назариявӣ ва тасдиқи ҳолати махсус санҷида шудааст. Баъдан, барои таҳлили устувории резонансии шабакаи электрикӣ усули системавӣ пешниҳод карда шуд. Тавассути ин усул аввал резонанс дар асоси муодилаи шиддати гирехӣ ва матритсаи элементҳои шабакаи электрикӣ муайян карда мешавад. Сипас, ҷузъҳои асосии марбут ба реҷаи резонанс бо таҳлили ҳассосияти реҷа муайян карда мешаванд.

Федосов Д.С. пешниҳод кардааст, ки «барои ҳисоб намудани параметрҳои низоми электротаъминкунӣ, ҳангоми реҷаи ғайрисинусоидалӣ, усули шиддатҳои гирехӣ истифода бурда мешавад. Ҳангоми истифодаи усули мазкур барои тартиб додани нақшаи бадалии шабакаҳои электрикӣ дар реҷаи ғайрисинусоидалӣ вобастагӣ аз басомадро ба назар гирифтан лозим аст. Аз ин рӯ, амсилаи ҳисоби низоми электротаъминкунӣ ҳангоми реҷаи ғайрисинусоидалӣ дар барномаи комплексии Matlab/Simulink коркард карда шудааст. Саҳеҳи модел дар асоси ҳисоби реҷаи ғайрисинусоидалӣ бо усулҳои маъмул санҷида шуданд. Натиҷаҳои санҷиш аз дақиқияти модел дарак медиҳад. Дар асоси модели коркардшуда пайдошавии резонанси гармоникаҳои олӣ дар нуқтаҳои гуногуни хати интиқоли барқ нисбат ба муқовимати система дида баромада шудааст. Муайян карда шудааст, ки тағйирёбии конфигуратсия ё параметрҳои шабакаҳои электрикӣ боиси зиёдшавии шиддат ва ҷараёни гармоникаи олӣ гардад» [97].

Дар кори илмии Ошепков В.А. оварда шудааст, ки «реҷаҳои ғайрисинусоидалии СЭ бо усули потенсиали гирехӣ, ҳангоми мавҷуд будани манбаъҳои гармоникаи олӣ дар он ҳисоб карда шудааст ва басомадҳое, ки дар онҳо резонанс ба вуҷуд омада метавонанд, бояд муайян карда шаванд. Ченкунии нишондиҳандаҳои сифати энергияи электрикии тавсифдиҳандаи шакли каҷхаттаи шиддат ва ҷараён мебошанд, бо истифода аз асбобҳои ченкунанда гузаронида шудааст. Дар асоси муқоисаи натиҷаҳои ҳисоб ва дараҷаи воқеии гармоникаи олӣ дар шабакаҳои электрикӣ қарори аз ҷиҳати техникӣ асосан гузоштани дастгоҳҳои ҷубронкунандаи филтр барои кам кардани гармоникаи олӣ ва пешгирӣ кардани ҳолатҳои садама пешниҳод карда шудааст» [98].

Олими рус Осипов Д.С. қайд менамояд, ки «сифати энергияи электрикӣ аз ҷойгиршавии батареяҳои конденсаторҳои статикӣ (БКС) дар гиреҳҳои НЭТ вобастагии зич дорад. Ҳангоми дар НЭТ мавҷуд будани бори ғайрихаттӣ ва БКС боиси аз ҳад зиёд шудани ҷараён мешавад. Ин ҳодиса ба вуҷуд доштани ҳодисаи резонанс дар ягон басомад дар шабакаҳои электрикӣ рабт дошта метавонад. Табиист, ки дар сурати мавҷуд будани гармоникаи олӣ дар НЭТ ҳолати резонансӣ метавонад дар басомадҳои наздик ба басомадҳои як ё якчанд гармоникаи олие, ки дар НЭТ мавҷуданд, рух диҳад. Резонанс вақте пайдо шавад, ки ноқилиятҳои индуктивии шабака ва ғунҷоишии БКС дар ягон басомад ба ҳам баробар шаванд. Дар ин ҳолат резонанси ҷараён ба вуҷуд меояд ва боиси зиёд шудани ҷараёни умумӣ мегардад ва он ба кори таҷҳизоти электрикӣ, аз ҷумла БКС таъсири манфӣ мерасонад ва боиси аз ҳад зиёд гарм шудан ва барвақт аз кор баромадани онҳо мегардад» [99].

Дар мақолаи дигараш Осипов Д.С. иброз медорад, ки «барои ҳолатҳои резонансӣ дар шабакаҳои электрикии корхонаҳои саноатӣ ва борҳои ғайрихаттӣ бахшида шудааст ва муаллифон роҳҳои ошкор кардани чунин ҳолатҳоро баррасӣ мекунанду ба омилҳое, ки метавонанд ҳолатҳои резонансиро ба вуҷуд оваранд, таваҷҷуҳ мекунанд. Дар мақола инчунин таъсири фузуншиддатӣ аз ҳисоби резонанс ба элементҳои сохтории мошинҳои электрикӣ ва роҳҳои техникии барои ташхиси пурраи онҳо пешниҳод шудааст» [100].

Коваленко Д.В. низ оид ба таъсири шароити резонансӣ ба шиддати ғайрисинусоидалӣ дар шабакаҳои электрикӣ ва ба мушкилоти таъсири гармоникҳои олӣ ва резонанси онҳо дар шабакаи электрикӣ-маишӣ андешаашро баён кардааст. Муаллиф таҳқиқоти муҳимро дар бораи «аниқ кардани сабабҳои пайдоиши резонансҳои гармоникҳои баланд, ки бештар дар коркарди системаи таъмини тавоноии реактивӣ ва таҷҳизоти электрикӣ рух медиҳанд, пешниҳод мекунад. Инчунин ба муҳиммияти таҳқиқоти минбаъда ва таҳияи тавсияҳои техникӣ барои пешгирии натиҷаҳои манфии резонансҳои гармоникӣ дар шабакаи электрикии маишӣ ва ба фаъолияти дурусту бехатарии таҷҳизоти электрикӣ ишора мекунад. Ҳангоми дар НЭТ мавҷуд будани тавоноии реактивӣ,

таъсири резонансӣ метавонад ба пастшавии сифати энергияи электрикӣ, гармшавӣ ва зарар ба таҷҳизоти электрикӣ оварда расонад» [101].

Силкин Д,А кори илмиашро ба таҳқиқи яке аз масъалаҳои муҳим дар СЭ, ки борҳои кашиши нақлиёт (масалан, роҳи оҳан) истифода мешаванд, бахшидааст. Ӯ қайд мекунад, ки «барои таҳлили таъсири ин резонансҳо ва омилҳои мутақобили параметрҳои шабака, модели таҳлилии НЭТ бо бори кашиш (роҳи оҳан) дар барномаи Matlab/Simulink сохта шудааст. Таҳқиқот нишон дод, ки сабаби аслии саҳвият дар шиддат ва ҷараёнҳои системаҳои таъминоти барқ бо борҳои кашиш ин ҷараёнҳои ғайрисинусоидалӣ ва реҷаи резонансии шабакаи кашиш мебошад. Ҳангоми паст шудани тавоноии расиши кӯтоҳи шабакаи беруна резонанс ба басомадҳои паст ба вуҷуд меояд, ки дар натиҷа амплитудаи гармоникаҳои олии шиддат ва ҷараён баланд мешаванд» [102].

Мақолаи Шандригин Д.А. ва дигарон ба таҳқиқи ҳолатҳои резонансӣ дар гармоникаҳои олӣ дар шабакаҳои барқии калон бахшида шудааст. Муаллифон усули нави муайян кардани гиреҳҳоеро пешниҳод мекунанд, ки «дар онҳо эҳтимолияти ҳолатҳои резонансӣ дар гармоникаҳои олӣ вуҷуд доранд. Дар усули пешниҳодшуда барои баҳодиҳии ҳолати резонансӣ дар шабака тавоноиҳои фаъол ва ғайрифаъоли таҳрифии гармоникаҳои олӣ пешниҳод карда шудааст. Муаллифон усули пешниҳодшудаи худро дар шабакаҳои Сибири Шарқӣ санҷидаанд. Ҳисобҳо нишон доданд, ки реҷаҳои резонансӣ аксар вақт дар якчанд гармоникаҳо якбора пайдо мешаванд ва ба минтақаҳои гуногуни шабака таъсир мерасонанд. Усули пешниҳодшуда имкон медиҳад, ки басомадҳои резонансӣ дақиқ муайян шаванд ва барои пешгирӣ кардани чунин реҷаҳо чораҳои зарурӣ андешида шаванд» [11].

Дар мақолаи [1-М] оид ба омилҳои асосии зуҳуроти резонанс дар шабакаҳои электрикӣ сухан рафта, дар он нақшаи 5 - гиреҳи IEEE дар барномаи Etap амсиласозӣ карда шуда, тавсифи амплитудавӣ-басомадии он дар реҷаҳои гуногун таҳқиқ карда шудааст. Барои дуруст баҳо додани ҳодисаи резонанс дар шабакаҳо вобастагии байни муқовимати гиреҳ дар басомади резонансӣ ва дар

басомади асосӣ ҳамчун зариби бавуҷудоии резонанс дар гармоникаи *n* - ум қабул шудааст. Дар асоси натиҷаҳои ҳисоб ҷадвали муайян намудани ба вуҷуд омадани зуҳуроти резонанс дар нақшаи электрикии таҳқиқшаванда тартиб дода шудааст.

Таҳқиқоти мазкур гузаришро аз баҳодиҳии сифатии резонанс ба таҳлили системавии математикӣ нишон медиҳад, ки аз чунин воситаҳо, ба монанди таҳлили ҳассосият ва комплексҳои барномавии муосир (ETAP) истифода мебарад.

Натиҷаҳои муқоисаи усулҳои таҳлили ҳодисаҳои резонансӣ дар шабакаҳои электрикӣ дар ҷадвали 2.1 оварда шудаанд.

Ҷадвали 2.1. – Усулҳои муайянкунӣ ва таҳлили реҷаҳои ғайрисинусоидалӣ

Номи муаллифон	Усули истифодашаванда	Истифодаи барномаҳо	Хулосаи (тавсияи) муаллифон
Коваленко Д.В.	Усули шиддатҳои гирехӣ	-	Насби филтрҳои ҷубронкунанда
Тугунсев С.Г.	Усули шиддатҳои гирехӣ	«Барномаи ҳисоби реҷаҳои ғайрисимметрӣ ва ғайрисинусоидалӣ» дар барномаи Microsoft Excel	Насби дастгоҳҳои реактори ҷубронкунанда
Коверникова Л.И.	Усули шиддатҳои гирехӣ	-	Ҳисобкунакҳои барқӣ ва асбобҳои ченкунанда
Асанов А.К.	-	-	Насби филтрҳо
Шаров Ю.В.	Усули матритсаи муқовимати гирехӣ	MATLAB/Simulink -	-
Hui Zhou	Усули шохаи сунъӣ	-	Насби филтрҳо
Карташев И.И.,	Усули шиддатҳои гирехӣ	-	Реакторҳои шунтии идорашаванда ва компенсаторҳои статикӣ-тиристорӣ
Осипов Д.С.	-	-	Насби филтрҳо
Коваленко Д.В.	-	-	Насби филтрҳои ҷубронкунанда
Валиуллин К.Р.	Усули шиддатҳои гирехӣ	MATLAB/Simulink	-
Кучумов Л.А.	-	-	Насби шунтҳои идорашаванда
Svetlana Molot	-	MATLAB/Simulink	-
Zheng Xu	Матритсаи ноқилияти гирехҳо	-	Насби филтрҳо

Усулҳои муосири ҳисоби реҷаҳои ғайрисинусоидалӣ (РҒС) нисбат ба равишҳои классикии охири солҳои 90-ум хеле ташаккул ёфтаанд. Имрӯз таваҷҷуҳи асосӣ аз ҳисобҳои одии зариби гармоникаҳо (K_U, $K_{U(n)}$, K_I и $K_{I(n)}$) ба моделсозии комплексӣ таъсири мутақобилаи борҳои ғайрихаттӣ бо филтрҳои фаъол равона карда шудааст.

Усулҳои асосие, ки дар амалияи муосир ва корҳои таҳқиқотӣ барои ҳисоби реҷаҳои ғайрисинусоидалӣ истифода мешаванд, аз инҳо иборатанд:

1. *Усули мувозинати гармоникӣ* – ин усули гибридие мебошад, ки ҳисобҳоро дар соҳаҳои вақтӣ ва басомадӣ бо ҳам пайваст мекунад. Моҳияти усул аз он иборат аст, ки системаи муодилаҳо ба қисми хаттӣ (шабака) ва ғайрихаттӣ (борҳо) тақсим карда мешавад. Барои қисми хаттӣ тавсифҳои басомадӣ ва барои қисми ғайрихаттӣ қиматҳои лаҳзавӣ истифода мешаванд. Усули мазкур барои таҳлили реҷаҳои барқароршуда (РБ) дар шабакаҳое, ки дар онҳо миқдори зиёди борҳои ғайрихаттӣ, ба монанди электроникаи қуввагӣ, инверторҳо, росткунандаҳо ва ғайра вуҷуд доранд, комилан мувофиқ аст.

2. *Моделсозии динамикӣ дар соҳаи вақтӣ,* ки асосан воситаи чунин барномаҳо, ба монанди MATLAB/Simulink, PSCAD/EMTDC, ETAP ва ғайра амалӣ карда мешавад. Моҳияти ин усул аз ҳалли муодилаҳои дифференсиалии система бо қадами хурди итератсионӣ иборат аст. Бартарии ин усул аз он иборат аст, ки вай имкон медиҳад равандҳои гузаришро, ки ҳангоми коммутатсияи истеъмолкунандагони пуриқтидор ё ҳангоми кори системаҳои идоракунии инверторҳои неругоҳҳои офтобӣ ва шамолӣ ба вуҷуд меоянд, ба назар гирад. Ин усул барои баҳодиҳии ҳодисаҳои резонансӣ дақиқтар мебошад.

3. *Усули тавсифҳои басомадӣ* – ин усули аҳамияти калондошта барои дарёфти нуқтаҳои резонанси мувозӣ (параллелӣ) ва пайдарпай мебошад. Дар шароити муосир, ки дар шабакаҳо миқдори зиёди элементҳои ғунҷоишӣ (ХИБ, кабелҳо, филтрҳо, БКС ва ғайра) мушоҳида мешавад, сканеркунии басомадҳо имкон медиҳад, ки хавфи пурзӯршавии гармоникаҳо дар басомадҳои муайян

пешакӣ ошкор карда шавад. Моҳияти усул аз муайян кардани вобастагии муқовимати воридотии шабака ($Z_{ш}$) аз басомад иборат аст.

4. *Табдилдиҳии вейвлетӣ* – тафовути табдилдиҳии классикии Фуре имкон медиҳад, ки реҷаҳои ғайристатсионарии ғайрисинусоидалии вобаста ба вақт тағйирёбанда таҳлил карда шаванд. Бартарии ин усул дар он аст, ки борҳои ғайрихаттии муосир, аз қабили печҳои пӯлодгудозии камонӣ, зарядкунии динамикии электромобилҳо ва дигар манбаъҳои ТГОҶ ба вуҷуд меоранд, ки ташкилкунандаҳои онҳо бо мурури вақт тағйир меёбанд. Вейвлетҳо имконият медиҳанд, ки вақти пайдоиши дилхоҳ гармоника муайян карда шавад.

5. *Усулҳо дар асоси интеллекти сунъӣ ва омузиши мошинӣ* – ин усулҳо муосиртарин ва ояндадортарин усул дар электроэнергетика ба ҳисоб меравад. Бартарии аслии ин усулҳо дар он аст, ки барои тақрибан муайянкунии тавсифҳои борҳои ғайрихаттӣ на амсилаи мураккаби математикӣ, балки шабакаҳои нейронии сунъӣ барои беҳинсозии (оптимизатсияи) ҷойгиркунӣ ва параметрҳои дастгоҳҳои филтру компенсаторӣ (ДФК) истифода мешаванд. Онҳо имкон медиҳанд, ки чунин параметрҳои афзалиятноки филтрҳо муайян карда шаванд, ки талафот ва зарибҳои K_U, $K_{U(n)}$, K_I ва $K_{I(n)}$-ро ҳангоми хароҷоти минималӣ таъмин месозанд.

Бар пояи таҳлили статистикии реҷаҳои ГО мувофиқати зарибҳои K_U ва $K_{U(n)}$, ба ҳуҷҷатҳои меъёрӣ муайян карда мешавад. Баъди муқоисаи қиматҳои K_U ва $K_{U(n)}$, бо ҳуҷҷатҳои меъёрӣ вобаста ба сохтори шабака ва истеъмолкунандагони ба он пайвастшуда, тадбирҳо оид ба муътадилгардонии реҷа муайян карда мешаванд. Таҳлили фазоӣ (маконӣ) хусусиятҳои маҷмуи додашудаи гиреҳҳоро фаро мегирад, дар ҳоле ки таҳлили локалӣ хусусиятҳои як гиреҳро дар бар мегирад. Таҳлили маконӣ ба савол оид ба таъсири сохтори шабака ва коммутатсияҳо дар он ба реҷаҳои гармоникаҳои олӣ маҷмуи гиреҳҳо посух медиҳад. Таҳлили реҷаи як гиреҳ ба баҳодиҳии таъсири мутақобилаи шабака ва бор дар ин гиреҳ ва баҳодиҳии тавоноии филтрҳо ҷиҳати муътадилгардонии реҷаи ин гиреҳ нигаронида шудааст.

Истифодаи таҳлили гармоникӣ барои таҳқиқ ва муътадилгардонии реҷаҳои шабакаҳо бо борҳои ғайрихаттӣ. Ҳангоми коркарди усули таҳлили реҷаҳои гармоникаҳои олӣ қабул карда шудааст, ки ҳисоби реҷа бо бори ғайрихаттӣ дар қиматҳои лаҳзавӣ бо ҳисоби реҷаҳо дар қиматҳои амалкунанда барои нақшаҳои хаттӣ ва ҳар кадом аз гармоникаҳои муҳим иваз карда мешавад. Дар чунин ҳисобкунӣ борҳои ғайрихаттӣ бо манбаъҳои ҷараён моделсозӣ карда мешаванд. Усули мазкури моделсозии реҷаҳои гармоникаҳои олӣ дар шабакаҳои электрикӣ ҳам дар Иттиҳоди давлатҳои мустақил ва ҳам дар хориҷа эътирофи умумӣ пайдо кардааст [3, 8, 103]. Ин бо он асоснок карда мешавад, ки кунҷҳои коммутатсия, ки таъсири шабакаро ба қиматҳои гармоникаҳои олии росткунандаҳо нишон медиҳанд, асосан тавассути муқовимати трансформаторҳои росткунанда муайян карда мешаванд. Ҷараёнҳои гармоникаҳои олӣ бори ғайрихаттиро ҳангоми зарурат метавон бо истифода аз ифодаҳои дар [8] овардашуда ё усули баланси гармоникӣ [93] аниқ карда шаванд. Зарурати дақиққунии ҷараёнҳои гармоникаҳои олӣ ҳангоми пайваст кардани филтрҳои резонансӣ дар шиддати 10,5 кВ барои борҳои росткунандаи заводҳои алюминий ва дар шиддати 27,5 кВ барои бори кашиши роҳҳои оҳан ба миён меояд.

Усули таҳлили реҷаҳои гиреҳҳо бо истифода аз дуқутбаҳои фаъол. Таҳлил ба баҳодиҳии шиддати гармоникаҳои олии гиреҳҳо ҳамчун натиҷаи таъсири мутақобилаи бории гиреҳ ва шабака нигаронида шудааст. Ҳангоми таҳлили гиреҳ таъсири мутақобилаи истеъмолкунандагони гиреҳ бо шабака ва ҳиссаи онҳо дар реҷаҳои гармоникаҳои олӣ мавриди таҳқиқ қарор мегирад [61].

Таҳлили реҷаҳои гармоникаҳои олӣ дар шабакаи электрикии дилхоҳ мавриди таҳқиқ инҳоро дар бар мегирад:

– санҷиши мувофиқати бузургии шиддатҳои гармоникаҳои олӣ ба қиматҳои ҷоизӣ;

– асосноккунии сатҳҳои мушоҳидашавандаи шиддати гармоникаҳои олӣ дар гиреҳҳои шабакаи мавриди таҳқиқбуда тавассути муайян кардани

вобастагии шиддатҳои гармоникаҳои олӣ дар гиреҳҳои шабакаи электрикӣ аз параметрҳои шабака ва параметрҳои реҷаи борҳои таҳрифкунанда;

– асосноккунии қарорҳо ҷиҳати муътадилгардонии зариби таҳрифи шакли каҷхаттаи синусоидолии шиддат K_U ва зарибҳои тартиби n-уми гармоникии шиддат $K_{U(n)}$ дар гиреҳҳои минтақаи мавриди таҳқиқи шабака.

Барои таҳлили реҷаи гармоникаи n-уми гиреҳи i пешниҳод мегардад, ки гиреҳи шабака тавассути дуқутбаи фаъол мувофиқи расми 2.1a истифода карда шавад. Дуқутба аз манбаи ҷараёни $I_{i(n)}$ ва ноқилияти $Y_{i(n)}$, ки дорои ноқилияти фаъоли $g_{i(n)}$ ва ғайрифаъолии $b_{i(n)}$ мебошад, иборат буда, онҳо ба таври параллелӣ пайваст карда шудаанд.

$$\dot{Y}_{\text{бр}i(n)} = g_{\text{бр}i(n)} + jb_{\text{бр}i(n)}.$$

Ҳангоми чунин тавассути дуқутба нишон додани гиреҳ шиддати гармоникаи олӣ дар гиреҳ натиҷаи ҷараёни гармоникаи олии $I_{Gi(n)}$ тавассути манбаи ҷараён ва ҷоришавии ҷараёнҳои гармоникаи олии $I_{Yi(n)}$ ба воситаи ноқилияти гиреҳи $Y_{i(n)}$ мебошад.

Агар бузургии муътадили ҷоизии зариби гармоникаи $K_{U0(n)}$ маълум бошад, он гоҳ бузургии ҷоизии ҷараёни даромади гармоника барои гиреҳ бо ёрии ифодаи зерин муайян карда мешавад:

$$I_{i0(n)} = K_{U0(n)} \cdot U_{(1)} \cdot Y_{\text{бр}i(n)}.$$

Ба ибораи дигар, $I_{i0(n)}$ бузургии ҷоизии ҷараёни гармоникаҳои олии сербориҳои ғайрихаттии гиреҳи i-умро ифода мекунад, ки дар он зариби шиддати гармоникаҳои олӣ аз қимати ҷоизӣ зиёд нахоҳад шуд.

Қимати $I_{Gi(n)}$ ҳосилшавии ҷараёни гармоникаҳои олиро аз ҷониби борҳои ғайрихаттӣ ба гиреҳи i ифода менамояд, аломати $Y_{i(n)}$ бошад – қобилияти шабакаро дар қабули ҷараёнҳо аз борҳои ғайрихаттӣ нишон медиҳад. Азбаски борҳои шабака ва реҷаи кории он ба тағйирёбиҳои пайваста дучор мегарданд, $I_{Gi(n)}$ ва $Y_{i(n)}$ низ мунтазам тағйир меёбанд. Бузургии $I_{Gi(n)}$ натиҷаи фаъолияти

якҷояи шумораи зиёди борҳои ғайрихаттии шабака мебошад ва аз ин рӯ, ҷиҳати муайян кардани борҳои аҳамияти асосии дошта, баҳодиҳии саҳми ҳар кадоме аз онҳо зарур аст. Табдилёбии сохтори шабака ва равандҳои коммутатсионӣ ба бузургии ноқилиятҳои он таъсири зиёд мерасонанд. Барои ноқилиятҳои эквивалентии гирехҳо рух додани ҳодисаҳои резонансӣ ва тағйирёбии зиёди ноқилиятҳо ҳангоми дигар шудани басомад хос мебошад.

Тавоноии аксарияти борҳои ғайрихаттӣ ба тағйирёбиҳои босуръат ва назаррас дучор мегардад, аз ин рӯ, бузургии $I_{Gi(n)}$ – стохастикӣ мебошад.

Ҳангоми ифодаи гирех тавассути дуқутбаи фаъол шиддати гирех натиҷаи ду раванд аст: ҳосилшавии ҷараёнҳои гармоникаҳои олӣ аз ҷониби борҳои ғайрихаттӣ дар гирех ва ҷоришавии ҷараёнҳо аз ноқилияти гирех. Зарурати муқоисаи равандҳое ба миён меояд, ки барои ин онҳо бояд бо як воҳиди бузургӣ чен карда шаванд. Бо ин мақсад метавон тавоноии таҳрифиро, ки аз таъсири мутақобилаи шиддати гармоникаи асосӣ бо ҷараёни гармоникаҳои олӣ ба вуҷуд меояд, истифода намудан мумкин аст.

2.2 Вобастагии зариби тартиби *n*-уми гармоникаи олии шиддат аз тавоноиҳои таҳрифӣ

Агар шабакаи электрикиро дар намуди дуқутбаи фаъол қабул намоем (расми 2.1*а*), он гоҳ ТГОШ-и тартиби *n*-ум барои гирехи дилхоҳи *i*-умро метавон ба таври зерин муайян кард:

$$\dot{U}_{i(n)} = \frac{I_{Gi(n)}}{\dot{Y}_{\text{бр}i(n)}}.$$

Дар ин ҳолат, зариби $K_{U(n)}$ баробар аст ба:

$$K_{U(n)} = \frac{100 \cdot U_{i(n)}}{U_{i(1)}} = \frac{\left|\dot{I}_{Gi(n)}\right|}{0,01 \cdot U_{i(1)} \cdot \left|\dot{Y}_{i(n)}\right|} \cdot \frac{U_{i(1)}}{U_{i(1)}} = \frac{\left|\dot{D}_{Gi(n)}\right|}{\left|\dot{D}_{Y(n)}\right|}, \qquad (2.1)$$

Барои иҷрои шарти $K_{Ui(n)} \le K_{U\text{чоиз.}(n)}$ бояд талаботи зерин амалӣ карда шаванд:

$$\left|\dot{D}_{Gi(n)}\right| \le \left|K_{U\text{чоиз.}(n)} \cdot \dot{D}_{Y(n)}\right|,$$
$$\left|\dot{D}_{Gi(n)}\right| \le \left|\dot{D}_{Y\text{чоиз.}(n)}\right|. \qquad (2.2)$$

Захираи тавоноии таҳрифии гиреҳ мувофиқи бузургии ҷоизии тавоноии таҳрифӣ (БҶТТ) баробар мешаванд:

$$\dot{D}_{YPi(n)} = \left|\dot{D}_{Y\text{чоиз.}(n)}\right| - \left|\dot{D}_{Gi(n)}\right|. \qquad (2.3)$$

Мувофиқи (2.3) захира аз рӯи БҶТТ ба зиёдшавии эҳтимолии ҳосилшавии тавоноии таҳрифӣ (ҲТТ) аз борҳои ғайрихаттӣ ҳангоми риояи шарти $K_{Ui(n)} \le K_{U0(n)}$ мутобиқат мекунад.

Смирнов С.С. дар монографияаш қайд кардааст, ки «истифодаи тавоноии таҳрифии ҳосилшуда (ТТҲ) ва тавоноии таҳрифии воридотии ҷоизӣ (ТТВҶ) имкон медиҳад, ки равандҳои ҳосилшавии тавоноии таҳрифӣ аз ҷониби борҳои ғайрихаттӣ бо қобилияти шабака оид ба қабул намудани тавоноии таҳрифӣ муқоиса карда шаванд, зеро онҳо бо воҳидҳои якхелаи ченкунӣ истифода мешаванд. ТТВҶ зариби ҷоизии гармоникаро ба назар мегирад. Барои коҳиш додани қимати $K_{U(n)}$ ҳам аз ҳисоби кам кардани ТТҲ ва ҳам аз ҳисоби зиёд намудани ТТВҶ амалӣ намудан мумкин аст. Сабаби афзоиши $K_{U(n)}$ аз меъёри ҷоизӣ метавонад на танҳо қиматҳои бузурги ТТҲ, балки қиматҳои хурди ТТВҶ низ бошад» [10, с. 28].

Агар ба гиреҳи дилхоҳи i якчанд борҳои ғайрихаттӣ пайваст карда шуда бошанд, он гоҳ ҲТТ-и ин гиреҳ ҳамчун натиҷаи ҷамъбасти тавоноиҳои таҳрифӣ аз ҳамаи борҳои ғайрихаттии шабака, ки ба гиреҳҳои j пайваст мебошанд, муайян карда мешавад:

$$\dot{D}_{Gi(n)} = \sum_{j=1}^{m} \dot{D}_{Gij(n)}, \qquad (2.4)$$

дар ин ҷо: $D_{Gij(n)}$ – ҳосилшавии тавоноии таҳрифии бории ғайрихаттии гиреҳи j дар гиреҳи i мебошад.

Ҷамъбасти ҳосилшавиҳо мувофиқи параметрҳои тақсимоти қиматҳои комплексӣ ва тасодуфии ҳосилшавӣ аз борҳои ғайрихаттӣ амалӣ мегардад.

Ҳамин тавр, бузургии саҳми бори ғайрихаттие, ки дар гиреҳи *j* пайваст шудааст, ба зариби $K_{U(n)}$ аз рӯи формулаи зерин муайян карда мешавад:

$$K_{Uij(n)} = \frac{D_{Gij(n)}}{\left|\dot{D}_{Y(n)}\right|}. \qquad (2.5)$$

2.3 Барномаҳои муосир барои таҳлили реҷаҳои ғайрисинусоидалӣ дар шабакаҳои электрикӣ

Муҳаққиқ Ҷӯразода Ш.Ҷ. дар диссертатсияаш қайд менамояд; ки «системаҳои электроэнергетикӣ аз шумораи зиёди элементҳои мутақобилан таъсиркунанда ва алоқаманд иборат буда, дорои алоқаҳои амиқи дохилӣ ва берунӣ мебошанд. Аз ин нуқтаи назар, ҳангоми омузиши реҷаҳои чунин системаҳо онҳоро ба қисмҳои мустақил ҷудо намудан ва параметрҳои мавриди баррасиро дар алоҳидагӣ тағйир додан мумкин нест. Бинобар ин, барои таҳлили реҷаҳои таҳрифкунандаи системаҳои мураккаби электротаъминкунӣ таъминоти барномавӣ истифода мегардад» [16, с. 50]. Бо назардошти он ки дар системаи электроэнергетикии муосир бузург буда, дорои элементҳои бисёри ғайрихаттӣ мебошанд ва борҳои ғайрихаттӣ васеъ истифода бурда мешавад, масъалаи таъмини СЭЭ, ба яке аз вазифаҳои муҳим табдил ёфтааст. Дар ин шароит яке аз вазифаҳои мураккабтарин ва асосӣ ин таҳлили реҷаҳои ғайрисинусоидалие мебошад, ки бо кори фаъолияти борҳои ғайрихаттӣ ва инчунин инверторҳои манбаъҳои барқароршавандаи энергия ба миён меоянд.

Барномаҳои муосир барои таҳлили реҷаҳои ғайрисинусоидалӣ ба ду усули асосӣ истинод мекунад: ҳисоби реҷаи барқароршудаи гармоника (барои муайян кардани тақсимоти ТГОҶ дар шабакаи электрикӣ истифода мешавад, ки дар он системаи муодилаҳо барои ҳар як гармоникаи мавриди назар алоҳида бо назардошти тавсифоти басомадии элементҳои шабака ҳал карда мешавад) ва моделкунии реҷаҳои ғайрисинусоидалӣ (имкон медиҳад, ки на танҳо равандҳои

барқароршуда, балки равандҳои ғайрихаттӣ ва ғайрисинусоидалии кутоҳмуддат низ дар фазои вақт таҳлил карда шаванд).

Барои ҳисоб ва таҳлили реҷаҳои ғайрисинусоидалии кори СЭ дар замони ҳозира як қатор барномаҳои компютерӣ, аз ҷумла NEPLAN, ETAP (Electrical Transient Analyzer Program), DIgSILENT PowerFactory, MATLAB/Simulink, PSCAD/EMTDC ва дигар барномаҳо вуҷуд доранд. Барномаҳое, ки барои таҳлили ин реҷа бештар истифода мешаванд, MATLAB/Simulink, ETAP ва DIgSILENT мебошанд.

MATLAB/Simulink як воситаи универсалӣ мебошад, ки дар муҳити илмӣ-таҳқиқотӣ ҳамчун стандарт эътироф гардидааст. Бастаи Simscape Electrical барои таҳлили амиқи реҷаҳои ғайрисинусоидалӣ имкониятҳои ниҳоят васеъро пешниҳод менамояд. Бартарии барномаи мазкур дар он аст, ки вай имконияти моделкунии дақиқи системаҳои идоракунии табдилдиҳандаҳо, мавҷудияти воситаҳои табдили босуръати Фурйе (ТБФ) барои таҳлили спектралӣ, имконияти мутобиқсозӣ дар татбиқи моделҳои математикии худӣ ва алгоритмҳои беҳинсозӣ ва ғайраро фароҳам меорад. Аммо он аз истифодакунанда ихтисосмандии баланд ва ҳангоми моделкунии системаҳои бузурги энергетикӣ дар фазои вақт манбаъҳои назарраси ҳисоббарориро талаб менамояд.

ETAP яке аз пуркувваттарин маҷмааҳои саноатӣ барои лоиҳакашӣ ва таҳлили системаҳои электроэнергетикӣ, аз ҷумла реҷаҳои ғайрисинусоидалӣ мебошад. Модули Harmonic Analysis дар ETAP махсус барои баҳодиҳии таҳрифҳои шакли каҷхаттаи шиддат ва ҷараён, инчунин лоиҳакашии филтрҳо барои ҷуброни ташкилдиҳандаҳои гармоникаи олии ҷараён пешбинӣ шудааст. Бартариҳои асосии барнома имконияти моделкунии манбаъҳои гармоникаҳо ҳамчун манбаъҳои ҷараён ё шиддат; санҷиши автоматии мутобиқат ба стандартҳо (IEEE 519 ва ё ГОСТ 32144); тасвирбардории (сканеркунии) басомадӣ барои дарёфти нуқтаҳои резонансҳои параллелӣ ва пайдарпай; китобхонаи бузурги спектрҳои намунавӣ барои намудҳои гуногуни борҳои ғайрихаттӣ ва ғайраҳо мебошанд. ETAP барои ҳисобҳои муҳандисии корхонаҳои саноатӣ ва шабакаҳои шаҳрӣ хело хуб мувофиқат мекунад.

DIgSILENT маҷмааи барномаи олмонӣ мебошад, ки ба ҳисобкунии реҷаҳои кори системаҳои бузурги энергетикӣ, аз ҷумла шабакаҳои магистралӣ ва тақсимотӣ нигаронида шуда, дорои имкониятҳои ҳисоби реҷаҳои барқароршуда дар гармоникаҳо; таҳлили паҳншавии гармоникаҳо бо назардошти ғайрисимметрӣ будани фазаҳо; баҳодиҳии таъсири гармоникаҳои олӣ ба талафот дар трансформаторҳо, хатҳои кабелӣ ва имконияти баназаргирии амсилаҳои генераторҳои шамолӣ ва неругоҳҳои барқи офтобӣ бо тавсифи дақиқи тартиби гармоникаи онҳо мебошад.

Аз байни барномаҳои номбаршуда барои ҳисоб ва таҳлили РҒС кори СЭ барномаи ETAP 19.0.1-ро истифода мебарем, зеро барномаи мазкур дорои китобхонаи васеи спектрҳои намунавӣ барои намудҳои гуногуни борҳои ғайрихаттӣ буда, барои истифода дастрас мебошад. Дар шакли ҷадвал барномаҳои асосӣ барои ҳисоби РҒС ва муқоисаи онҳо оварда шудаанд (ҷадвали 2.2).

Ҷадвали 2.2. – Ҷадвали муқоисавии маҳсулоти барнома барои таҳлили реҷаҳои ғайрисинусоидалии СЭЭ

Тавсифнома	ETAP	MATLAB/Simulink	DIgSILENT	PSCAD/EMTDC
Таъинот и асосӣ	Таҳлили ШЭ, лоиҳакашӣ, ҳимоя, автоматикунонӣ	Моделсозии динамикӣ, СЭ, ва алгоритмҳо	Таҳлили СЭ, реҷаҳои статсионарӣ, динамика, (РГ)	Моделкунони дақиқи (РГЭ)
Намуди моделкунонӣ	Статикӣ, динамикӣ (устуворӣ), гармоникаҳо, (РГЭМ)	Динамикӣ, моделкунии блокӣ	Статикӣ, динамикӣ (векторӣ ва РГЭ), устуворӣ	РГЭ, қиматҳои яклаҳзаинаи ҷараён ва шиддат
Вазифаҳои маъмулӣ	Ҳисобҳои РК, селтақсимшавӣ, ҳамоҳангсозии ҳимояҳо, ба кор андохтани муҳаррикҳо, таҳлили гармоникаҳо, устуворӣ, беҳинсозӣ	Коркард ва санҷиши контролерҳо (санҷишгар), системаҳои автоматизатсия, беҳинсозии алгоритмҳо	Ҳисобҳои РК, селтақсимшавӣ, устувории динамикӣ ва гузаришӣ, гармоникаҳо, таҳлили ларзишҳо, ҳамгироии (МБЭ), беҳинсозӣ	Таҳлили фузуншиддати коммутатсионӣ, раъду барқ, резонансҳои субсинхронӣ, резонансҳои баландбасомад (ББ), HVDC, FACTS

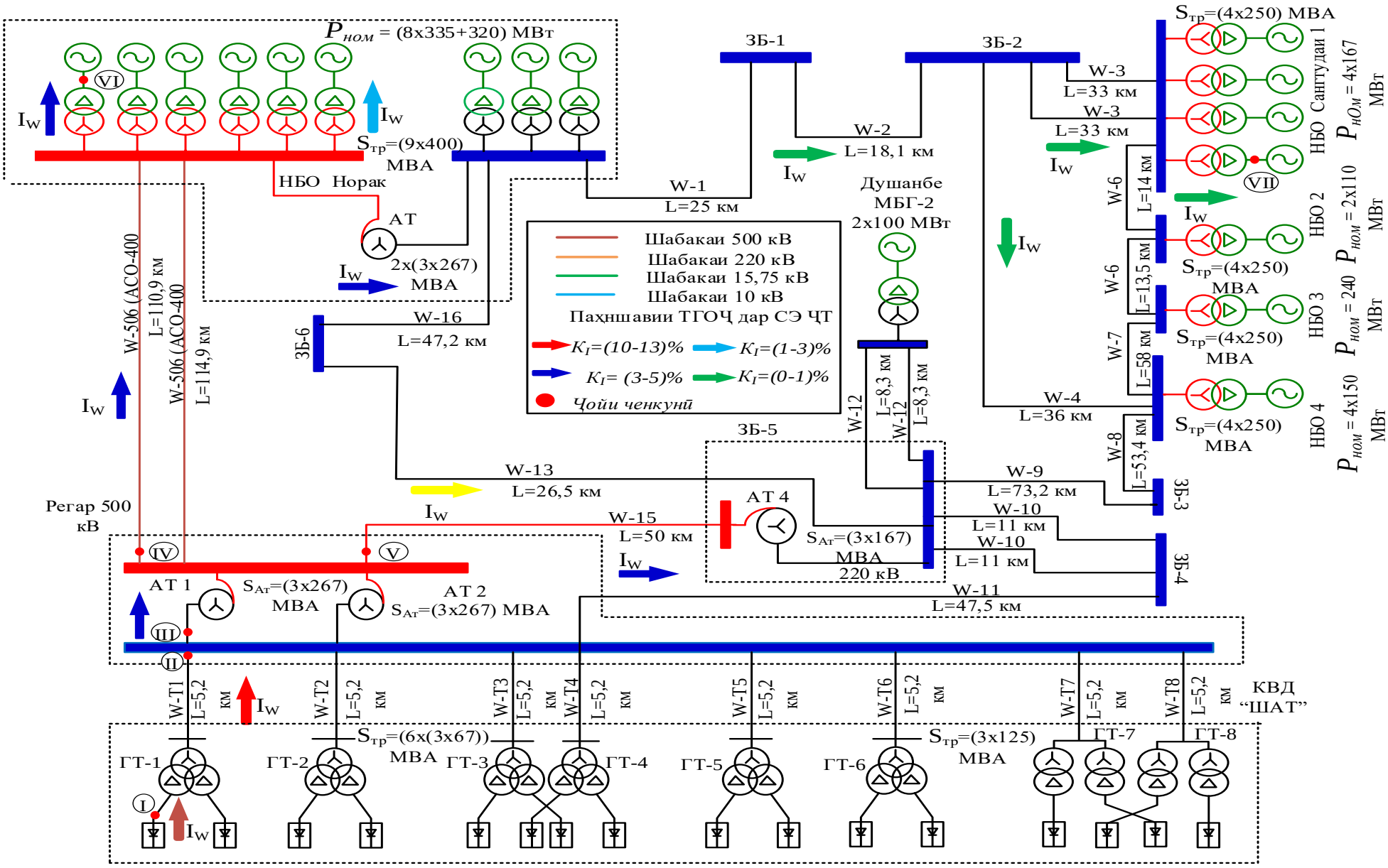
Идомаи ҷадвали 2.2

Интерфейс	Редактори графикии якхата	Диаграммаҳои блокӣ (барномасозии графикӣ)	Графикӣ, якхатта, осон барои ШЭ	Редактори графикии схематехникӣ
Ӯҳдабарой/ тавсеапазирӣ	**Баланд** Сохтори модулӣ, истифодаи скриптҳо ва моделҳои истифодабаранда	**Бениҳоят баланд** Ҳамгирой бо MATLAB, сохтани дилхоҳ блокҳо, функсияҳо ва скриптҳои истифодабаранда	**Баланд** DSL (DIgSILENT Simulation Language), скриптҳои DPL, Python API	**Баланд Моделҳои** истифодабаранда, скриптҳо (Python), имконияти (co-simulation)
Мушкилии омузиш	**Миёна** Фаҳмиши принсипҳои СЭ-ро талаб мекунад, аммо интерфейс корро осон мекунад	**Миёна/Баланд** Фаҳмиши моделкунии блоконӣ, принсипҳои идоракунӣ ва MATLAB-ро талаб мекунад	**Миёна/Баланд** Функсионали васеъ ва дақиқгардонӣ	**Баланд** Фаҳмиши амиқи (РГЭ) ва принсипҳои кори компонентҳоро талаб мекунад
Соҳаҳои истифодабарӣ	СЭ,(истеҳсол, интиқол, тақсимот), лоиҳакашӣ, истифодабарӣ, бехатарӣ, энергетикаи атомӣ	Таҳқиқоти илмӣ, коркарди системаҳои идоракунӣ, коркарди рақамии сигналҳо, дилхоҳ системаи динамикӣ, ва СЭ	Интиқол ва тақсимоти ЭЭ, истеҳсол, СЭ, таҳқиқи устуворӣ, беҳинсозӣ, нақшакашӣ	Зеристгоҳҳои баланшиддат, HVDC/FACTS, таҳқиқи РГ, таҳлили изолятсия, коркард ва санҷиши ҳимоятҳо, ҳамгироии МБЭ
Нарх	Баланд (ТБ-и касбӣ, литсензияи модулӣ)	Баланд (литсензия ба MATLAB + Simulink + Toolboxes)	Баланд (ТБ-и касбӣ)	Баланд (ТБ-и касбии махсусгардонидашуда)
Бартариҳо	Истифодабарии универсалӣ, китобхонаҳои васеи таҷҳизот, барои таҳлили ҳимоя, координатсия ва Arc Flash, осон барои нақшакашӣ ва истифодабарӣ	Чандирии фавқулода, пойгоҳи пуриқтидори математикӣ (MATLAB), имконияти моделсозии ҳама гуна системаҳои динамикӣ	Пойгоҳи таҳлилии пуриқтидор, ҳисобҳои комплексии устуворӣ, чандирӣ дар моделсозии шабакаҳои мураккаб, барои СЭ, ва (МБЭ)	Дурустии баландтарин барои моделсозии РГЭ, муаррифии дақиқи ҷузъҳо, имкониятҳои пуриқтидор барои HVDC/FACTS, ҳамгироӣ бо Python
Камбудиҳо	Мумкин аст барои баъзе РГ назар ба PSCAD кам дақиқ бошад	Метавонад барои вазифаҳои одии системаҳои энергетикӣ зиёдатӣ бошад. Самти умумитар дорад	Барои азхудкунии зуд метавонад мушкилиҳо ба миён орад.	Барои ҳисобҳои статикӣ ва координатсияи ҳимоятҳо чандон универсалӣ нест. Бори баланди ҳисобкунӣ дорад

2.4 Таҳлили паҳншавии гармоникаҳои олӣ дар шабакаҳои электрикӣ ҳангоми реҷаҳои ғайрисинусоидалӣ (дар мисоли СЭ-и Ҷумҳурии Тоҷикистон)

Яке аз вазифаҳои муҳим ҳангоми таҳқиқи паҳншавии ГО дар СЭ муайян намудани сатҳи онҳо дар таркиби занҷир, яъне муайян намудани сатҳи шиддатҳо дар гиреҳҳо ва ҷараёнҳо дар ва шохаҳои СЭ мебошад. Ин аз он вобаста аст, ки таҷҳизоти электрикӣ, қабулкунакҳои электрикӣ, воситаҳои коммутатсия, системаҳои алоқа ва бахусус дастгоҳҳои дорои технологияи баланд танҳо дар шароити муайяне, ки маъмулан бояд ба тавсифномаҳои меъёрии онҳо мутобиқат кунанд, тӯлонӣ фаъолият менамоянд. Маҷмуи чунин талабот дар СЭ, ки ба он истеъмолкунандагон пайваст шудаанд ва ё пайваст хоҳанд шуд, дар ҳуҷҷатҳои меъёрӣ дода мешавад. Мутобиқи [16] таҳлили СЭЭ аз рӯи шиддати ғайрисинусоидалии шабакаҳои системасози Тоҷикистон оварда шудааст. Нақшаи принсипиалии системаи электроэнергетикии Ҷумҳурии Тоҷикистон, бо параметрҳои техникии элементҳои он ва ҷараёнҳои гармоникаҳои олии ҳосилшаванда аз ҷониби табдилдиҳандаҳои росткунанда дар расми 2.3 оварда шудааст. Дар асоси расми 2.3 тақсимоти ТГОҶ-ро дар СЭ-и ҶТ ба осонӣ муайян кардан мумкин аст.

Масалан, агар қиматҳои зариби K_I дар шабакаҳои корхонаи алюминийи тоҷик (10 кВ ва 220 кВ) аз 10 то 13 %-ро ташкил диҳанд, дар шабакаҳои 500 кВ он дар ҳудуди аз 3 % то 5 % тағйир меёбад. Дар тахтасимҳои шиддати генератории НБО-и Норак он дар ҳудуди аз 1 % то 3 % ва дар неругоҳҳои барқие, ки аз бори ғайрихаттӣ дуртар ҷойгиранд (масалан, НБО-и Сангтӯда-1), қимати K_I то 1 %-ро ташкил медиҳад. Бояд қайд намуд, ки ҳангоми гузаронидани таҳқиқоти мазкур [16], корхонаи алюминий танҳо бо 30 %-и тавоноии номиналии умумии худ фаъолият мекард. Ҳангоми афзоиши тавоноии истифодашавандаи корхонаи мазкур ва бо назардошти он, ки дар солҳои наздик шумора ва тавоноии НБОф чанд баробар зиёд мегардад (дар соли 2026 дар ҷумҳурӣ бунёди 500 МВт НБОф ва ба таври параллелӣ пайваст намудани он ба система ба нақша гирифта шудааст) ва инчунин амалӣ намудани лоиҳаи CASA-1000, қимати зариби K_I боз болотар меравад.



Расми 2.3. – Қисми таҳқиқшавандаи системаи электроэнергетикии Ҷумҳурии Тоҷикистон

2.5 Амсиласозии шабакаҳои электрикии дорои бори ғайрихаттӣ барои ҳисоби ҳодисаҳои резонансӣ (дар мисоли СЭ Ҷумҳурии Тоҷикистон)

Барои муайян кардани эҳтимолияти ба вуҷуд омадани ҳодисаҳои резонансӣ дар шабакаҳои электрикии дорои бори ғайрихаттӣ қисме аз СЭ ҶТ таҳқиқ карда мешавад, ки нақшаи электрикии он дар расми 2.4 оварда шудааст. Параметрҳо ва нишондиҳандаҳои асосии нақша дар ҷадвали 2.3 оварда шудаанд.

Ҷадвали 2.3. – Параметрҳои асосии нақшаи электрикии таҳқиқшаванда

Гиреҳҳо	$U_{ном}$, кВ	Намуд	$P_н$, МВт	$cos\varphi_н$	Шохаҳо	$U_{ном}$, кВ	$L_{хиб}$, км	$n_з$	Тамғаи ноқил
1	500	М	1995	0,85	2-3	500	50	1	АС-300
2	500	-	-	-	3-4	500	204	1	АС-300
3	500	-	-	-	3-5	500	95	2	АС-300
4	500	Б	800	0,93	13-14	220	5,6	8	АС-300
5	500	М	800	0,85	13-15	220	5,6	2	АСО-300
6	220	М	1005	0,85	13-12	220	47,5	1	АСО-300
7	220	-	-	-	9-10	220	45,5	1	АСО-300
8	220	Б	150	0,9	10-16	220	28	1	АС-300
9	220	-	-	-	9-12	220	10,9	2	АС-400
10	220	Б	125	0,92	9-11	220	8,3	2	АС-400
11	220	М	400	0,85	9-8	220	26,5	1	АС-300
12	220	Б	250	0,91	8-34	220	32,2	1	АСО-300
13	220	-	-	-	34-35	220	50,2	1	АСО-300
14	220	Б	1100	0,92	35-21	220	0,7	1	АСУ-300
15	220	Б	350	0,92	21-36	220	0,5	1	АСО-300
16	220	Б	300	0,92	36-18	220	44,7	1	АС-300
17	220	Б	12	0,88	36-6	220	2,9	1	АСУ-300
18	220	М	120	0,85	6-35	220	2,5	1	АСО-300
19	220	М	600	0,85	6-37	220	66,5	1	АС-300
20	220	Б	40	0,91	6-22	220	22,1	1	АС-300
21	220	Б	64	0,92	6-24	220	33,4	1	АСО-300
22	220	Б	41	0,9	22-23	220	23,1	1	АС-400
23	220	Б	200	0,92	23-26	220	15,9	1	АС-400
24	220	Б	20	0,92	7-37	220	8	2	АС-400
25	220	Б	140	0,92	16-18	220	28,3	1	АСО-300
26	220	М	670	0,85	16-19	220	53,4	1	АС-400
27	220	М	220	0,85	34-17	220	0,3	1	АС-300
28	220	М	248	0,85	20-38	220	6	1	АС-300
29	220	Б	201	0,94	38-19	220	10	1	АС-300
30	220	Б	130	0,93	18-35	220	44,7	1	АС-300
31	220	Б	170	0,91	19-25	220	34,3	1	АС-300
32	220	Б	75	0,92	19-36	220	10	1	АС-300
33	220	Б	180	0,93	20-36	220	2,5	1	АС-300

Идомаи ҷадвали 2.3

34	220	-	-	-	24-25	220	8,9	1	АС-300
35	220	-	-	-	25-26	220	33,4	2	АС-400
36	220	-	-	-	25-29	220	56,4	2	АС-400
37	220	Б	163	0,92	26-33	220	93	2	АС-400
38	220	-	-	-	26-27	220	13,3	1	АС-400
Трансформаторҳо (автотрансформаторҳо)					27-28	220	14,3	1	АС-400
Шохаҳо	**$U_{ном}$, кВ**	**$S_н$, МВА**		**$n_т$**	28-38	220	58,4	1	АСО-300
1-6	500/220	3×167		2	28-30	220	20,6	1	АС-400
2-13	500/220	3×267		3	28-32	220	49	1	АС-300
3-9	500/220	3×167		1	30-31	220	75,8	1	АС-300
5-7	500/220	3×167		2	31-33	220	77	1	АС-400
Хати интиқоли барқӣ					32-33	220	29,9	1	АС-240
Шохаҳо	**$U_{ном}$, кВ**	**$L_{хиб}$,км**	**$n_з$**	**Тамғаи ноқил**					
1-2	500	115	2	3×АС-400					

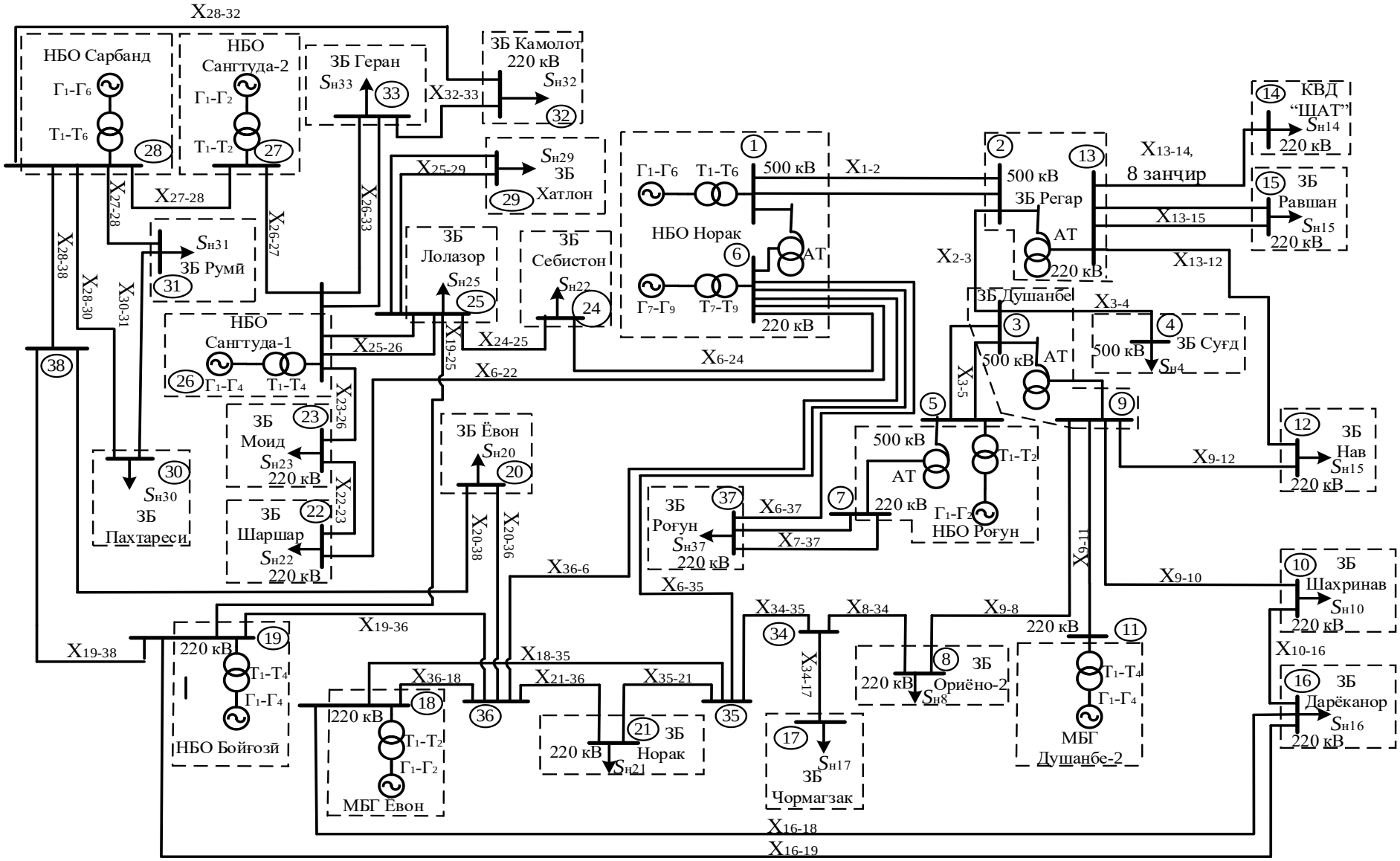
Эзоҳ: Б – бор; М – манба; $U_{ном}$ – шиддати номиналӣ; $P_{ном}$ – тавоноии фаъоли номиналӣ; $\cos\varphi_{ном}$ – зариби тавоноии номиналӣ; $S_{ном}$ – тавоноии пурраи номиналӣ; $n_т$ – шумораи трансформаторҳо; $L_{хиб}$ – дарозии хати интиқоли барқ; $n_з$ – шумораи занҷирҳои хат.

Алгоритми баҳодиҳии натиҷаҳои моделкунии ҳодисаҳои резонансӣ дар шабакаи электрикии таҳқиқшаванда дар расми 2.5 оварда шудааст. Мувофиқи ин алгоритм аввал, модели математикии шабакаи электрикӣ дар барномаи ETAP 19.0.1 сохта мешавад, сипас, параметрҳои реҷа дар басомади асосӣ санҷида мешавад. Баъдан, натиҷаҳои моделкунӣ бо натиҷаҳои ҳисобӣ тавассути формулаҳои маълум тибқи манбаъҳои [2, 3, 8] муқоиса карда мешаванд. Дар ин ҳолат, ноқилияти гиреҳӣ ($Y_{i(n)}$) ҳамчун ҷамъи математикии ноқилиятҳои ҳамаи шохаҳои ба гиреҳи додашуда пайвастбуда муайян карда мешавад:

$$\dot{Y}_{i(n)} = \sum_{j=1}^{m} \dot{Y}_{ij(n)}, \qquad (2.6)$$

дар ин ҷо, $Y_{ij(n)}$ – ноқилияти шохаи байни гиреҳҳои i ва j мебошад.

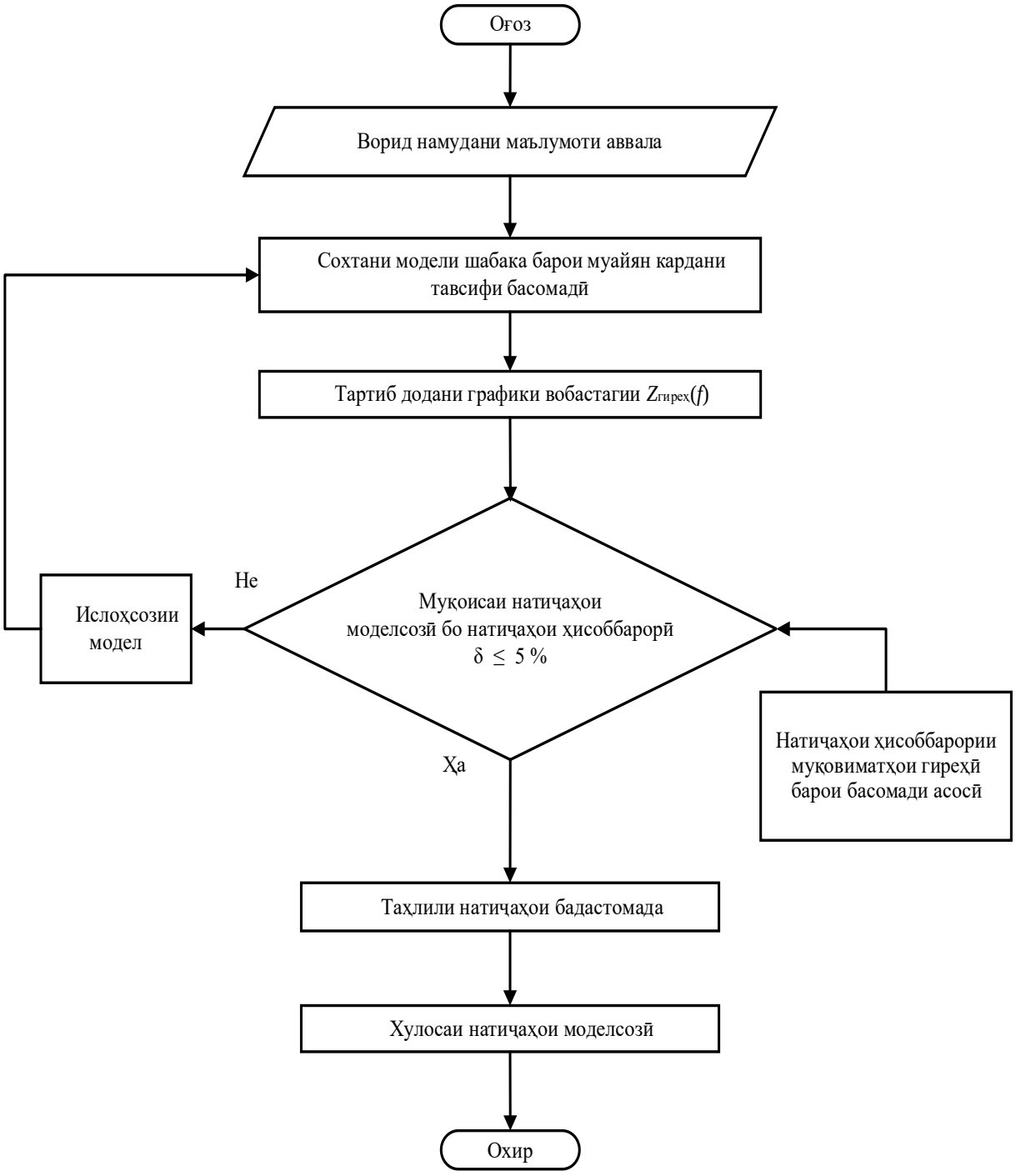
Сипас, натиҷаҳои бадастомада бо натиҷаҳои модел муқоиса карда мешаванд. Агар саҳвияти натиҷаҳои моделсозӣ нисбат ба натиҷаҳои модел аз ҳадди ниҳоӣ нагузарад, он гоҳ таҳлили натиҷаҳои бадастомада иҷро карда мешавад. Саҳвияти нисбии натиҷаҳои моделсозӣ барои гиреҳи дилхоҳии i аз рӯи формулаи зерин муайян карда мешавад:



Расми 2.4. – Нақшаи электрикии таҳқиқшавандаи Ҷумҳурии Тоҷикистон

$$\delta_{\%} = \frac{Z_{\text{гирех,ҳисоб.}} - Z_{\text{гирех,модел}}}{Z_{\text{гирех,ҳисоб}}} \cdot 100\% \leq 5\%$$

дар ин ҷо, $Z_{\text{гирех,ҳисоб.}}$ – қимати ҳисобии муқовимати гирехӣ; $Z_{\text{гирех,модел}}$ – қимати муқовимати гирехӣ, ки аз модел ба даст оварда шудааст.



Расми 2.5. – Алгоритми муқоисаи натиҷаҳои моделсозӣ бо маълумоти ҳисобӣ

Муқовимати гиреҳӣ аз рӯи ифодаи зерин муайян карда мешавад:

$$Z_{i(n)} = \frac{1}{Y_{i(n)}}. \qquad (2.8)$$

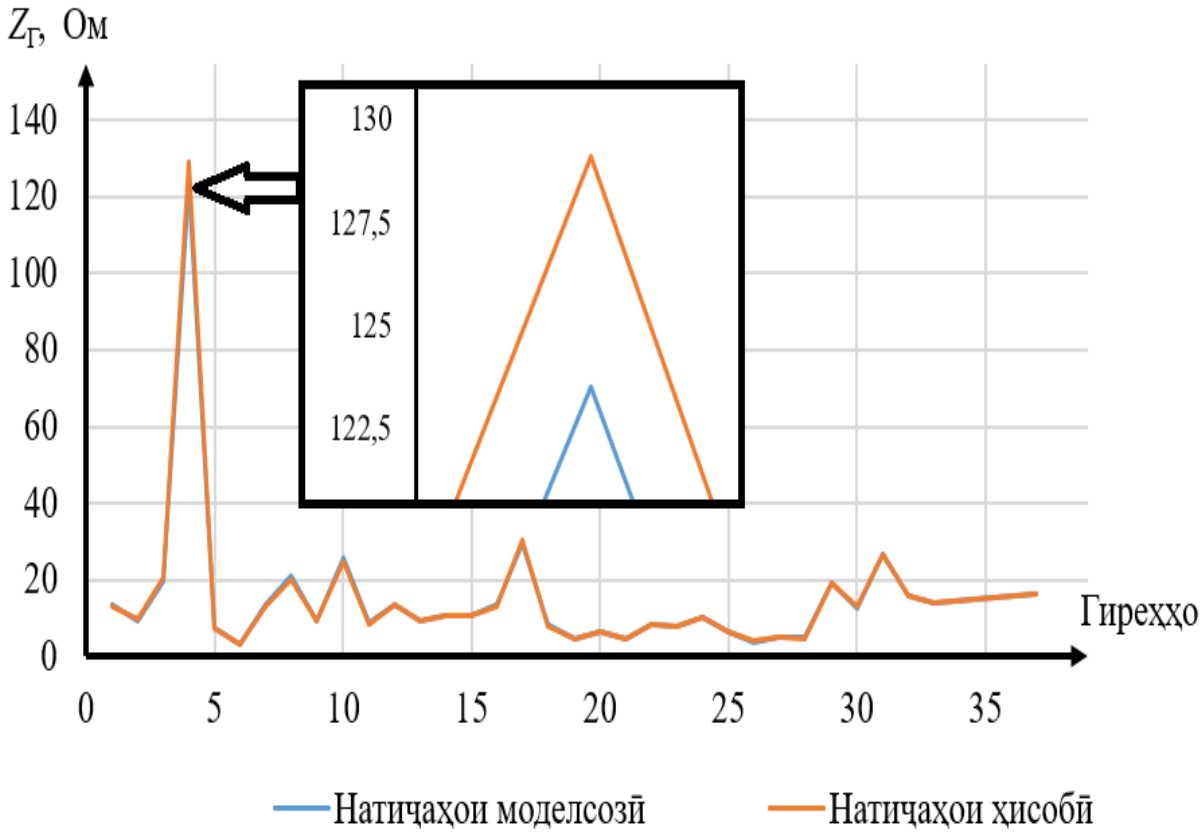
Санҷиши натиҷаҳои моделсозӣ шабоҳати модели математикӣ ва муайянсозии муқовимати гиреҳиро бо таври ҳисобӣ тасдиқ мекунад. Натиҷаҳои ҳисоббарории саҳвият дар гиреҳҳои 500 кВ-и шабакаи мавриди таҳқиқбуда дар ҷадвали 2.4 оварда шуда, дар расми 2.6 бошад, графики муқовимати гиреҳӣ дар гармоникаи асосии шабакаҳои 500 кВ ва 220 кВ тасвир ёфтааст.

Таҳлил барои реҷаи барқароршудаи кори шабака гузаронида шуда, ҳангоми моделсозӣ шартҳои зерин қабул карда шуданд:

1. Ҳамаи элементҳои сефазаи СЭ ҶТ, аз рӯи фазаҳо симметрӣ мебошанд;
2. Борҳои ғайрихаттӣ ҳамчун манбаи мустақили ҷараён пешниҳод гардида, тағйирёбии тартиби гармоникаро ҳангоми таҳрифи шиддат ба назар намегирад;
3. Генераторҳои ҳамаи неругоҳҳои барқӣ синхронӣ ва параллелӣ кор карда, тавоноии якхела медиҳанд;
4. Тавсифи басомадӣ ҳамчун функсияи хаттӣ сохта мешавад, яъне ғайрихаттии трансформаторҳо ва элементҳои дигари шабака ба назар гирифта намешавад. Ин ба он маъност, ки бо баланд шудани басомад муқовимати индуктивӣ мутаносибан зиёд шуда, муқовимати ғунҷоишӣ кам мегардад;
5. Ҳангоми ҳисоббарории реҷаи барқароршуда равандҳои гузарандаи резонанс ба назар гирифта намешаванд.

Ҷадвали 2.4. – Саҳвияти нисбии моделсозӣ дар шабакаҳои электрикии 500 кВ

Гиреҳ	1	2	3	4	5
δ, %	3,18	3,90	3,95	4,54	1,95

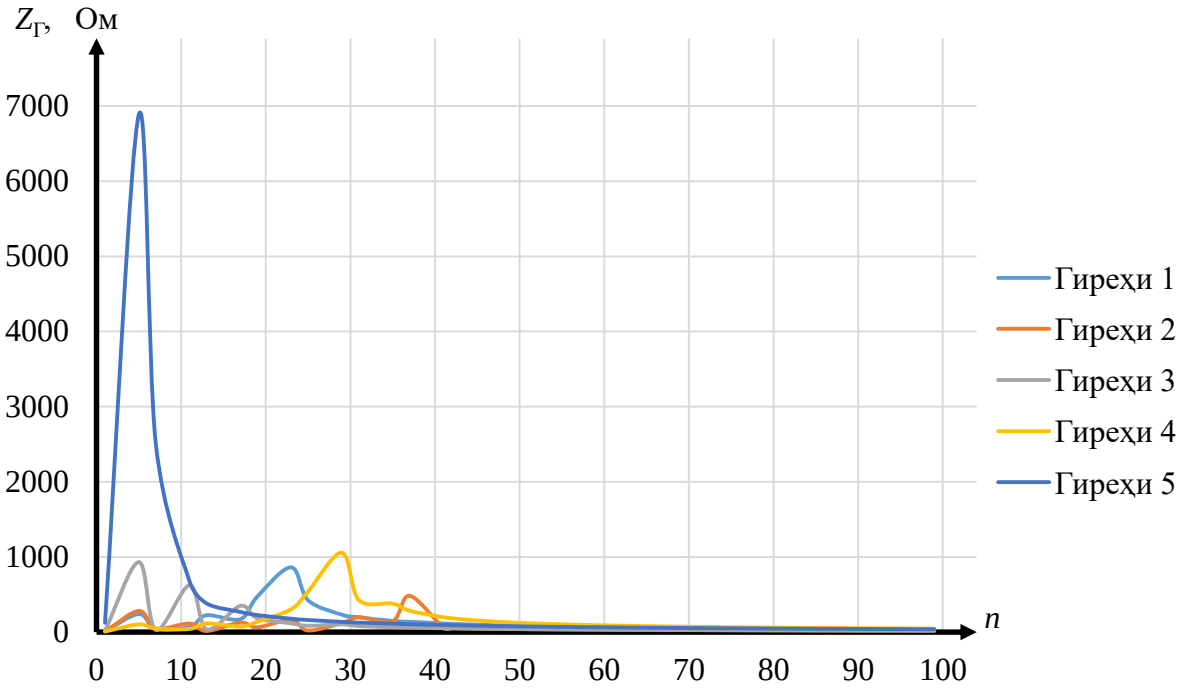


Расми 2.6. – Графики муқовиматҳои гирехӣ дар гармоникаи асосии дар шабакаҳои электрикии 500 кВ ва 220 кВ

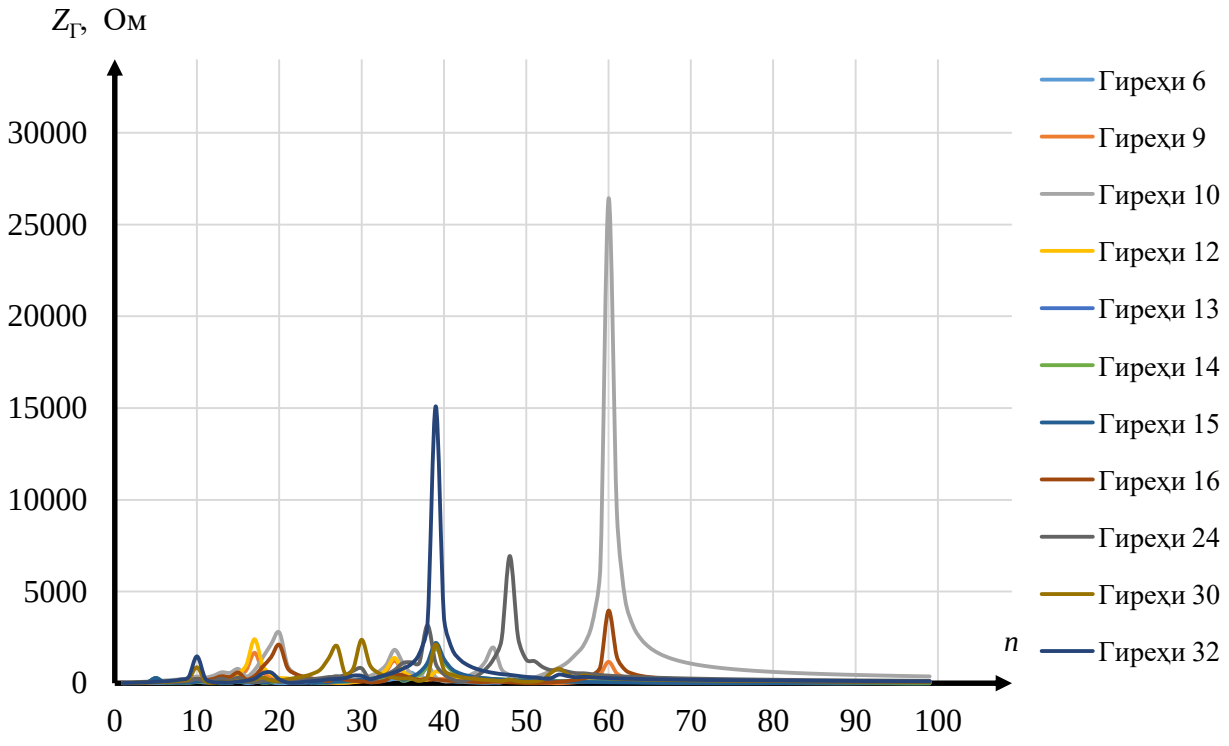
2.6 Таҳлили натиҷаҳои моделсозӣ

Барои нақшаи мавриди баррасӣ қарордошта (расми 2.4) тавсифҳои амплитудавии басомадӣ барои гирехҳои хоси нақша сохта шудаанд (расмҳои 2.7 ва 2.8).

Натиҷаҳои ҳисобкуниҳо ва тавсифҳои амплитудавӣ-басомадӣ нишон медиҳанд, ки дар реҷаи муътадил, бо параметрҳои дар ҷадвали 2.3 овардашуда, муқовимати гирехӣ дар гирехи 5 дар басомади 250 Ҳс (гармоникаи 5-ум) қимати назаррасро (6885 Ом) доро мебошад. Ин чунин маъно дорад, ки ҳангоми мавҷуд будани манбаъҳои гармоникаҳои олӣ дар ин басомад ё басомади ба он наздик, дар гирехи 5 эҳтимолияти баланди ба амал омадани резонанс мавҷуд аст.



Расми 2.7. – ТАБ-и гиреҳҳои 500 кВ-и нақшаи таҳқиқшаванда дар реҷаи муътадил



Расми 2.8. – ТАБ-и гиреҳҳои хоси 220 кВ-и нақшаи таҳқиқшаванда дар реҷаи муътадил

Муқовимати хусусӣ дар гиреҳи 10 (зеристгоҳи баркӣ (ЗБ) «Шаҳринав») дар басомади 3000 Ҳс (гармоникаи 60-ум) низ назаррас буда, 26425 Ом-ро ташкил медиҳад. Аммо дар шабакаҳои электрикӣ манбаъҳои гармоникаҳои олии ҷараён (МГОҶ) аз тартиби 40-ум боло (2000 Ҳс) амалан мавҷуд нестанд ё қимати ночиз

доранд (расми 2.8). Мувофиқи банди 4.2.4.1 ҳуҷҷати меъёрии ГОСТ 32144-2013, ки дар ҳудуди Ҷумҳурии Тоҷикистон амал мекунад, танҳо гармоникаҳои то тартиби 40-ум меъёрбандӣ карда мешаванд, яъне: «қиматҳои зарибҳои ташкилкунандаҳои гармоникии шиддат то тартиби 40-ум $K_{U(n)}$ ин нисбати ташкилкунандаи гармоникаи якуми шиддат U_1 ба ташкилкунандаи гармоникаи n-ум шиддати дар нуқтаи интиқоли энергияи электрикӣ [бо фоиз]; қимати зариби ҷамъбастии ташкилкунандаҳои гармоникии шиддат (нисбати қимати миёнаи квадратии ҷамъи ҳамаи ташкилкунандаҳои гармоникӣ то тартиби 40-ум ба қимати миёнаи квадратии ташкилкунандаи якум) K_U, % дар нуқтаи интиқоли энергияи электрикӣ» [1, с. 7]. Бинобар ин, барои таҳқиқотҳои минбаъда басомадҳо танҳо то 2000 Ҳс ба назар гирифта мешаванд. Қайд кардан зарур аст, ки дар шабакаҳои электрикӣ манбаъҳои асосии МГОҶ истеъмолкунандагоне мебошанд, ки гармоникаҳои токи ҷараёнро бо қимати калон ҳосил мекунанд, дар ҳоле ки гармоникаҳои ҷуфт хеле хурд буда, ба назар гирифта намешаванд. Инчунин, дар шабакаҳои шиддати баланд гармоникаҳои каратии се (ба се тақсимшаванда) қиматҳои паст доранд: онҳо асосан дар шабакаҳои 0,4 кВ ҳосил шуда, ҳангоми нақшаи пайвастшавии печҳои трансформаторҳо ба таври ситора ва секунҷа ба зинаҳои болоӣ табдил намеёбанд. Аз ин рӯ, барои таҳлили минбаъда танҳо гармоникаҳои тоқ, ки ба се каратӣ нестанд, ба назар гирифта мешаванд.

Муқовимати хусусӣ дар гирехи 32 (ЗБ «Камолот») дар басомади 1950 Ҳс (гармоникаи 39-ум) 15099 Ом-ро ташкил медиҳад. Ин нишон медиҳад, ки ҳангоми мавҷуд будани МГОҶ-и ин басомад афтиши шиддат назаррас хоҳад буд. Тавре ки қаблан қайд карда шуд, манбаи пуриқтидори гармоникаҳои олӣ дар СЭЭ ҶТ Ширкати алюминии тоҷик [15, 16] мебошад, ки гармоникаҳои тартиби $(6 \cdot n \pm 1)$-ро ҳосил менамояд. Аз ин рӯ, барои таҳқиқотҳои минбаъда танҳо гармоникаҳои тартиби 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35 ва 37, ки барои ин намуди бор мебошанд, омухта мешаванд.

2.7 Хулосаҳо барои боби дуюм

1. Аҳамияти омузиши мушкилоти пастшавии сифати энергияи электрикӣ аз рӯи шиддати ғайрисинусоидалӣ дар шабакаҳои электрикӣ асос ёфтааст. Натиҷаҳои таҳлили омории (статистикии) динамикаи тағйирёбии сохтори истеъмолкунандагони энергияи электрикӣ зиёдшавии бо шиддати ҳиссаи борҳои ғайрихаттиро дар СЭ-и муосир нишон дод – аз 62,6 % дар аввали солҳои 2000-ум то ба сатҳи беш аз 86 – 88 % то охири соли 2026 (пешгӯишаванда). Муайян карда шуд, ки афзоиши ҳамзамони зариби умумии K_I аз 35 % (дар соли 2010) то 75 %-и пешгӯишаванда (дар охири соли 2026), инчунин афзудани гармоникаҳои ба се каратӣ дар ноқилҳои нейтралии шабакаҳои 0,38 кВ хавфҳои зиёди ба амал омадани реҷаҳои вазнини резонансӣ ё ба резонанс наздикро мусоидат мекунанд, ки ба вайроншавии талаботи меъёрии ГОСТ 32144-2013 оварда мерасонанд.

2. Нишон дода шуд, ки дар баробари борҳои анъанавии ғайрихаттии саноатӣ, инчунин солҳои охир манбаи пуриқтидори ТГОҶ ва ТГОШ бо интегратсияи оммавии манбаъҳои барқароршавандаи энергия (аз ҷумла, НБОф-и шабакавӣ), ки тавассути табдилдиҳандаҳои инверторӣ пайваст мегарданд. Ин хусусиятҳои басомадӣ ва конфигуратсияи шабакаҳои электрикии Ҷумҳурии Тоҷикистонро ба куллӣ тағйир дода, бозбинии усулҳои классикии муайяншудаи пешгӯии резонансро талаб менамояд.

3. Таснифот ва таҳлили муқоисавии маҷмуаҳои барномаҳои компютерӣ ва ҳисобии муосир иҷро карда шуд. Дар асоси хулосабарории таҷрибаи байналмилалӣ ва дохилӣ ҳудуди истифодабарии усулҳои муосир муайян карда шуданд: усули баланси (тавозуни) гармоникӣ ва моделсозии динамикӣ дар фазои вақт барои баҳисобгирии равандҳои ғайристатсионарӣ ва гузариши коммутатсия мувофиқ дониста мешаванд; усули тавсифҳои басомадӣ $\left(Z_{\text{г}(f)}\right)$ барои тасвирбардорӣ намудани шабака ва муайян кардани ҷойгиршавии басомадҳои резонанси параллелӣ ва пайдарпай ҳамчун усули асосӣ боқӣ мемонад; таҳлили модалии гармоникӣ усули босамари таҳлили фазоии системаҳои бузурги

энергетикӣ буда, он имконияти ҷойгиркунии беҳтарини дастгоҳҳои ҷубронкунии филтрӣ (ДҶФ) медиҳад ва «гиреҳҳои заиф» – ро муайян менамояд.

4. Модели математикии СЭ ҶТ барои таҳлили имконияти ба вуҷуд омадани резонанс коркард ва санҷида шудааст. Дар асоси таҳлили тавсифҳои амплитудавии басомадӣ муайян карда шуд, ки гиреҳи 5 дар минтақаи хавфи баланди резонанси параллелӣ дар басомади 250 Ҳс (гармоникаи 5-ум) қарор дорад, ки дар он ҷо муқовимати гиреҳӣ ба 6885 Ом мерасад. Қимати бузургтарини муқовимат дар басомади 3000 Ҳс (гармоникаи 60-ум), ки дар гиреҳи 10 (ЗБ «Шаҳринав») ошкор гардид, вале бехатар дониста шуд. Зеро ташкилкунандаҳои гармоникаи олии ҷараён дар ин басомад дар шабака амалан вуҷуд надоранд. Бо назардошти талаботи меъёрии ҶТ, ки нишондиҳандаҳои сифати энергияи электрикиро танҳо то тартиби 40-ум танзим менамоянд, ҳадди болоии басомади модели математикии коркардшаванда асоснок то қимати 2000 Ҳс маҳдуд карда шудааст.

БОБИ 3. РУШДИ УСУЛҲОИ ПЕШГӮИИ ҲОДИСАҲОИ РЕЗОНАНСӢ ДАР ГИРЕҲҲОИ ШАБАКАҲОИ ЭЛЕКТРИКӢ

3.1 Таҳлили усулҳои мавҷудаи пешгӯии ҳодисаҳои резонансӣ дар шабакаҳои электрикӣ

Бинобар фаъолона ҷорӣ намудани технологияҳои «шабакаҳои ҳушманд», истифодаи тавлиди ЭЭ тақсимшуда дар асоси МБЭ ва истифодаи васеи техникаи табдилдиҳандаи қуввагӣ, системаҳои электроэнергетикии муосир табдилёбии куллӣ ва азимро аз сар мегузаронанд. Ин тағйирот дар баробари афзоиши ҳиссаи борҳои ғайрихаттӣ ба табдилёбии назарраси тартиби гармоникаи ҷараёнҳо ва шиддатҳо дар шабакаҳои электрикӣ оварда мерасонанд. Тавре қайд гардида буд, яке аз оқибатҳои хавфноктарини РҒС ҳодисаҳои резонансӣ дар басомадҳои гармоникаҳои баландтар мебошанд, ки ба чанд баробар афзудани амплитудаи гармоникаҳо, бор дар дастгоҳҳои конденсаторӣ, зарар дидани изолятсияи кабелҳову трансформаторҳо ва инчунин кори ғалати муҳофизати релегӣ оварда мерасонанд. Бояд хотирнишон сохт, ки барои муайян кардани реҷаҳои резонансӣ шарти мушаххасе вуҷуд надорад, ки муқовимати гиреҳӣ бояд то кадом қимат афзоиш ёбад, то онро қимати ниҳоӣ эътироф намоем. Зеро ҳаҷми зарар ва вусъати пайдоиши резонанс на танҳо аз конфигуратсияи шабака, ки нуқтаи баландтарини муқовимати гиреҳиро муайян мекунад, балки аз мавҷудияти манбаъҳои гармоникаҳои олии ҷараёни тартиби мувофиқ дар ин шабака низ вобастагӣ доранд. Бинобар ин, бояд меъёр ва ё қимати ниҳоии муқовиматҳои гиреҳӣ бо назардошти ҳосилшавии гармоникаҳои олии ҷараён муайян карда шавад, ки дар он хавфи бавуҷудоии фузуншиддатҳои хатарноки резонансӣ эҳтимолияти бештар дорад.

Барои таҳлил ва пешгӯии реҷаҳои резонансӣ дар шабакаҳои муосир таркиби ду равиш самараноктарин ба шумор меравад: усули тасвирбардории басомадӣ барои ошкор намудани хатарҳо ва усули моделсозии компютерӣ барои санҷиши амиқ. Ҷадвали муқоисавии ин усулҳо дар ҷадвали 3.1 оварда шудааст.

Ҷадвали 3.1. – Усулҳои муайянкунӣ ва таҳлили ҳодисаҳои резонансӣ

Усул	Афзалият	Натиҷа	Эзоҳ
Усули тавсифҳои басомадӣ	Имкон медиҳад, ки вобастагии $Z_{г(f)}$ сохта шавад	Ба осонӣ муайян кардани нуқтаи баландтарин (резонанси параллелӣ) ва пасттарин (резонанси пайдарпай)	Усули аз ҳама маъмултарин
Усули таҳлили модалии гармоникаҳо	Гиреҳи аз ҳама заифтаринро муайян мекунад, ки дар он ҷо ҳатто гузоштани филтри хурд самараи максималӣ медиҳад.	Ба таҳлили қиматҳои хоси матритсаи ноқилияти шабака асос ёфтааст	Навтарин
Усули моделсозии компютерӣ	«Резонанси динамикӣ»-ро ба назар мегирад	Истифодабарӣ ҳатто ҳангоми ғайрихаттӣ будани система	Беҳтарин барои санҷиш
Усули таҳлили гармоникии реҷаҳои муқарраршуда	Имкон медиҳад, ки на танҳо мавҷудияти резонанс, балки сатҳҳои мушаххаси таҳрифшавӣ дар ҳар як гиреҳ пешгӯӣ карда шавад.	Усул алгоритмҳои итератсионӣро барои ба назар гирифтани таъсири мутақобилаи байни *U* ва *I* дар дастгоҳҳои ғайрихаттӣ дар бар мегирад	Қиматҳои ТГОҶ ва ТГОШ-ро барои ҳар як гармоника бо назардошти меъёрҳои муқарраршуда муайян мекунад
Моделсозии имитатсионӣ дар фазои вақт	Пурра ба назар гирифтани ғайрихаттии магнитшавии дилакҳо ва динамикаи системаҳои идоракунии табдилдиҳандаҳо	Усул муодилаҳои дифференсиалии ҳолати системаро ҳал карда, натиҷаи аниқтар медиҳад	Феррорезонансро ба назар мегирад, аммо ҳамаи параметрҳои таҷҳизотро талаб мекунад

Усули тавсифҳои басомадӣ барои таҳлили реҷаҳои резонансӣ усули маъмултарин ба шумор рафта, имкон медиҳад, ки вобастагии муқовимати пурраи гиреҳ аз басомад $Z_{г(f)}$ сохта шавад, ки дар он қимати бузургтарин (резонанси параллелӣ) ва хурдтарини (резонанси пайдарпай) муқовимати пурра вобаста аз басомад ба осонӣ муайян карда мешаванд. Агар қимати бузургтарини муқовимат ба басомади гармоникаи 5-ум, 7-ум ё 11-уми ҳосилкунандаи бор мувофиқ ояд, система дар минтақаи хавфи бавуҷудоии резонанс қарор мегирад.

Усули таҳлили модалии гармоникаҳо усули муосир ба шумор рафта, гиреҳи аз ҳама заифро муайян мекунад, ки дар он ҷо ҳатто насб кардани филтри хурд самараи максималӣ медиҳад. Ин усул пешрафтатарин усули басомадӣ буда, ба таҳлили қиматҳои хоси матритсаи ноқилияти шабака асос ёфтааст.

Усули моделсозии компютерӣ «резонанси динамикӣ»-ро ба назар мегирад, ки ҳангоми он системаи идоракунии табдилдиҳанда бо ғунҷоишҳои шабака ба таъсири мутақобила ворид шуда, лапишҳои худиро ба миён меорад. Бартарияти дигари ин усул дар он аст, ки мувофиқи усулҳои басомадӣ, ки одатан моделҳои ба шакли хаттӣ овардашуда истифода мебаранд, онро ҳатто ҳангоми ғайрихаттӣ будани система амалӣ намудан мумкин аст. Одатан, бори ғайрихаттӣ (масалан, муҳаррики пуриқтидори басомадӣ) хусусияти ғайрихаттӣ дошта, параметрҳои худро вобаста ба шиддати гузошташуда тағйир медиҳад.

Бар хилофи тасвирбардории одӣ, усули таҳлили гармоникии реҷаҳои барқароршуда ҳисобкунии тақсимоти ТГОҶ ва ТГОШ-ро дар тамоми шабакаи электрикӣ пешбинӣ намуда, ба ҳалли системаи муодилаҳои шиддатҳои гиреҳӣ барои ҳар як гармоника ба таври ҷудогона асос меёбад:

$$\left[I_{i(n)} \right] = \left[Y_{i(n)} \right] \cdot \left[U_{i(n)} \right], \qquad (3.1)$$

дар ин ҷо: n — тартиби гармоника, $[Y(n)]$ – матритсаи ноқилиятҳои гиреҳӣ дар басомади гармоника.

Усули мазкур имкон медиҳад, ки на танҳо далели мавҷудияти резонанс, балки сатҳҳои мушаххаси таҳриф дар ҳар як гиреҳ пешгӯӣ карда шаванд, ки ин барои санҷиши мувофиқат ба ҳуҷҷатҳои меъёрӣ [1, 40] зарур аст. Илова бар ин, шаклҳои муосири тағйирёфтаи ин усул алгоритмҳои итератсионӣро барои ба назар гирифтани таъсири мутақобилаи байни шиддат ва ҷараён дар дастгоҳҳои ғайрихаттӣ дар бар мегиранд, ки дақиқияти пешгӯиро дар шабакаҳои дорои ҳиссаи баланди бори ғайрихаттӣ ба таври назаррас афзоиш медиҳад.

Бар хилофи усулҳои басомадӣ, моделсозии имитатсионӣ дар фазои вақт равиш ва усули хеле дақиқу аниқро барои пешгӯии резонанс пешниҳод менамояд. Усули мазкур тавассути барномаҳои EMTP, PSCAD/EMTDC ва дигар барномаҳо амалӣ карда шуда, дар фарқият аз усулҳои басомадӣ, ба он муодилаҳои дифференсиалии ҳолати система ҳал карда мешаванд. Ин равиши беҳтарин ҳангоми таҳлили равандҳои резонансии гузариш, яъне ҳангоми пайваст кардани трансформаторҳои қуввагӣ феррорезонансро низ ба назар мегирад.

Бартарии ин равиш аз он иборат аст, ки он ғайрихаттӣ будани магнитшавии дилакҳои трансформаторҳо ва динамикаи системаҳои идоракунии табдилдиҳандаҳоро пурра ба назар мегирад. Ба камбудиҳои он метавон талаботро ба тавоноии баланди ҳисобӣ ва зарурати донистани ҳамаи параметрҳои таҷҳизотро дохил намуд, ки онҳо на ҳамеша дар марҳилаи лоиҳакашӣ маълуманд.

Дар вақтҳои охир усулҳои пешгӯӣ дар асоси омузиши мошинӣ ба таври фаъол рушд мекунанд, ки онҳо бар муқобили усулҳои анъанавии математикӣ бо мушкилоти номуайянии параметрҳои шабака дучор намешаванд. Чунин усулҳо қодиранд дар асоси маълумоти таърихии системаҳои назорати (мониторинги) СЭЭ омӯзонида шаванд. Усули мазкур имкон медиҳад, ки эҳтимолияти бавуҷудоии резонанс ҳангоми тағйир ёфтани конфигуратсияи шабака дар реҷаи вақти воқеӣ пешгӯӣ карда шавад. Ин роҳро барои сохтани системаҳои мутобиқшавандаи идоракунии СЭЭ имкон фароҳам меорад.

Таҳлили усулҳои мавҷудаи пешгӯии ҳодисаҳои резонансӣ нишон медиҳад, ки ягон усул ва ё равиши универсалӣ вуҷуд надорад. Рушди минбаъдаи усулҳои пешгӯӣ бо ҳамгироии ҳисобҳои таҳлилӣ ва маълумоти бузург алоқаманд буда, имкон медиҳад хавфҳои харобшавии таҷҳизот то ҳадди ақал коҳиш дода шаванд ва эътимоднокии таъмини энергияи электрикӣ дар шароити гузариши энергетикӣ баланд бардошта шавад. Ҳамчунин, ҳангоми пешгӯии резонанс ба назар гирифтани қиматҳои меъёрии нишондиҳандаҳои СЭЭ зарур аст. Дар ин робита, интихоб ва такмили усулҳои пешгӯии реҷаҳои резонансӣ дар марҳилаи лоиҳакашӣ ва истифодабарии НЭТ ба вазифаи дорои аҳамияти муҳим табдил меёбад.

3.2 Шакли матритсавии тавсифи муодилаи ҳолати шабакаҳои электрикӣ

Конфигуратсияи нақшаи бадалии системаи электрикиро метавон дар шакли граф тасвир кард. Назарияи графҳо муфассал дар кори [79] оварда шудааст. Барои графи дилхоҳи шабакаи электрикӣ муайян кардани матритсаи пайвастшавии шохаҳо дар гиреҳҳо (M_Σ) ва матритсаи пайвастшавии шохаҳо дар

контурҳои новобаста (N) имконпазир аст, ки онҳо барои тасвири таҳлилии умумикардашудаи граф хизмат кунанд [79 – 81].

Аз ин рӯ, маълумоти мухтасарро барои тартиб додани матритсаҳои зикршуда новобаста аз мураккабии конфигуратсияи шабакаҳои электрикӣ меорем. Матритсаи пайвастшавии шохаҳо дар гиреҳҳо ин матритсаи росткунҷаест, ки шумораи сатрҳои он бояд ба шумораи қуллаҳои граф (n) ва шумораи сутунҳои он ба шумораи теғаҳо (m) баробар бошад. Он ба таври зерин ишора карда мешавад:

$$M_{\Sigma} = \left(m_{ij}\right), \quad i = 1,\ 2, \ldots n;\ \ j = 1,\ 2, \ldots m. \tag{3.2}$$

Дар ин ҳолат, рақамҳои сатрҳои i ба рақамҳои қуллаҳо ва рақамҳои сутунҳои j ба рақамҳои теғаҳо мувофиқат мекунад. Элементҳои матритсаи M_{Σ} метавонанд яке аз ин се қиматҳоро қабул кунанд:

m_{ij} = + 1, агар гиреҳи i қуллаи ибтидоии шохаи j бошад;

m_{ij} = – 1, агар гиреҳи i қуллаи ниҳоии шохаи j бошад;

m_{ij} = 0, агар гиреҳи i қуллаи шохаи j набошад.

Ҳар як сатри матритсаи M_{Σ} нишон медиҳад, ки шохаҳои мувофиқ бо кадом қуллаҳо ба гиреҳи додашудаи нақша пайваст мешаванд ва ҳар як сутун нишон медиҳад, ки кадом гиреҳҳо қуллаҳои ибтидоӣ ва интиҳоии шохаи додашуда мебошанд. Яъне дар ҳар як сутуни матритсаи M_{Σ} танҳо як воҳиди мусбат ва як воҳиди манфӣ мавҷуд буда, элементҳои боқимонда сифр мебошанд. Бинобар ин, агар матритсаи M_{Σ} – ро ба матритсаи сатрии воҳидӣ (n_t) зарб кунем, матритсаи сифрӣ (сатрӣ) ҳосил мешавад, яъне:

$$n_t \cdot M_{\Sigma} = 0 \tag{3.3}$$

Ҳангоми ҳисобкунии реҷаҳои кори шабака, одатан, ҳисобкунӣ нисбат ба як гиреҳ – гиреҳи базавӣ (асосӣ) иҷро карда мешавад. Бинобар ин, матритсаи M_{Σ} – ро метавон ба ду қисм: матритсаи $M_{Б}$ ва M тақсим кард. Бо назардошти тақсими матритсаи M_{Σ} ба ду қисм, муодилаи (3.3) чунин шакл мегирад:

$$[n_t 1] \times \begin{bmatrix} M \\ M_{\text{м}} \end{bmatrix} \tag{3.4}$$

ва ё $$M_{\text{Б}} = -n_t \cdot M \tag{3.5}$$

дар ин ҷо: M — матритсаи пайвастшавӣ барои нақшаи бе гиреҳи балансӣ; $M_{\text{Б}}$ – матритсаи пайвастшавӣ барои гиреҳи балансӣ.

Барои ҳисобкуниҳои амалӣ истифодаи матритсаи M кифоя аст, ки он конфигуратсияи шабакаи электрикиро пурра тавсиф мекунад.

Матритсаи пайвастшавии шохаҳо дар контурҳои новобаста – ин матритсаи росткунҷаест, ки шумораи сатрҳои он ба шумораи контурҳои новобастаи граф k ва шумораи сутунҳои он ба шумораи шохаҳои он m баробар аст. Он ба таври зерин ишора мешавад:

$$N = \left(n_{ij}\right), \quad i = 1,\ 2, \ldots k; \quad j = 1,\ 2, \ldots n. \tag{3.6}$$

Дар ин ҳолат, рақамҳои сатрҳои i ба рақамҳои контурҳои новобаста ва рақамҳои сутунҳои j ба рақамҳои шохаҳо мувофиқат мекунанд. Элементҳои матритсаи N чунин муайян карда мешаванд:

$n_{ij} = +1$, агар шохаи j ба контури i дохил шавад ва самти шоха бо самти даврзании контур мувофиқат кунад;

$n_{ij} = -1$, агар шохаи j ба контури i дохил шавад, вале самти шоха ва даврзании контур муқобил бошанд;

$n_{ij} = 0$, агар шохаи j ба контури i дохил нашавад.

Дурустии матритсаи тартибдодашудаи N – ро метавон бо ёрии шарти зерин санҷид:

$$N \cdot M^T = 0 \tag{3.7}$$

дар ин ҷо: M^T – — матритсаи транспонированидашудаи M мебошад.

Ҳангоми ҳисобкунии реҷаҳои шабакаҳои электрикӣ матритсаҳои асосии нақшаҳои ивазкунии зерин истифода мешаванд [79]:

1. Матритсаи диагоналии муқовиматҳои шохаҳо:

$$Z_{\text{Ш}} = \begin{bmatrix} z_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & z_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & z_m \end{bmatrix}. \qquad (3.8)$$

дар ин ҷо: m – шумораи шохаҳои нақша.

2. Матритсаи диагоналии ноқилиятҳои шохаҳо:

$$Y = Z_{\text{Ш}}^{-1} = \begin{bmatrix} y_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & y_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/z_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1/z_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1/z_m \end{bmatrix}. \qquad (3.9)$$

3. Матритсаи ноқилиятҳои гиреҳӣ:

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{21} & \dots & y_{n1} \\ y_{12} & y_{22} & \dots & y_{n2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{1n} & y_{2n} & \dots & y_{nn} \end{bmatrix}. \qquad (3.10)$$

дар ин ҷо: сатри i-ум ба гиреҳи i-ум, сутуни j-ум ба гиреҳи j-ум мувофиқат мекунад ва шумораи сатрҳову сутунҳо ба шумораи гиреҳҳои нақша n баробар аст. Дар диагонали асосӣ ноқилиятҳои гиреҳии хусусӣ ҷойгир мешаванд, ки барои онҳо $i = j$ аст. Ҳар яке аз ин ноқилиятҳо ба ҷамъи ноқилиятҳои шохаҳое, ки ба ҳамон гиреҳи додашуда пайвастанд, (y_{ij}) баробар мебошад. Элементҳои боқимонда (ки барои онҳо $i \neq j$ аст) ноқилиятҳои байнигиреҳӣ (y_{ij}).мебошанд.

Матритсаи ноқилиятҳои гиреҳиро инчунин бо ёрии ифодаи зерин муайян кардан мумкин аст:

$$Y = M \cdot Y_{\text{Ш}} \cdot M^{\text{T}}. \qquad (3.11)$$

Матритсаи муқовиматҳои гиреҳӣ бошад, тавассути муайян кардани матритсаи баръакси ноқилиятҳои гиреҳӣ ҳисоб карда мешавад:

$$Z = Y^{-1}. \tag{3.12}$$

Формулаҳои овардашудаи (3.2) – (3.12)-ро ҳам барои тартиб додани матритсаи басомади асосӣ ва ҳам барои басомадҳои олӣ истифода бурдан мумкин аст.

Матритсаҳои M ва N имкон медиҳанд, ки муодилаҳои ҳолати занҷири электрикӣ дар шакли матритсавӣ навишта шаванд. Системаи муодилаҳои новобастаи қонуни якуми Кирхгоф метавонад дар шакли зерин пешниҳод карда шавад [79]:

$$M \cdot \dot{I} = \dot{J}, \tag{3.13}$$

дар ин ҷо: $\dot{I} = \left(\dot{I}_i\right),\ i = 1,\ldots,m;\ \dot{J} = \left(\dot{J}_i\right),\ i = 1,\ldots,n-1$ – мувофиқан сутунҳои ҷараёнҳо дар шохаҳо ва ҷараёнҳои додашуда дар гиреҳҳо мебошанд.

Ба ҳамин тартиб, системаи муодилаҳои новобастаи шиддатҳои қонуни дуюми Кирхгофро муайян мекунем:

$$N \cdot \dot{U}_{\text{Ш}} = 0, \tag{3.14}$$

дар ин ҷо: $\dot{U}_{\text{Ш}} = \left(\dot{U}_{\text{Ш}i}\right),\ i = 1,\ldots,m$ – сутуни афтиши шиддатҳо дар шохаҳои шабака мебошад.

Бо истифода аз қонуни Ом барои шохаҳои нақшаи бадалӣ ($U_{\text{Ш}} = Z_{\text{Ш}} \cdot I$) муодилаи (3.13)-ро дар шакли зерин менависем:

$$N \cdot \left(Z_{\text{Ш}} \cdot \dot{I}\right) = 0, \tag{3.15}$$

Бо муттаҳид намудани муодилаҳои матритсавии (3.13) ва (3.15) ба як системаи умумӣ, муодилаи умумикардашудаи ҳолати шабакаи электрикиро новобаста аз конфигуратсия ва шумораи элементҳои он ҳосил мекунем:

$$\begin{cases} M \cdot \dot{I} = \dot{J}; \\ N \cdot Z_{\text{Ш}} \cdot \dot{I} = 0. \end{cases} \tag{3.16}$$

Ҳамин тариқ, муодилаи умумикардашудаи ҳолати шабакаи электрикиро дар шакли матритсавӣ ҳосил мекунем:

$$A \cdot \dot{I} = \dot{F}. \tag{3.17}$$

дар ин ҷо: $A = \begin{bmatrix} M \\ N \cdot Z_{\text{Ш}} \end{bmatrix}$ ва $\dot{F} = \begin{bmatrix} \dot{J} \\ 0 \end{bmatrix}$ матритсаҳое мебошанд, ки вобаста ба параметрҳои ибтидоии реҷа ва конфигуратсияи шабакаи электрикӣ муайян карда мешаванд.

Муодилаи умумикардашудаи ҳолати шабакаи электрикӣ (3.17)-ро метавон ҳам барои басомади асосӣ ва ҳам барои басомадҳои олӣ навишт.

3.3 Мукаммалсозии усули пешгӯии ҳодисаҳои резонансӣ дар гиреҳҳои шабакаҳои электрикии дорои бори ғайрихаттӣ

Бо мақсади осон кардани баҳодиҳии ҳодисаи резонанс дар шабакаҳо, таносуби байни муқовимати гиреҳӣ дар басомади резонансӣ ва муқовиматро дар басомади асосӣ ҳамчун зариби пешгӯишавандаи бавуҷудоии резонанс (ЗПБР) дар гармоникаи тартиби n-ум қабул мекунем:

$$K_{\text{р}(n)} = \frac{Z_{\text{г}(n)}}{Z_{\text{г}(1)}} \tag{3.18}$$

Дар ин ҷо: $Z_{\text{г}(1)}$ – муқовимати гиреҳӣ дар гармоникаи асосӣ ва $Z_{\text{г}(n)}$ – муқовимати гиреҳӣ дар гармоникаи n – ум дар реҷаи муътадил мебошанд.

Барои муқоисаи натиҷаҳои ҳисоби ЗПБР муайян кардани қимати меъёрии он зарур аст. Барои ин, аввал лозим аст, ки қиматҳои меъёрӣ барои ҳар як гармоника муайян карда шаванд:

$$K_{\text{г}(n)\text{чоиз}} = \frac{U_{(n)\text{чоиз}}}{I_{(n)\text{чоиз}}} \qquad (3.19)$$

дар ин ҷо, $U_{(n)\text{чоиз}}$ – қимати меъёрии шиддати гармоникаи n – ум мувофиқи [1]; $I_{(n)\text{чоиз}}$ – қимати меъёрии ҷараёни гармоникаи n – ум мувофиқи [40].

Бо назардошти баробарии (3.18) қимати меъёрии ЗПБР -ро дар басомадҳои олӣ муайян мекунем:

$$K_{\text{р}(n)\text{чоиз}} = \frac{Z_{\text{г}(n)\text{чоиз}}}{Z_{\text{г}(1)}} \qquad (3.20)$$

Қимати меъёрии ташкилдиҳандаи гармоникаи *n* – уми ҷараён дар шабакаи электрикӣ вобаста аз тавоноии максималии интиқолшаванда ва дараҷаи шиддат муайян карда мешавад:

$$I_{(n)\text{чоиз}} = \frac{I_{\text{м}(1)} \cdot K_{I(n)}}{100} = \frac{\text{Р}_{\text{таб}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \cos\varphi_{\text{ном}}} \cdot \frac{K_{I(n)}}{100} \qquad (3.21)$$

дар ин ҷо, $I_{\text{м}(1)}$ – қимати максималии ҷараёни гармоникаи якуми хати интиқоли барқ, ки вобаста аз тавоноии табиии интиқолшавандаи ХИБ ($\text{Р}_{\text{таб}}$) муайян мегардад; $K_{I(n)}$ – қимати ҷоизи зарибҳои ташкилдиҳандаи гармоникаи n-уми ҷараён дар шабакаҳои электрикӣ; $U_{\text{ном}}$ – шиддати номиналии шабака.

Мувофиқи равиши пешниҳодшуда дар сурати мавҷуд будани гармоникаҳои олии ҷараён, резонанс ҳангоми иҷро шудани шарти зерин ба вуҷуд меояд:

$$K_{\text{р}(n)\text{чоиз}} \le K_{\text{р}(n)} \qquad (3.22)$$

Агар дар шабакаи таҳқиқшаванда манбаъҳои гармоникаҳои олӣ дар басомадҳое мавҷуд бошанд, ки дар онҳо резонанс имконпазир аст, қиматҳои гармоникаҳои олии ҷараён ва гармоникаҳои олии шиддат ба нишондиҳандаҳои

калон мерасанд, ки ин метавонад боиси аз кор баромадани элементҳои шабака гардад [2].

3.4 Алгоритми муайянкунии эҳтимолияти ба вуҷуд омадани ҳодисаҳои резонанс дар шабакаҳои электрикӣ

Маълум аст, ки ҳангоми пайвасти параллелӣ элементҳои индуктивӣ ва ғунҷоишӣ резонанс дар ҳолати иҷро шудани шарти (1.6) амалӣ мешавад. Дар шабакаҳои электрикӣ элементҳои индуктивӣ аз хатҳои интиқоли барқ, печаҳои трансформаторҳо, реакторҳои ҷараёнмаҳдудкунанда ва дигар элементҳое иборатанд, ки одатан, ба таври пайдарпай пайваст мешаванд. Элементҳои ғунҷоишӣ бошад, аз ноқилияти ғунҷоишии хатҳои интиқоли барқи ҳавоӣ ва кабелӣ, батареяҳои конденсаторҳои статикӣ ва дигар элементҳо иборатанд. Бинобар ин, ҳангоми мавҷуд будани манбаъҳои гармоникаҳои олӣ дар шабака, эҳтимолияти ба вуҷуд омадани резонанс дар басомадҳои аз басомади асосӣ фарқкунанда мавҷуд аст. Дар ин асос, барои баҳодиҳии пурраи реҷаҳои резонансии шабака таҳлили тавсифҳои басомадии шабакаи электрикӣ зарур мебошад. Дар ин кор алгоритми баҳодиҳии имкони ба вуҷуд омадани реҷаҳои резонансии шабака новобаста аз конфигуратсия ва мураккабии нақша пешниҳод шудааст.

Алгоритм дар расми 3.1 оварда шудааст, ки дар он пайдарпайи кори он чунин мебошад:

1. Дар шабакаи электрикии дилхоҳ шумораи гиреҳҳо, элементҳо ва конфигуратсияи шабака муайян карда мешавад;
2. Нақшаи бадалии шабакаи таҳқиқшаванда тартиб дода шуда, параметрҳои нақшаи бадалии барои басомадҳои асосӣ ва олӣ муайян карда мешаванд;
3. Дар асоси нақшаи бадалӣ графи шабакаи таҳқиқшаванда тартиб дода мешавад;
4. Дар асоси формулаҳои (3.2) – (3.6) матритсаҳои $M_{\sum}$, M, $M_{б}$ ва N, тартиб дода мешаванд, ки дурустии онҳо мувофиқи шартҳои (3.5) ва (3.7)

санҷида мешавад. Агар шартҳои (3.5) ва (3.7) иҷро нагарданд, ислоҳ намудани нақшаи электрикии шабака зарур аст ва аз нав санҷидани дурустии матритсаҳои вобастагии гиреҳҳо ва шохаҳо (M), инчунин шохаҳо ва контурҳои новобаста (N) талаб карда мешавад;

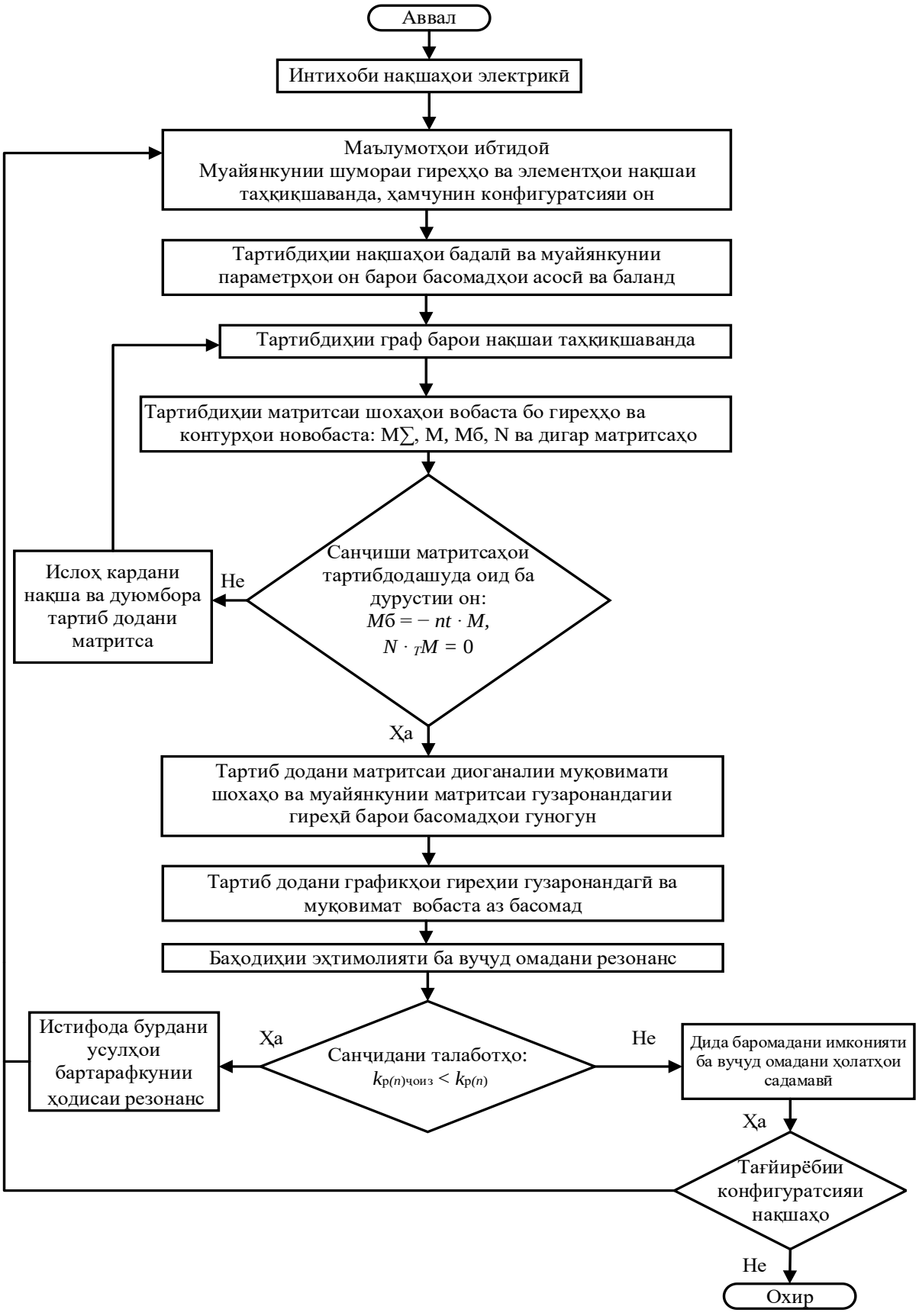
5. Ҳангоми иҷро шудани шартҳои (3.5) ва (3.7), барои нақшаи таҳқиқшаванда матритсаи диагоналии муқовиматҳои шохаҳо, матритсаҳои гиреҳӣ, ноқилият ва муқовимат барои басомади асосӣ ва дигар басомадҳо мувофиқи ифодаҳои (3.8), (3.11) ва (3.12) тартиб дода мешаванд;

6. Графикҳои вобастагии ноқилият ва муқовимати гиреҳӣ аз басомад тартиб дода мешаванд;

7. Баҳодиҳии эҳтимолияти пайдоиши ҳодисаҳои резонансӣ дар шабакаи таҳқиқшаванда мувофиқи шарти (3.22) гузаронида мешавад. Ҳангоми иҷро шудани шарти (3.22), усулҳои бартараф кардани ҳодисаҳои резонансӣ дар шабакаҳои электрикӣ истифода мешаванд ва ҳисобкунии алгоритм аз нав такрор меёбад;

8. Ҳангоми иҷро нашудани шарти (3.22) эҳтимолияти пайдоиши ҳолатҳои садамавӣ дар нақшаи таҳқиқшаванда ва тағйирёбии конфигуратсияи нақша (хомушшавӣ ё пайвастшавии элементҳои шабакаи электрикӣ) баррасӣ мешаванд. Ҳангоми тағйир ёфтани конфигуратсияи нақша, ҳисобкунӣ тибқи алгоритм аз нав такрор мешавад дар ҳолати баръакс ҳисобкунӣ ба анҷом мерасад.

Ҳамин тариқ, метавон хулоса кард, ки резонанс дар шабакаҳои электрикӣ дар сурати иҷро шудани шартҳои (1.5) ва ё (1.6) ба вуҷуд меояд, ҳамзамон дар нақшаи электрикӣ бояд манбаи гармоникаҳои олӣ мавҷуд бошад, ки басомади он ба басомади резонансӣ баробар ва ё наздик аст. Ҳангоми тағйир ёфтани конфигуратсияи нақшаи электрикӣ эҳтимолияти тағйир ёфтани басомади резонансӣ вуҷуд дорад.



Расми 3.1. – Алгоритми муайянкунии эҳтимолияти ба вуҷуд омадани ҳодисаҳои резонанс дар шабакаҳои электрикӣ

Дар асоси алгоритми пешниҳодшуда, барнома барои мошинаҳои электронии ҳисоббарор (МЭҲ) таҳти номи «Барнома барои таҳлил ва муайян кардани гирεҳҳо дар СЭ, ки дар онҳо ҳодисаҳои резонансӣ имконпазиранд» (рақами бақайдгирии барнома дар «Феҳристи барномаҳо барои МЭҲ № 2025685699, аз 25 сентябри соли 2025) коркард карда шуд, ки эҳтимолияти ба вуҷуд омадани резонансро дар шабакаҳои электрикӣ муайян мекунад [12-М].

3.5 Намунаи ҳисобкунии реҷаҳои резонансии нақшаи электрикӣ дар асоси усули коркардшуда

Ҳамчун намуна натиҷаҳои пешгӯии эҳтимолияти ба вуҷуд омадани резонанс дар қисми ҷанубии СЭ-и Ҷумҳурии Тоҷикистон (расми 2.4) тибқи барномаи таҳияшуда оварда мешавад. Маълумоти ибтидоӣ барои ҳисобкунӣ дар ҷадвали 2.3 оварда шудаанд.

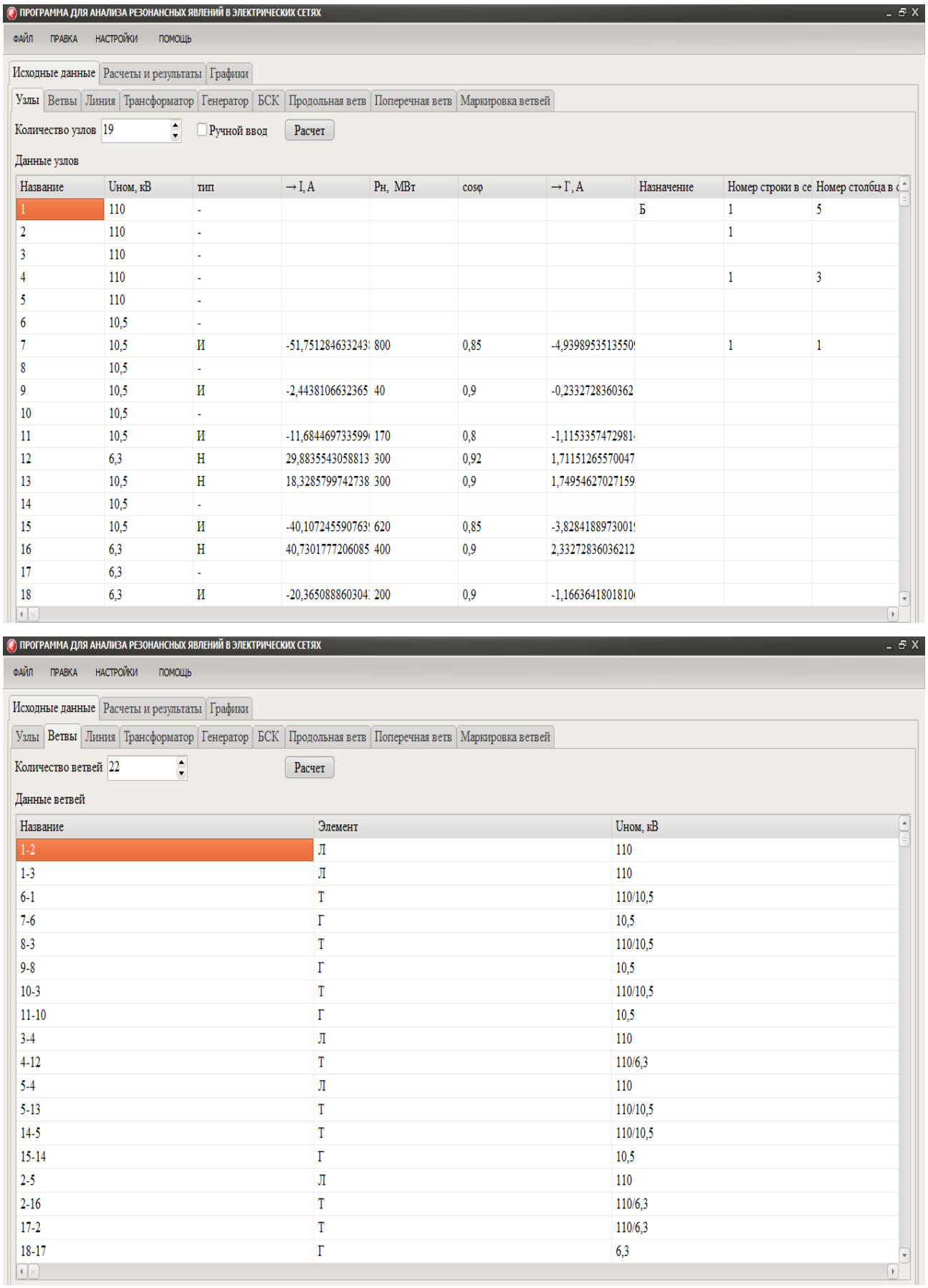
Равзанаи воридкунии маълумот дар барнома дар расми 3.2 оварда шудааст.

Графи қисми таҳқиқшавандаи СЭ-и ҶТдар расми 3.3 оварда шудааст.

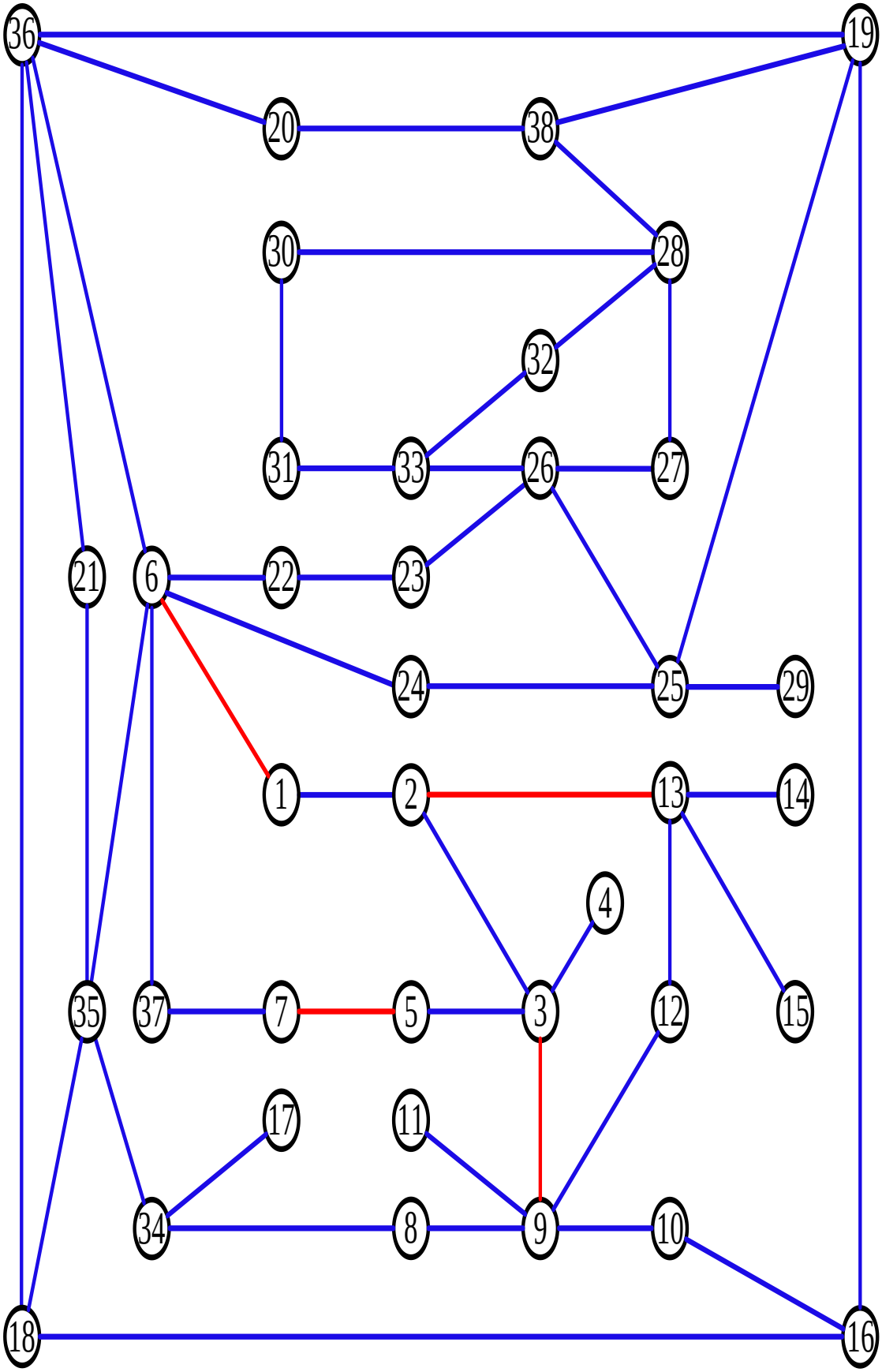
Мувофиқи (3.12), қиматҳои муқовиматҳои гирεҳӣ барои гармоникаи асосӣ муайян карда шуданд, ки онҳо барои ҳамаи гирεҳҳои нақшаи қисми таҳқиқшаванда дар шакли графикӣ нишон дода шудаанд. Натиҷаҳои аз барнома бадастомада бо натиҷаҳои аз модел бадастомада муқоиса карда шуданд (расми 3.4).

Барои нақшаи таҳқиқшаванда (расми 2.4) тавсифоти амплитудавии басомадӣ барои гирεҳҳои хоси нақша (расмҳои 2.7 ва 2.8) сохта шудаанд.

Мувофиқи муодилаҳои (3.18) – (3.20) зариби пешгӯишавандаи бавуҷудоии резонанс муайян карда шуда, аз рӯи шарти (3.22) санҷиш гузаронида шуд. Натиҷаҳои ҳисобкуниҳо барои гирεҳҳои 1 – 5 дар ҷадвали 3.2 оварда шудаанд. Бо ранги хокистарӣ дар ҷадвал қиматҳои ЗПБР дар он гармоникаҳое ҷудо карда шудаанд, ки дар онҳо имконияти ба вуҷуд омадани резонанс мавҷуд аст (гузаштан аз қимати ҷоизӣ мувофиқи шарти (24)). Барои гирεҳҳои боқимонда қиматҳои ЗПБР ба ҳамин тартиб мувофиқи алгоритми пешниҳодшуда муайян карда мешаванд.



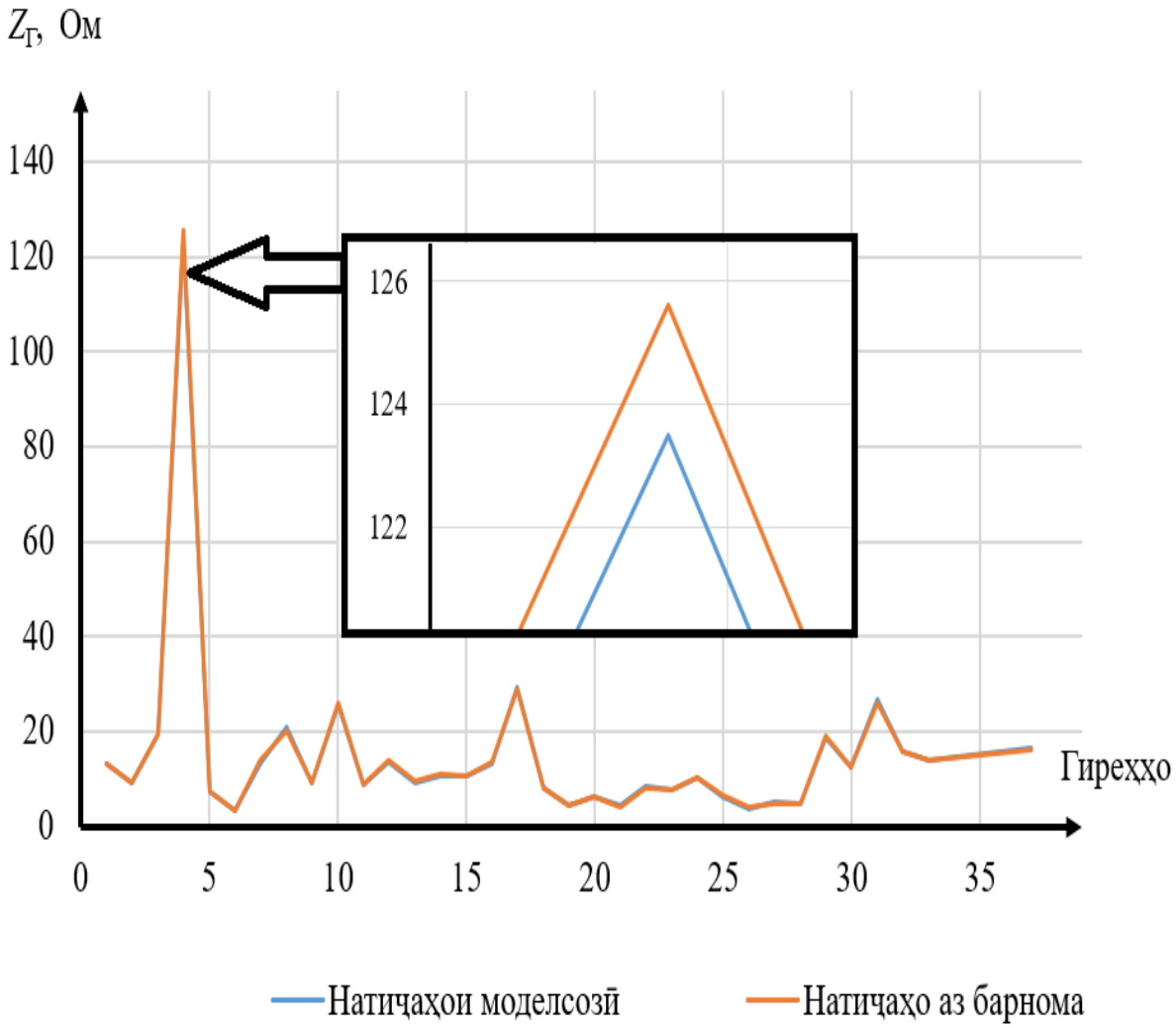
Расми 3.2. – Равзанаи воридкунии маълумоти ибтидоии барнома барои ҳисобкунии ҳодисаҳои резонансӣ дар шабакаҳои электрикӣ



Бо хатҳои ранги сурх автотрансформаторҳо ва бо

хатҳои ранги кабуд хатҳои интиқоли барқ нишон дода шудаанд.

Расми 3.3. – Графи қисми таҳқиқшавандаи СЭЭ ҶТ

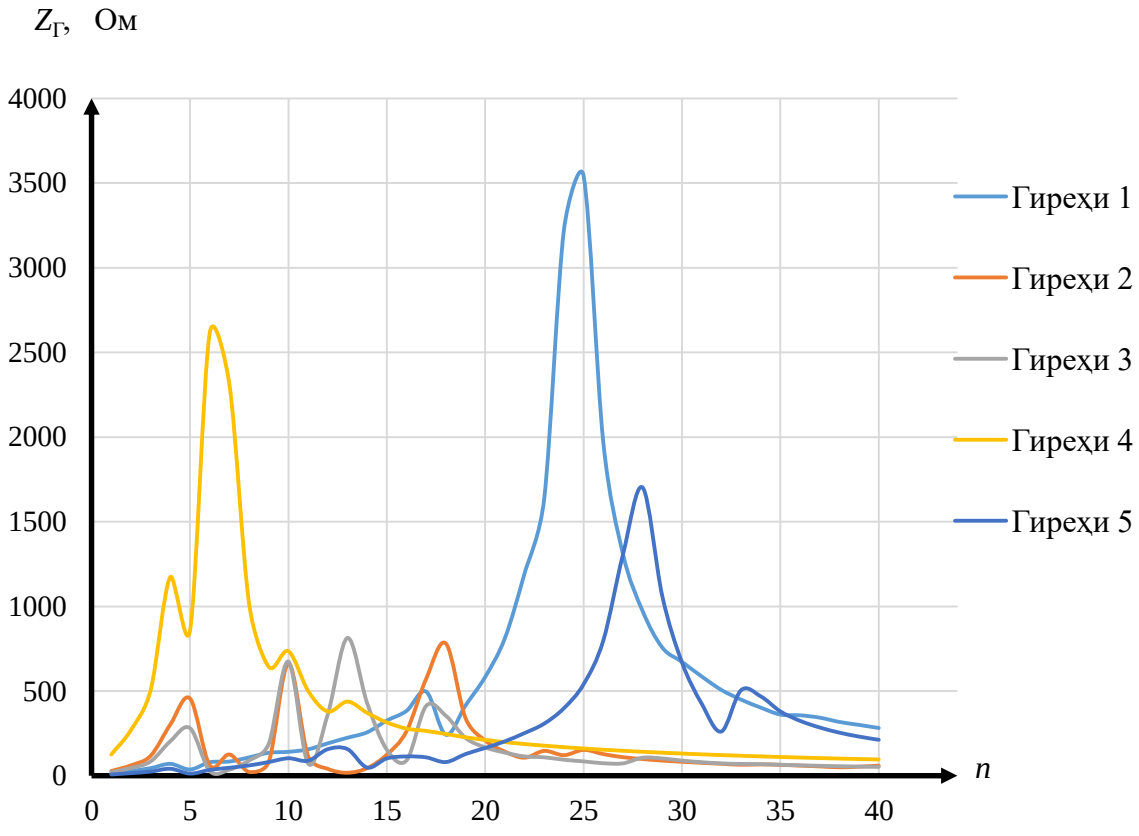


Расми 3.4. – Муқовиматҳои гирехии хусусии ҳамаи гирехҳо дар қисми таҳқиқшавандаи СЭЭ-и Ҷумҳурии Тоҷикистон (барои басомади 50 Ҳс)

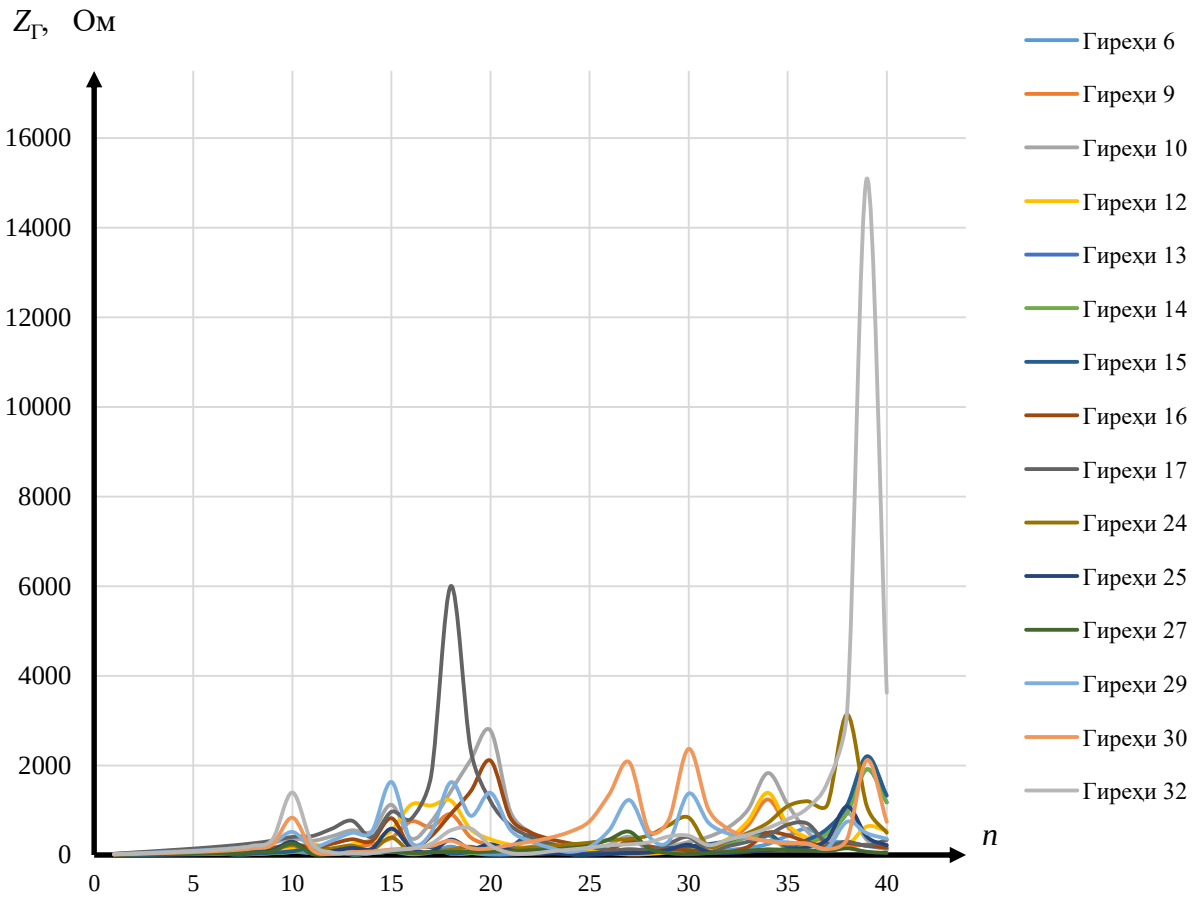
Мувофиқи ҷадвали 3.2, дар реҷаи муътадил ҳолатҳои зерин мушоҳида карда мешаванд: дар гирехи 1 эҳтимолияти ба вуҷуд омадани резонанс дар гармоникаи тартиби 19 вуҷуд дорад, зеро қимати ЗПБР аз қимати ҷоизӣ зиёд аст (35-ро ташкил медиҳад, дар ҳоле ки меъёр 29 аст); дар гирехи 2 эҳтимолияти ба вуҷуд омадани резонанс ошкор нашудааст; дар гирехи 3 эҳтимолияти ба вуҷуд омадани резонанс барои гармоникаи тартиби 5 муайян шудааст; дар гирехи 4 – барои гармоникаҳои 5, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35 ва 37 ва ниҳоят, дар гирехи 5 барои гармоникаҳои 5, 7, 11 ва 13.

Ҷадвали 3.2. - Қиматҳои ҷоизӣ ва ҳисобии ЗПБР дар реҷаҳои муътадил ва баъдисадамавӣ (ҷудо кардани як занҷири хати 1–2) барои гиреҳҳои 1 – 5

Реҷаҳои кор	Гиреҳҳо	Гармоникаҳо											
		5	**7**	**11**	**13**	**17**	**19**	**23**	**25**	**29**	**31**	**35**	**37**
Реҷаи муътадил	1	18	3	5	17	13	35	64	32	17	15	11	10
	2	31	5	12	2	14	7	18	2	13	21	16	52
	3	48	1	32	2	18	9	6	4	5	4	3	3
	4	14	6	6	16	10	19	41	73	143	58	52	39
	5	56	20	5	3	2	2	1	1	1	1	1	1
Ҷудо кардани як занҷири хати 1–2	1	1	3	6	12	17	37	31	123	265	57	44	27
	2	3	49	14	13	2	62	37	16	17	10	8	7
	3	1	14	2	4	42	21	11	6	4	5	4	3
	4	1	2	6	12	21	15	17	42	73	144	58	52
	5	1	7	19	4	4	2	2	1	1	1	1	1
Қимати ҷоизии ЗПБР $K_{р(п)ҷоизӣ}$, в.н.	1	41	28	55	39	37	29	73	73	73	73	147	147
	2	60	40	80	56	53	43	106	106	106	106	213	213
	3	28	19	38	26	25	20	50	50	50	50	100	100
	4	5	8	18	4	7	3	3	2	1	2	5	7
	5	0,1	0,1	1	1	2	2	6	6	7	8	18	19



Расми 3.5. – ТАБ-и гиреҳҳои 500 кВ-и нақшаи таҳқиқшаванда дар реҷаи баъдисадамавӣ (ҷудо кардани як занҷири хати 1–2)



Расми 3.6. – ТАБ-и гирехҳои хоси 220 кВ-и нақшаи таҳқиқшаванда дар реҷаи баъдисадамавӣ (ҷудо кардани як занҷири хати 1–2)

Барои баҳодиҳии пурра, инчунин реҷаҳои кории баъдисадамавии нақшаи таҳқиқшаванда, ки ҳангоми тағйир ёфтани конфигуратсия (ҷудо шудани яке аз занҷирҳои хати интиқоли барқи 1–2) ба амал меоянд, дида баромада мешаванд. Графикҳо барои реҷаи баъдисадамавӣ (БСА) дар расмҳои 3.5 ва 3.6 оварда шудаанд.

Тавре ки аз графикҳои расмҳои 3.5 ва 3.6, инчунин аз ҷадвали 3.2 бармеояд, ҳангоми ҷудо шудани як занҷири хати 1–2 дар нақшаи электрикӣ (расми 2.4), гирехҳои 4 ва 5 нисбат ба гирехҳои дигар ҳассостарин ба шумор мераванд. ЗПБР дар ин реҷа қиматҳои зайлро қабул мекунад: дар гирехи 1 барои гармоникаҳои тартиби 19, 25 ва 29 мувофиқан $K_{р(19)}$ = 37, $K_{р(25)}$ = 123 ва $K_{р(29)}$ = 265; дар гирехи 2 барои гармоникаҳои тартиби 7 ва 19 мувофиқан $K_{р(7)}$ = 49 ва $K_{р(19)}$ = 62; дар гирехи 3 барои гармоникаҳои тартиби 17 ва 19 мувофиқан $K_{р(17)}$ = 42 и $K_{р(19)}$ = 21,

инчунин дар реҷаи мазкур қиматҳои ЗПБР аз қимати ҷоизӣ дар гиреҳи 4 ($K_{р(13)}$ = 12; $K_{р(17)}$ = 21; $K_{р(19)}$ = 15; $K_{р(23)}$ = 17; $K_{р(25)}$ = 42; $K_{р(29)}$ = 73; $K_{р(31)}$ = 144; $K_{р(35)}$ = 58 и $K_{р(37)}$ = 52) ва дар гиреҳи 5 ($K_{р(5)}$ = 1; $K_{р(7)}$ = 7; $K_{р(11)}$ = 19; $K_{р(13)}$ = 4 и $K_{р(17)}$ = 4) боло мераванд. Омилҳои номбаршуда гувоҳи он мебошанд, ки дар гиреҳҳои мавриди баррасӣ эҳтимолияти ба вуҷуд омадани резонанс дар гармоникаҳои қайдшуда вуҷуд дорад. Нишондиҳандаҳои ҷоизӣ ва ҳисобии ЗПБР дар реҷаи муътадил барои гиреҳҳои боқимондаи нақшаи таҳқиқшаванда дар ҷадвалҳои 3.2.1 – 3.2.4 оварда шудаанд.

Дар асоси таҳлили гузаронидашуда бартариҳои зерини усули коркардшуда дар муқоиса нисбат ба усулҳои анъанавии мавҷуда, ки дар ҷадвали 3.3 оварда шудаанд, муайян карда шуданд.

Ҷадвали 3.3. – Муқоисаи усули коркардшуда бо усулҳои анъанавӣ

Меъёрҳои муқоиса	**Усулҳои анъанавӣ (Нусхабардории басомадӣ ва таҳлили модалӣ)**	**Усули коркардшуда (Усули ЗПБР)**
Асоси математикӣ	Ҷустуҷӯи қиматҳои калонтарин дар графики муқовиматҳои гиреҳии $Z_{(f)}$ ва ё ҷустуҷӯи $\lvert Y\rvert = 0$	Ҳисобкунии зариби беандозаи нисбӣ: $K_{р} = Z_{(n)} / Z_{(1)}$
Баҳодиҳии хатар	Баҳодиҳии сифатӣ (таҳлили аёнии (визуалии) график: «нуқтаи қуллавӣ ҳаст – резонанс ҳаст»).	Миқдорӣ (иҷрои қатъии шарти) $K_{р} > K_{р.\ чоиз}$
Мутобиқат ба талаботи меъёрӣ	Ғайримустақим (лозим аст шиддатҳоро алоҳида ҳисоб кард ва бо ГОСТ муқоиса намуд)	Ҳадди амалкунӣ $K_{р.\ чоиз}$ аллакай сатҳҳои ҷоизро мувофиқи стандартҳои меъёрӣ дар бар мегирад.
Ба назар гирифтани параметрҳои шабака	Топологияи устувор бидуни вобастагӣ ба тавоноии интиқолшаванда	Ба назар гирифтани тавоноии табиӣ ($P_{таб.}$) ва сербории ҷории элементҳои шабака тавассути ҷараёни гармоникаи асосӣ
Натиҷаи таҳлил	Тасдиқи мавҷудияти басомади резонансӣ	Пешгӯии бавуҷудоии реҷаи садамавӣ ҳангоми мавҷудияти манбаи мушаххаси гармоникаҳо
Душворӣ барои муҳандис	Тафсири коршиносии графикҳо ва маҷмуи барномаҳои мураккабро талаб мекунад	Ҳисоби санҷишии автоматикунонидашуда аз рӯйи меъёри аниқ (ҷоиз ва ё ноҷоиз).

Мувофиқи ҷадвали 3.3 дида мешавад, ки усули пешниҳодшуда аз рӯйи ҳамаи меъёрҳои муқоиса афзалтар нисбат ба усулҳои анъанавӣ мебошад.

Муаллиф пешниҳод менамояд, ки ҳангоми лоиҳакашӣ ва истифодабарии шабакаҳои электрикӣ барои меъёрбандии сифати энергияи электрикӣ эҳтимолияти бавуҷудоии ҳодисаҳои резонансӣ ба назар гирифта шавад. Барои баҳодиҳии эҳтимолияти бавуҷудоии резонанс дар шабакаҳои электрикӣ бо назардошти тамоми вариантҳои имконпазири реҷаҳои кори онҳо, равиши пешниҳодшуда имкон медиҳад, ки ҳалли зарурӣ ба даст оварда шавад.

3.6 Хулосаҳо оид ба боби сеюм

1. Нишон дода шудааст, ки равишҳои анъанавӣ (тасвирбардории басомадӣ, таҳлили моделӣ) танҳо баҳодиҳии сифатиро («далели мавҷудияти қулла») пешниҳод мекунанд ва бо талаботи меъёрӣ ба сифати энергияи электрикӣ пайвастагии мустақим надоранд, дар ҳоле ки миқёси зуҳури резонанс ба ҳузури манбаъҳои гармоникаҳои олӣ дар гирехи мушаххас вобастагии сахт дорад. Ҳамчунин нишон дода шудааст, ки барои таҳқиқи реҷаҳои ғайрисинусоидалии шабакаҳои мураккаби электрикӣ истифодаи шакли матритсавии тавсифи муодилаҳои ҳолати шабака ба мақсад мувофиқ аст;

2. Меъёри нави миқдорӣ, яъне зариби пешгӯишавандаи бавуҷудоии резонанс ($K_р$), пешниҳод ва аз нуқтаи назари математикӣ тавсиф карда шудааст. Бартарияти ЗПБР дар он аст, ки он пайвастагии мустақим бо стандартҳои меъёрии амалкунанда дорад, инчунин ин зариб ҳадди ҳисобӣ аз синфи шиддат, сатҳҳои ҷоизи таҳрифҳо ва параметрҳои реҷаи шабакаро бевосита ба назар мегирад;

3. Дар асоси равиши пешниҳодшуда алгоритм ва барномаи компютерӣ коркард карда шудаанд. Бартарияти барномаи мазкур дар он аст, ки имконияти пешниҳоди натиҷаҳоро ҳам дар шакли графикӣ ва ҳам ҷадвалӣ бо муқоисаи худкори қиматҳои ҳисобшуда бо қиматҳои ҷоизӣ барои ҳар як гирех медиҳад. Натиҷаҳои моделкунии рақамии реҷаҳои резонансӣ дар мисоли қисмати ҷанубии СЭ ҶТ, ки самарабахшии усули коркардшударо тасдиқ менамоянд, пешниҳод гардидаанд;

4. Санҷиши амалии усул дар мисоли қисмати ҷанубии СЭ Ҷумҳурии Тоҷикистон гузаронида шуд. Ҳисобҳо ҳассосияти баланди усули таҳияшударо нисбат ба тағйирёбии топологияи шабака исбот намуданд: дар реҷаҳои муқаррарӣ ва пас аз садамавӣ (ҳангоми хомуш кардани занҷири ХИБ 1-2) гиреҳҳои аз ҳама осебпазир (4 ва 5) ва тартибҳои хавфноки мушаххаси гармоникаҳо (аз 5-ум то 37-ум) дақиқ муайян карда шуданд, ки ин имкон медиҳад, ДФҶ самаранок насб карда шаванд.

БОБИ 4. ҲОДИСАИ РЕЗОНАНСӢ ВА ПЕШГИРИИ ХАВФҲОИ ОН ҲАНГОМИ БЕҲИНСОЗИИ БИСЁРМЕЪЁРИИ ҶОЙГИРКУНИИ ДАСТГОҲҲОИ ҶУБРОНКУНАНДА БО ИСТИФОДА АЗ АЛГОРИТМҲОИ МЕТАЭВРИСТИКӢ

4.1 Баррасии усулҳои беҳинсозии интихоби ҷойи насби дастгоҳи ҷубронкунанда дар шабакаҳои электрикӣ

Дар шароити муосири истифодабарии шабакаҳои электрикӣ, махсусан ҳангоми мавҷуд будани борҳои пуриқтидори ғайрихаттӣ, таъмини сатҳи талабшудаи сифати энергияи электрикӣ ва кам гардонидани талафоти тавоноии фаъол тавассути насби манбаъҳои тавоноии ғайрифаъол (МТҒ) ба даст оварда мешавад. Интихоби тавоноӣ ва ҷойҳои насби дастгоҳи ҷубронкунанда (ДҶ) масъалаи мураккаби бисёрмеъёрӣ мебошад, ки ба назар гирифтани нишондиҳандаҳои техникӣ ва иқтисодиро талаб мекунад.

Дар хориҷа барои ҳалли масъалаҳои ҷойгиркунии беҳтарин алгоритмҳои муосири метаэвристикӣ васеъ истифода мешаванд. Хусусан, дар корҳои [104 – 106] истифодаи алгоритми тӯдаи зарраҳо (АТЗ) ва алгоритми генетикӣ бо ҷудокунии ғайридоминантӣ (АГ бо ҶҒ) барои беҳинсозии бисёрҳадафа таҳқиқ шудааст. Ҳамчун функсияҳои ҳадафнок дар ин таҳқиқот кам кардани талафоти умумии тавоноии фаъол дар шабакаи тақсимотӣ ва кам кардани хароҷоти асосӣ барои насби батареяҳои конденсаторӣ муайян шудаанд.

Кори илмии Гил-Гонсалес В. ба усули барномасозии эҳтимолии (стохастикии) ададҳои бутуни омехта барои ҷойгиркунии компенсаторҳои статикӣ (СТАТКОМ) пешниҳод карда шудааст. Гил-Гонсалес В. қайд мекунад, ки «модели пешниҳодшуда усули табдилдиҳии барҷастаро дар асоси релаксатсияи маҳдудиятҳои гиперболикӣ истифода бурда, модели барномасозии ғайрихаттии омехтаро ба модели конвексӣ (муҳаддаб) табдил медиҳад. Табиати стохастикии энергияи барқароршаванда ва талабот дар ҳолатҳои сершумор бо се сатҳи гуногуни истеҳсол ва истеъмол ба назар гирифта шудааст. Модели пешниҳодшудаи SMIC талафоти интиқоли қувватнокии D-STATCOM-ҳоро бо

мақсади интихоби дурусти тавоноии онҳо илова менамояд. Дар модел ду ҳадаф бо мақсади камкунии хароҷоти солонаи насб ва истифодабарӣ баррасӣ мешаванд, ки онро бисёрҳадафа мегардонад. Се ҳолати моделсозӣ самаранокии модели конвексии стохастикиро дар муқоиса бо се ҳолат дар системаи умумии моделсозии алгебравӣ (GAMS) нишон медиҳанд. Натиҷа нишон медиҳад, ки модели пешниҳодшуда ба оптимуми глобалӣ дастрасӣ пайдо карда, хароҷоти солонаи истифодабариро мутаносибан барои системаҳои тестии 33-, 69- ва 85-гиреҳаи IEEE ба андозаи 29,25 %, 60,89 % ва 52,54 % коҳиш медиҳад» [107]. Дар мақола диққати асосӣ ба хусусияти эҳтимолии манбаъҳои тақсимшудаи МБЭ нигаронида шудааст, аммо ҳисоби реҷаҳо асосан дар басомади асосӣ бе назардошти спектри гармоникаҳои олӣ ва тавсифҳои басомадии муқовимат ба роҳ монда мешавад.

Дар манбаъҳои илмии рус ба асосноккунии техникӣ-иқтисодии татбиқи ДҶ бо назардошти талаботи қатъии стандарти [1] ба таври анъанавӣ таваҷҷуҳи зиёд зоҳир карда мешавад. Ҳамин тавр, Сидорова В.Т. дар кори илмиаш қайд мекунад, ки «ҳангоми ҳалли масъалаи беҳинсозӣ тавассути функсияи мақсади пешниҳодшуда нишондиҳандаҳои сифати энергияи электрикӣ (қиматҳои шиддат ва зариби ғайрисимметрии шиддат аз рӯи пайдарпайи сифрӣ K_{0U}) дар нуқтаҳои пайвастшавии истеъмолкунандагон дар ҳудудҳои ҷоизӣ нигоҳ дошта мешаванд. Дар кор натиҷаҳои таҳқиқи функсияи беҳинсозӣ дар мисоли шабакаи электрикӣ оварда шудаанд. Ҳисобҳо дар ду марҳала анҷом дода шудаанд: аввал ҷустуҷӯи гиреҳҳои сенсорӣ ва сипас, таҳқиқи онҳо барои оптималӣ. Тамоми ҳисобҳо дар муҳити MATLAB бо назардошти талафоти шиддат ва ҷараён иҷро карда шудаанд. Мувофиқи натиҷаҳои бадастомада бо истифода аз функсияи мақсади пешниҳодшуда талафоти тавоноӣ дар шабакаи таҳқиқшаванда метавонад то 19 % нисбат ба талафоти аввала кам карда шавад, ки ин ба сарфи назарраси молиявӣ оварда мерасонад» [108]. Дар асоси ин гуфтаҳо қайд намудан мумкин аст, ки усули беҳинсозии бисёрмеъёрӣ дар заминаи нишондиҳандаҳои интегралӣ пешниҳод шудааст, ки он талафоти шиддат, зариби ғайрисимметрӣ ва хароҷоти васлкунии дастгоҳҳоро ба як заминаи умумӣ дар бар мегирад [108]. Дар

таҳқиқоти [109] беҳинсозии ҷойгиркунии манбаъҳои тавоноии ғайрифаъол ва манбаъҳои барқароршавандаи энергия дар шабакаҳои радиалӣ бо мақсади кам кардани талафоти тавоноии фаъол баррасӣ мешавад.

Масъалаҳои интихоби бисёрмеъёрии ДҶФ барои шабакаҳои саноатӣ дар [110] ба таври муфассал инъикос ёфтаанд. Дар ин кор самаранокии кам кардани сатҳи гармоникаҳои каноникӣ (гармоникаҳое, ки аз рӯи қонуни муайян иваз мешавад ва танҳо гармоникаҳои ба гармоникаҳои асосӣ каратӣ иборат аст) аз табдилдиҳандаҳои вентилӣ ва беҳтар кардани зарибии тавоноӣ баҳодиҳӣ карда мешавад. Бо вуҷуди ин, баҳодиҳии хавфи лағшиши басомади резонанси хусусии шабака ҳангоми тағйир ёфтани конфигуратсияи нақша гузаронида нашудааст.

Бо вуҷуди самаранокии баланди усулҳои математикӣ ва эвристикии баррасишуда онҳо ҳангоми татбиқ дар реҷаҳои мураккаби кори системаҳои энергетикӣ дорои камбудии ҷиддӣ мебошанд. Насби батареяҳои конденсаторӣ ва дастгоҳҳои ҷубронкунанда ба таври куллӣ хусусиятҳои басомадии шабакаи электрикиро тағйир медиҳад. Дар гиреҳҳои шабака, ки борҳои пуриқтидор пайваст шудаанд, тағйирёбии муқовимати эквивалентӣ метавонад ба мувофиқ омадани басомади хусусии шабака бо басомади яке аз гармоникаҳои тавлидшаванда оварда расонад.

Дар баррасии пешниҳодшуда усулҳои бисёрмеъёрии мавҷуда ба ҳисобҳои статикӣ ва детерминистии (ҳисоби математикии саҳеҳ, ки ҳамаи маълумоти ибтидоӣ аз аввал мумкин аст ва натиҷаи он бо формулаҳои муайян аниқ карда мешавад) реҷаҳои барқароршуда таваҷҷуҳ мекунанд ва эҳтимолияти ба вуҷуд омадани резонансро ба назар намегиранд. Вобаста ба ин, барои зиёд кардани эътимоднокии таҷҳизоти электрикӣ коркарди усуле зарур аст, ки дар он ба ғайр аз сатҳи шиддат, талафоти тавоноии фаъол ва нишондиҳандаҳои иқтисодӣ, эҳтимолияти ба вуҷуд омадани ҳодисаҳои резонансиро дар шабакаҳои электрикии дорои борҳои ғайрихаттӣ ба назар гирифта шавад.

Муайян кардани хатари ба вуҷуд омадани резонанс танҳо марҳилаи аввали таъмини эътимоди электротаъминкунии истеъмолкунандагон ба шумор меравад. Дар шабакаҳои электрикӣ гиреҳҳое мавҷуданд, ки дар онҳо қимати шиддат аз

қимати ҷоизии ҳуҷҷати меъёрӣ [1] ё шароити талабшавандаи кори қабулкунакҳои барқӣ пасттар аст. Бинобар ин, барои таъмини СЭЭ ва паст кардани талафоти тавоноӣ, одатан, аз таҷҳизоти ҷубронкунанда ДҶ, бештар аз батареяҳои конденсаторҳои статикӣ истифода бурда мешавад. Масъалаи интихоби тавоноӣ ва ҷойи ҷойгиркунии БКС дар шабакаҳои тақсимотӣ ба масъалаи бисёрмеъёрӣ табдил меёбад, зеро зарур аст, ки ҳамзамон талафоти тавоноии фаъол (ΔP) кам карда шавад, сатҳи шиддат дар ҳудудҳои муайяншуда мувофиқи ҳуҷҷатҳои меъёрӣ нигоҳ дошта шавад ва инчунин аз эҳтимоли ба вуҷуд омадани резонанс дар басомадҳои гармоникаҳои мавҷуда пешгирӣ карда шавад.

Усулҳои беҳинсозии вуҷуддошта аксар вақт ҳангоми ҳалли чунин масъалаҳо бо сабаби баланд будани ҳаҷми шабакаҳои электрикӣ ва ғайрихаттӣ будани параметрҳои онҳо самарабахш нест. Дар айни замон усулҳои беҳинсозии метаэвристикӣ ба таври васеъ истифода мешаванд, ки онҳо ҳангоми ҷустуҷӯи оптимуми глобалӣ (ҳалли беҳтарин) дар фазоҳои мураккаби бисёрмеъёрӣ дорои самаранокии баланд мебошанд [111 – 113].

Кори мазкур ба рушди равиши комплексӣ барои беҳинсозии ҷойҳои насб ва тавоноии ДҶ дар шабакаҳои электрикӣ дорои бори ғайрихаттӣ бо назардошти эҳтимоли ба вуҷуд омадани ҳодисаҳои резонансӣ бахшида шудааст. Фарқияти асосии усули дар ин кор баррасишаванда дар он аст, ки бо ёрии натиҷаҳои қаблан бадастомада оид ба баҳодиҳии зариби пешгӯишавандаи бавуҷудоии резонанс дар гиреҳҳои хоси шабакаҳои электрикӣ дорои бори ғайрихаттӣ ҷойҳои беҳтарини насби ДҶ бо назардошти кам намудани талафоти тавоноӣ, нигоҳдории сатҳи шиддат дар гиреҳҳо мувофиқи [1] ва эҳтимоли ба вуҷуд омадани резонанс муайян карда мешаванд. Ҳангоми ҳисобкунӣ усулҳои беҳинсозии метаэвристик ба монанди усули тӯдаи зарраҳо (УТЗ), усули гургҳои хокистарӣ (УГХ) ва усули тӯдаи салпҳо (УТС) истифода мешаванд.

Объекти таҳқиқотӣ қисми ҷанубии СЭ-и Ҷумҳурии Тоҷикистон ба шумор меравад. Графи объекти таҳқиқот дар расми 3.3 нишон дода шудааст. Маълумотҳои ибтидоии нақшаи таҳқиқшаванда дар ҷадвали 2.3 оварда шудааст.

Нақшаи таҳқиқшаванда аз 9 манбаъ (неругоҳҳои барқӣ), 4 зеристгоҳи пасткунанда, 20 гиреҳи бор, инчунин 46 хати интиқоли барқи ҳавоӣ иборат аст, ки аз онҳо 4 хати интиқол бо шиддати 500 кВ ва 42 хати интиқол бо шиддати 220 кВ мебошанд. Дар нақшаи таҳқиқшаванда, дар гиреҳи 14 манбаи бузурги ТГОҶ (Ширкати алюминии тоҷик (ШАТ)) пайваст шудааст, ки ТГОҶ бо тартиби $6 \cdot n \pm 1$ (гармоникаҳои 5-ум, 7-ум, 11-ум, 13-ум ва ғайра) ҳосил мекунад. Бори мазкур ба таркиби спектралии шиддатҳо дар гиреҳҳои 500 кВ ва 220 кВ таъсири мустақим расонида, барои резонанси гармоникӣ заминаҳо ба вуҷуд меорад.

Системаҳои электроэнергетикии муосир дорои шумораи зиёди гиреҳҳо ва шохаҳо мебошанд. Дар чунин ҳолатҳо истифодаи намуди матрисавии тавсифи реҷаҳои кори шабакаҳои электрикӣ бо истифода аз назарияи графҳо мақсаднок аст. Бинобар ин, дар бораи намуди матрисавии тавсифи шабакаҳои электрикӣ ва назарияи графҳо ба таври кутоҳ дар зербоби 2.3 маълумот оварда шудааст.

4.2 Усули беҳинсозӣ барои насби дастгоҳи ҷубронкунанда, бо назардошти эҳтимолияти ба вуҷуд омадани резонанс

Интихоби усули беҳинсозӣ барои ҷойгиркунии ДҶ бо назардошти мураккабии математикии ин масъала муайян карда мешавад. Дар шароити СЭ муосир ин масъала ғайрихаттӣ, бисёрмеъёра буда, хусусияти дискретӣ ва бефосила дорад. Усулҳои анъанавии беҳинсозии ҷойгиркунии ДҶ, одатан барои кам кардани талафоти тавоноии фаъол ва нигоҳ доштани сатҳи шиддат истифода мешаванд. Агар ҳангоми беҳинсозӣ омили резонансро ҳамчун маҳдудият ба назар гирем, сохтори функсияи мақсаднок ба куллӣ тағйир меёбад. Дар ин ҳолат, усулҳои анъанавӣ ҳамавақт натиҷаҳои дилхоҳ намедиҳанд [113]. Дар солҳои охир як қатор усулҳо ва алгоритмҳои беҳинсозӣ барои муайян кардани тавоноии оптималӣ ва ҷои насби ДҶ коркард шудаанд [114 – 116].

Барои кам кардани талафот ва ба меъёрдарории сатҳи шиддат дар гиреҳҳои шабакаҳои радиалӣ дар [109] усули дузинагӣ пешниҳод шудааст, ки он аввал гиреҳҳои афзалиятнокро бо ёрии зарибҳои ҳассосият муайян мекунад ва сипас, параметрҳои батареяҳои конденсатириро тавассути алгоритми гибридии тӯдаи

заррағо беҳинсозӣ менамояд. Самаранокии ин усул тавассути моделсозӣ дар MATLAB дар нақшағои санҷишии IEEE тасдиқ карда шуд, ки он беҳтаршавии назарраси сатҳи шиддат ва камшавии талафоти тавоноиро дар муқоиса бо усулҳои мавҷуда нишон дод.

Дар кори [114] истифодаи усули тӯдаи заррағо (УТЗ) бо назардошти зариби ҳассосияти талафот ($K_{ҳ.т.}$), пешниҳод шудааст, ки онҳо барои кам намудани соҳаи ҷустуҷӯи алгоритми асосӣ хизмат мекунанд.

Усули паҳншавии бактерияҳо барои беҳинсозии ҷои ҷойгиркунии ДҶ дар [115] истифода шудааст. Барои муайян кардани гиреҳҳое, ки дар онҳо насб кардани ДҶ зарур аст, зариби $K_{ҳ.т.}$, истифода мешавад ва бо ёрии алгоритми беҳинсозии қатори мӯрчаҳо тавоноии ДҶ муайян карда мешавад.

Олимони хориҷӣ Элмауҳаб А., Будур М., Геддуш Р. дар мақолаи худ усули нави беҳинсозиро пешниҳод менамоянд, яъне «..усули нави эволютсионӣ барои беҳинсозии яквақтаи шумора, тавоноӣ ва ҷои насби конденсаторҳои шунтӣ дар шабакаи тақсимотии радиалӣ пешниҳод гардидааст, ки он ба кам намудани хароҷоти солонаи талафоти тавоноии фаъол ва беҳтар намудани қимати шиддати гиреҳҳои гуногун нигаронида шудааст. Усули мазкур дар шабакаи 10-гиреҳа ва шабакаи озмоишии 34-гиреҳаи IEEE татбиқ карда шудааст. Натиҷаҳои бадастомада бо натиҷаҳои таҳқиқоти қаблие, ки дар онҳо усулҳои эвристикӣ ва ҳамон шабакаҳои озмоишӣ истифода шудаанд, муқоиса карда шудаанд» [116]. Дар усули мазкур алгоритми нави эволютсионӣ барои беҳинсозии ҷойҳои ҷойгиркунии батареяҳои конденсатории шунтӣ дар шабакаи тақсимотӣ пешниҳод шудааст.

Олимони чинӣ Нан Фенг ва дигарон оид ба ҷойгиркунии оптималии ДҶ дар шабакаҳои дорои манбаъҳои барқароршаванда собит кардаанд,ки «.аввал гиреҳҳои аз ҷиҳати шиддат заиф бо истифода аз индекси нави нисбати ҷараёни расиши кутоҳ (ҶРК) муайян карда мешаванд. Сипас, барои аниқ намудани гиреҳҳои оптималии насб тавассути ҳисоб кардани масофаҳои байни гиреҳҳои номзад ва гиреҳҳои заиф дарозии масофаи миёнаи электрикӣ ворид карда мешавад. Бо назардошти маҳдудиятҳо оид ба тавоноии максималии ҷубронкунӣ

ва ҳудудҳои иҷозатдодашудаи хомушкунии истеҳсоли тақсимшуда (ИТ), моделсозии имитатсионӣ дар MATLAB конфигуратсияи оптималиро тасдиқ менамояд. Таҳқиқи ҳолатҳо дар шабакаҳои санҷишии тағйирёфтаи 9, 14 ва 39-гиреҳаи IEEE самаранокии усулро тасдиқ мекунанд: хомушшавии ИТ аз сабаби вайроншавии раванди гузариши шиддати паст ва баланд (LVRT/HVRT) самаранок пешгирӣ карда шуда, шиддати минималии замони расиши кутоҳ ба андозаи 0,05 – 0,08 в.н.) афзоиш меёбад ва вақти барқароршавии шиддат аз 0,15 то 0,8 сония коҳиш меёбад» [117]. Натиҷаҳои таҳқиқот нишон доданд, ки баъд аз истифодаи усули мазкур шиддат дар гиреҳҳои шабака аз 5 то 8 % афзуда, вақти барқароршавии шиддат то 0,08 – 0,15 сония кам карда шуд, ки бартарияти ин усулро нишон медиҳад.

Ҳамин тариқ, метавон хулоса кард, ки алгоритмҳои метаэвристикӣ, аз қабили УТЗ (PSO), УГГ (GWO), УТС (SSA) ва ғайра, дар муқоиса бо усулҳои анъанавӣ як қатор бартариҳо доранд. Дар ҷадвали 4.1 афзалиятҳои асосии усулҳои метаэвристикӣ дар муқоиса бо усулҳои классикӣ оварда шудаанд.

Фарқи асосии усули пешниҳодшаванда нисбат ба усули мавҷуда дар он аст, ки қимати ЗПБР, ки усули ҳисобкунии он дар [4-М] ба таври муфассал тавсиф шудааст, мустақиман ба раванди итератсионии ҷустуҷӯи метаэвристикӣ ворид карда мешавад. Дар ин ҳолат дар усулҳои классикӣ насби ДҶ танҳо барои ҷуброни тавоноии ғайрифаъол дар басомади асосӣ баррасӣ мешавад. Алгоритмҳои метаэвристикӣ бошад, имкон медиҳанд, ки «тасвирбардории басомадӣ»-и ҳар як ҳалли эҳтимолӣ гузаронида шавад, ки ин иҷро нашудани шарти пайдоиши резонансро (3.22) дар нуқтаи интихобшудаи насби ДҶ кафолат медиҳад.

Барои санҷиш фарқияти байни алгоритмҳои усули тӯдаи зарраҳо, усули гурги хокистарранг ва усули тӯдаи салпҳоро баррасӣ мекунем. Алгоритми УТЗ ҳаракати тӯдаи парандагонро тақлид менамояд. Норасоии асосии он инертнокии баланд мебошад, ки бо сабаби он зарраҳо аксар вақт аз назди минтақаҳои танги бехатари байни қуллаҳои резонансӣ «парида мегузаранд», яъне хато мекунанд.

Ҷадвали 4.1. – Параметрҳои асосии нақшаи электрикии таҳқиқшаванда

Меъёри муқоиса	Усулҳои анъанавӣ	Усулҳои метаэвристикӣ
Ҷустуҷӯи ҳалли беҳтарин (оптимуми глобалӣ)	Аксар вақт бо сабаби ғайрихаттии тавсифоти амплитудавии басомад (ТАБ) дар минимумҳои локалӣ банд мемонанд	Дорои механизмҳои баромадан аз экстремумҳои локалӣ мебошанд (ҷустуҷӯи стохастикӣ)
Намуди тағйирёбандаҳо	Бефосилагӣ ва дифференсиалшавандагии функсияҳоро талаб мекунанд	Бо маълумотҳои дискретӣ (рақамҳои гиреҳҳо) ва бутун ба осонӣ кор мекунанд
Ба назар гирифтани резонанс	Қолабсозӣ (Формализатсия) кардани маҳдудиятҳо аз рӯи ЗПБР дар шакли аналитикӣ мураккаб аст	ЗПБР мустақиман ҳамчун функсияи ҷаримавӣ дар алгоритм истифода мешавад
Ҳассосият нисбат ба нуқтаи ибтидоӣ	Натиҷа аз наздикшавии ибтидоӣ сахт вобаста аст	Оғози (Инитсиализатсияи) тасодуфии популятсия фарогирии васеи фазои ҷустуҷӯро таъмин мекунад

Алгоритми УГХ силсиламаротиби (иерархияи) шикори гургҳоро тақлид мекунад. Алгоритми мазкур нисбат ба УТЗ беҳтар аст, вале бо сабаби таъсири сахти се пешво алфа (α) бета (β), делта (δ) метавонад пеш аз вақт наздик шавад (яъне ба наздикшавии бармаҳал дучор гардад) ва дар айни замон гиреҳҳои потенсиалҳои беҳтари шабакаро ба назар нагирад. Алгоритми УТС бо сабабҳои зерин аз ҳама самараноктар ба шумор меравад: дақиқияти баландро бо назардошти маҳдудиятҳо аз рӯи ЗПБР таъмин менамояд, ҳангоми ҳисобкунӣ танзими камтарини параметрҳоро талаб мекунад ва наздикшавии устувори натиҷаро медиҳад. Ҷадвали муқоисавии се алгоритми баррасишуда дар ҷадвали 4.2 оварда шудааст.

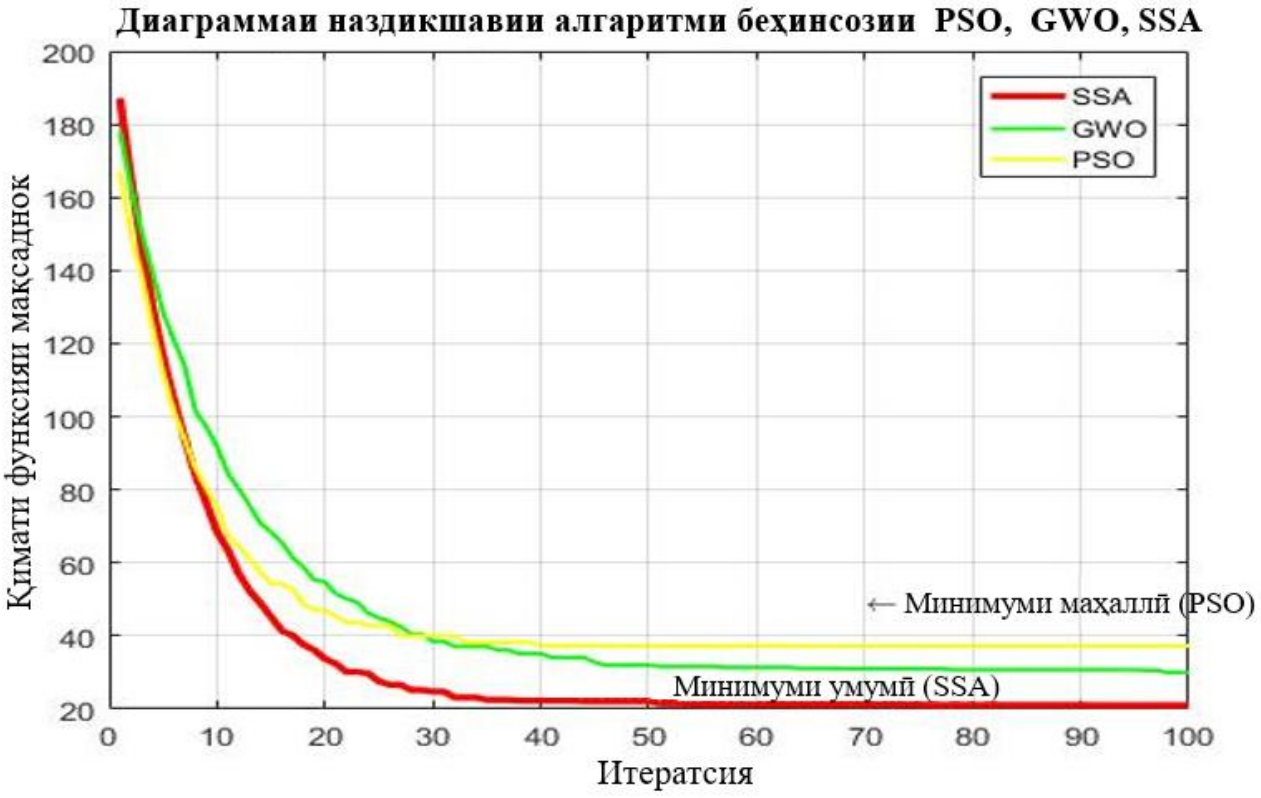
Ҷадвали 4.2. – Муқоисаи алгоритми усулҳои метаэвристикӣ

Меъёри муқоиса	УТЗ	УГХ	УТС
Дақиқияти дур шудан аз резонанс	Паст (инерсияи баланд аз ҳудудҳои ЗПБР парида мегузарад)	Миёна (пешвоён метавонанд тӯдаро ба минтақаи резонанс баранд)	Баланд (сохтори занҷирӣ аз гиреҳҳои хатарнок муназзам канор гирифта мешавад)
Ворид намудани параметрҳои ибтидоӣ	Мувофиқоварии ω, C_1, C_2 – ро талаб мекунад	Мувофиқоварии α, β, δ – ро талаб мекунад	Камтарин (танҳо мувофиқоварии C_1)
Наздикшавӣ	Майлкунӣ ба минимумҳои маҳаллӣ (локалӣ) дар гиреҳҳо	Тез, вале аксар вақт пеш аз муҳлат	Устувор аз ҳисоби қадами мутобиқшаванда (адаптивӣ) ба сӯи «туъма»

Дар асоси таҳлили муқоисавии дар ҷадвали 4.2 овардашуда, метавон хулоса кард, ки УТЗ аксар вақт ҷавобҳои носаҳеҳро пешниҳод менамояд, зеро вектори суръати зарраҳои он ҳудуди тези реҷаҳои резонансиро ба назар намегирад. Усули УГХ соҳаи ҷустуҷӯро дар атрофи пешвоён маҳдуд месозад ва агар α-гург дар нуқтаи аз назари маҳаллӣ мувофиқ, вале ба резонанс наздик қарор гирад, тамоми тӯда дар ҳамонҷо банд мешавад. Баръакс, усули УТС сохтори занҷирии тӯдаро тақлид намуда, чандирии баланди ҳаракатро ҳифз мекунад; ҳатто агар пешво ба ҳудуди хатарноки резонанс наздик шавад ҳам, пайравон аз ҳисоби миёнагирии мавқеъҳо дар минтақаи бехатар боқӣ мемонанд, ки ин ба алгоритм имкон медиҳад гиреҳҳои ҳамсояи шабакаро самаранок таҳқиқ намояд.

Акнун диаграммаи наздикшавии алгоритмҳои беҳинсозии УТЗ, УГХ ва УТГ-ро дида мебароем.

Мувофиқи диаграммаи наздикшавии алгоритмҳои беҳинсозӣ (расми 4.1) аён аст, ки алгоритми УТС аз рӯи нишондиҳандаи наздикшавӣ беҳтарин ҳисоб меёбад. Аз ин рӯ, дар таҳқиқоти минбаъда барои ҳисобкуниҳо маҳз ҳамин алгоритм истифода мешавад.



Расми 4.1. – Диаграммаи наздикшавии алгоритмҳои беҳинсозии УТЗ, УГХ ва УТС барои кам кардани таъсири реҷаҳои резонансӣ

4.3 Алгоритми усули тӯдаи салпҳо

Алгоритми усули тӯдаи салпҳо (АТС) (*Salp Swarm Algorithm, SSA*) яке аз алгоритми муосири метаэвристикии беҳинсозӣ мебошад, ки бори аввал аз ҷониби Сейедали Мирджалили соли 2017 пешниҳод шудааст. Алгоритми мазкур рафтори иҷтимоии салпҳоро (организмҳои бесутунмуҳраҳои баҳрӣ) ҳангоми ҷустуҷӯи ғизо дар уқёнус тақлид менамояд.

Асоснокунии биологии ин алгоритм аз он иборат аст, ки салпҳо занҷирҳои дарозро ба вуҷуд меоранд, ки дар онҳо занҷир ба ду гурӯҳи фардҳо ҷудо мешаванд: пешво (салпи аввал, ки тӯдаро ба сӯи манбаи туъма равон мекунад) ва пайравон (ҳамаи салпҳои дигар, ки паси ҳам ҳаракат карда, алоқамандии занҷирро ҳифз менамоянд). Мақсади алгоритми мазкур дарёфти оптимуми глобалӣ ва умумӣ (манбаи ғизо) дар фазои ҷустуҷӯи бисёрченака мебошад.

Модели математикии алгоритми мазкур дар шакли зерин пешниҳод карда мешавад. Дар марҳилаи аввал параметрҳои ибтидоӣ, яъне шумораи агентҳои

ҷустуҷӯӣ (салпҳо) (*N*), шумораи ниҳоии итератсияҳо (*T*), ҳудудҳои ҷустуҷӯии поёнӣ (*lb*) ва болоии (*ub*), инчунин функсияи мақсаднок *f*(*x*) муайян карда мешаванд. Дар марҳилаи дуюм популятсияи ибтидоӣ шакл дода мешавад, яъне координатҳои ҳар як салп дар фазои бисёрченакаи додашуда ба таври тасодуфӣ тавассути формулаи зерин муайян карда мешаванд:

$$X_i = rand\left(0,1\right)\cdot\left(ub - lb\right) + lb. \tag{4.1}$$

$$X_i = \left[x_{i1},\ \ x_{i2},\ldots,\ \ x_{id}\right].$$

дар ин ҷо, *d* – ченаки масъала (шумораи гиреҳҳои нақша).

Дар марҳилаи сеюм барои ҳар як салпҳо қимати функсияи мақсаднок ҳисоб карда мешавад, ки пас аз он салпи бо натиҷаи беҳтарин ҳамчун пешвои «манбаи ғизо» (*F*) таъин мегардад. Дар марҳилаи чорум мавқеи пешво навсозӣ мешавад, ки он тавассути формулаи зерин муайян мегардад:

$$x_j^1 = \begin{cases} F_j + c_1\left(\left(ub_j - lb_j\right)\cdot c_2 + lb_j\right), & \text{агар} \quad c_3 \geq 0{,}5, \\ F_j - c_1\left(\left(ub_j - lb_j\right)\cdot c_2 + lb_j\right), & \text{агар} \quad c_3 < 0{,}5. \end{cases} \tag{4.2}$$

дар ин ҷо, x_j^1 – координатаи пешво (салпи аввал) дар ченаки *j* – ум;

F_j – координатаи манбаи ғизо;

C_2, C_3 – ададҳои тасодуфӣ дар фосилаи аз 0 то 1, ки самт ва андозаи қадамро муайян мекунанд;

C_1– параметре, ки бо афзоиши шумораи итератсияҳо аз ҷустуҷӯи глобалӣ ба локалӣ кам мешавад ва аз рӯи ифодаи зерин муайян карда мешавад:

$$c_1 = 2\cdot e^{-\left(\frac{\Delta t}{T}\right)^2}, \tag{4.3}$$

ар ин ҷо, *t* – итератсияи ҷорӣ, *T* – итератсияи максималӣ (охирон) мебошанд.

Дар идома, дар қадами панҷуми итератсияҳо, мавқеи пайравон мувофиқи формулаи зерин азнавсозӣ карда мешавад:

$$x_j^i = \frac{1}{2} \cdot \left(x_j^i + x_j^{i-1} \right), \qquad i \geq 2. \tag{4.4}$$

Татбиқи АТС-ро дар масъалаҳои электроэнергетика маҳз барои беҳинсозии ҷойи насби ДҶ бо назардошти эҳтимолияти пайдоиши резонанс дар шабакаҳои электрикӣ баррасӣ менамоем. Блок-нақшаи алгоритми он дар расми 4.2 оварда шудааст. Пайдарпайи алгоритм чунин аст:

1. Ворид намудани параметрҳои шабакаи таҳқиқшаванда ба монанди матритсаҳои пайвастшавии *M* ва *N* мувофиқи (3.2) ва (3.6), инчунин параметрҳои элементҳои шабакаи таҳқиқшаванда. Ҳисоби реҷаи барқароршудаи шабакаи таҳқиқшаванда ва муайян кардани сатҳҳои шиддат ва талафоти тавоноӣ бе назардошти ДҶ.

2. Функсияҳои мақсаднок: кам кардани талафот дар шабакаҳои электрикӣ; меъёрибандии сатҳи шиддат дар гиреҳҳои нақша, инчунин ба назар гирифтани маҳдудиятҳои резонансӣ дар шакли функсияи ҷаримавӣ мувофиқи шарти (3.22).

3. Ҳосилшавии тӯдаи аввалияи салпҳо: тақсимоти тасодуфии ДҶ дар гиреҳҳо.

4. Санҷиши ҳисоби талафоти тавоноии фаъол ΔP ва сатҳҳои шиддат дар гиреҳҳо мувофиқи меъёри зерин:

$$0{,}9 \cdot U_{\text{ном}} \leq U_i \leq 1{,}1 \cdot U_{\text{ном}}, \qquad i - \text{рақами гиреҳ.} \tag{4.5}$$

ва эҳтимолияти пайдоиши резонанс мувофиқи шарти (3.22).

5. Сохтани ТАБ дар асоси усули пешниҳодшуда ва муайян кардани қимати ЗПБР барои ҳар як гармоникаи тартиби $6 \cdot n \pm 1$, ки аз ҷониби бори ғайрихаттӣ ҳосил мешаванд.

6. Азнавсозии ҳалли беҳтарин (*F*). Интихоби салпҳои дорои камтарин талафот ва иҷрошавии шарти (4.5), дар байни онҳое, ки хатари резонанс надоранд (ҳангоми иҷро нагардидани шарти (3.22)).

7. Азнавсозии мавқеъҳо, яъне тасҳеҳи (ислоҳи) ҷойгиршавии пешво ва тамоми занҷири салпҳо ($i = i + 1$).

8. Анҷом, баровардани координатҳои оптималии ҷойи насби ДҶ.

4.4 Намунаи ҳисоб дар асоси АТС

Ҳамчун намуна қисми ҷанубии СЭ Ҷумҳурии Тоҷикистонро интихоб намудаем, ки дар расми 3.3 оварда шудааст, баррасӣ менамоем. Барои таъмини СЭЭ (аз рӯи сатҳи зарибҳои ғайрисинусоидали шиддат (K_U ва $K_{U(n)}$) дар нақшаи баррасишаванда бо назардошти эҳтимолияти пайдоиши резонанс аз алгоритми АТС истифода мебарем. Маълумоти ибтидоӣ ва параметрҳои алгоритм барои ҳисоб дар ҷадвали 4.3 оварда шудаанд.

Ҷадвали 4.3. – Маълумоти ибтидоӣ ва параметрҳои алгоритм

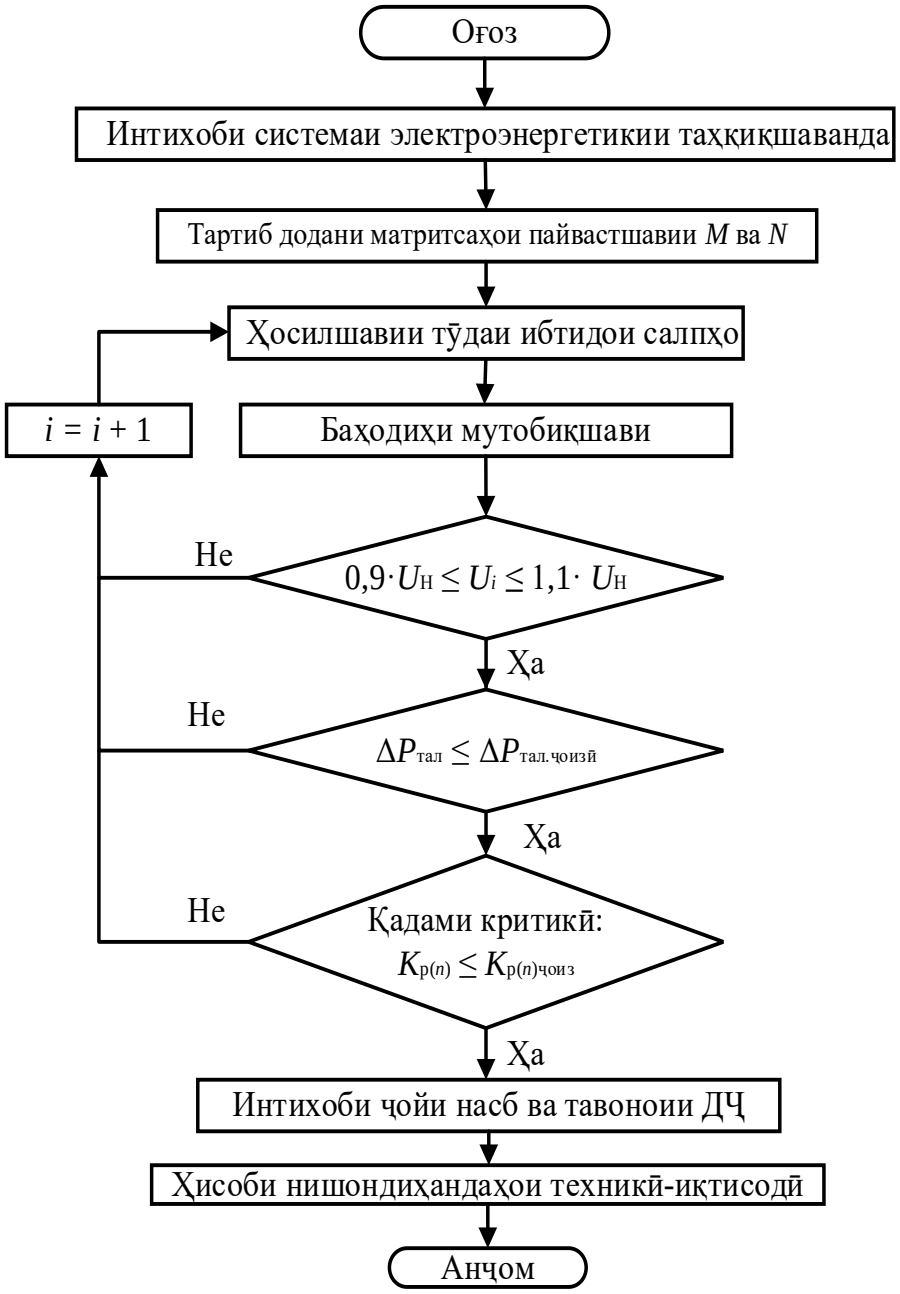
Сатҳи ченаки масъала (*d*)	**38 гиреҳ (ҷустуҷӯи гиреҳи оптималӣ барои насби ДҶ)**
Шумораи салпҳо (*N*)	30
Шумораи максималии итератсияҳо (*T*)	100
Маҳдудият аз рӯи резонанс	$K_{\text{р}(n)\text{чоиз}} \geq K_{\text{р}(n)}$
Функсияи бомақсад	Муътадилгардонии сатҳи шиддат дар гиреҳҳо ва зарибҳои K_U ва $K_{U(n)}$, камкунии талафот

Натиҷаҳои раванди итератсионӣ дар ҷадвали 4.4 оварда шудаанд.

Ҷадвали 4.4. – Натиҷаҳои раванди итератсионии алгоритми АТС

Итератсия	**Пешвои тӯда (X^1)**	**Санҷиш аз рӯи шарти (3.22)**	**Натиҷа**
1	Гиреҳ 10, $Q_{\text{КУ}}$ = 50 МВАр	Иҷро нагардидани шарт дар гиреҳи 5	Пешво ба мавқеи навбатӣ ҳаракат мекунад
25	Гиреҳ 4, $Q_{\text{КУ}}$ = 25 МВАр	Иҷро гардидани шартҳо дар ҳамаи гиреҳҳо	Салпҳо ба гиреҳи 4 наздик шуда, соҳаи ҷустуҷӯро дар атрофи он маҳдуд месозанд
100	Гиреҳ 4, $Q_{\text{КУ}}$ = 25 МВАр	Иҷро гардидани шартҳо дар ҳамаи гиреҳҳо	Зариби C_1 ба сифр майл намуда, мавқеи тӯдаро дар оптимуми умумӣ муайян мекунад

Натиҷаҳои ҳисобҳо нишон медиҳанд, ки дар итератсияи 25-ум салпҳо ҷойи оптималии насб ва тавони ДҶ-ро пайдо мекунанд, ки дар ин ҳолат тамоми шартҳо иҷро мегарданд. Муқоисаи натиҷаҳои ҳисоб дар ҳолати ибтидоӣ ва пас аз беҳинсозӣ дар ҷадвали 4.5 оварда шудааст.

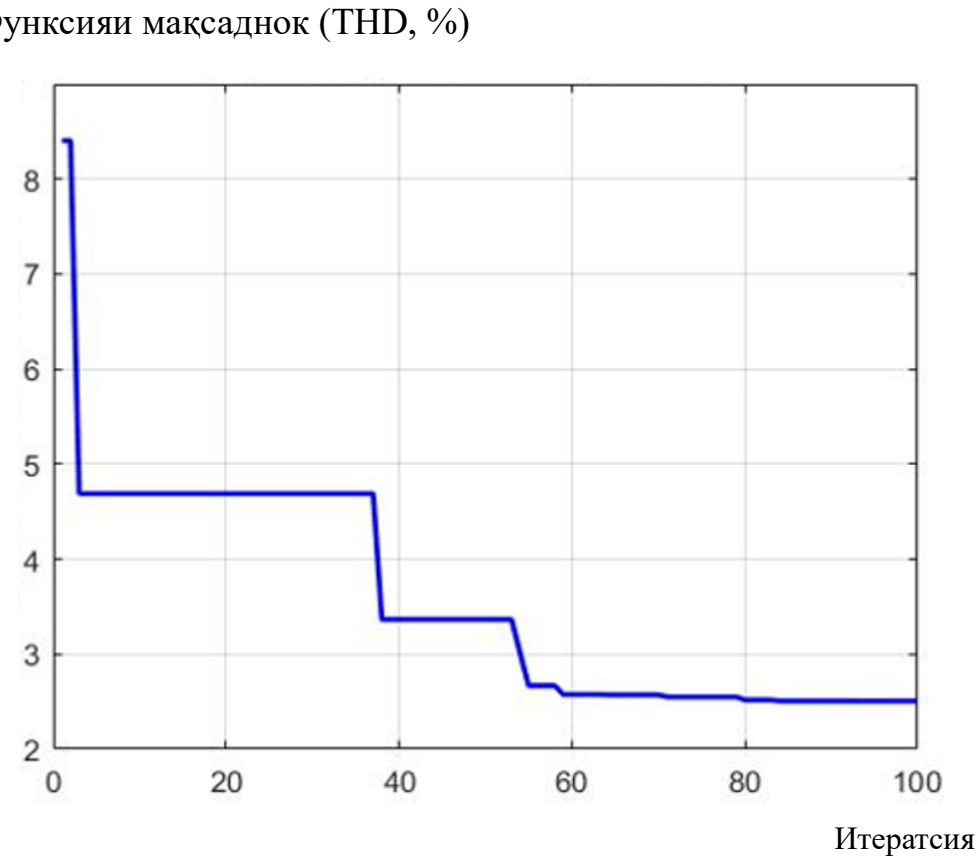


Расми 4.2. – Блок-нақшаи алгоритми УТС барои интихоби ҷойи насби ДҶ

Ҷадвали 4.5. – Муқоисаи натиҷаҳои ҳисоб дар ҳолати аввала ва пас аз беҳинсозӣ

Параметр	**Ҳолати аввалия (бе ДҶ)**	**Пас аз беҳинсозии АТС (бо ДҶ)**
Гиреҳи беҳтарини насб	–	Гиреҳ 4
Тавоноии ДҶ (*Q*дҷ), МВАр	0	25
Талафоти тавоноии фаъол (Δ*P*), МВт	14,2	11,8
Қимати максималии $K_{р(n)}$ (гиреҳи 5)	0,88	0,76
Шиддат дар гиреҳи бухронӣ (критикӣ), в.н.	0,945	0,991

Графики тағйирёбии зариби K_U дар раванди беҳинсозӣ дар расми 4.3 оварда шудааст.



Расми 4.3. – Тағйирёбии қимати зариби K_U ҳангоми истифодаи АТС

Натиҷаҳои ҳисобҳо самаранокии истифодаи алгоритми тӯдаи салпҳоро барои беҳинсозии бисёрмеъёрии ҷойгиркунии ДҶ бо назардошти хатари пайдоиши резонанс тасдиқ менамоянд. Аз ҷадвалҳои 4.4, 4.5 ва графики расми 4.3 бармеоянд, ки дар қадами 56-уми раванди итератсионӣ тамоми шартҳо иҷро гардида, алгоритм натиҷаи лозимаро ба даст меоварад.

4.5 Хулосаҳо оид ба боби чорум

1. Усулҳои анъанавии беҳинсозии бисёрмеъёрии ҷойҳои насби дастгоҳҳои ҷубронкунанда асосан ба кам намудани (минимизатсияи) талафоти тавоноии фаъол ва бамеъёрдарории шиддат нигаронида шудаанд, вале дар ин ҳолат эҳтимолияти ба амал омадани резонанси гармоникиро дар шабакаҳои электрикии дорои борҳои пуриқтидори ғайрихаттӣ ба назар намегиранд.

2. Усулии такмилёфта ба интихоби тавоноӣ ва ҷойҳои ҷойгиркунии дастгоҳҳои ҷубронкунанда бо истифода аз алгоритмҳои метаэвристикӣ коркард ва санҷида шудааст, ки тафовути асосии он ворид намудани нишондоди зариби пешгӯишавандаи бавуҷудоии резонанс, бевосита ба раванди итератсионии ҷустуҷӯ ҳамчун функсияи ҷаримавӣ мебошад.

3. Таҳлили муқоисавии алгоритмҳои тӯдаи зарраҳо, гургҳои хокистарранг ва тӯдаи салпҳо нишон дод, ки алгоритми усули тӯдаи салпҳо барои масъалаи мазкур самараноктарин мебошад. Он дорои дақиқияти баланди гузариши минтақаҳои резонансӣ, наздикшавии устувор буда, дар муқоиса бо дигар алгоритмҳо танзими ҳадди ақали параметрҳоро талаб мекунад.

4. Истифодаи алгоритми тӯдаи салпҳо дар мисоли модели қисми ҷанубии СЭ-и ҶТ, ки дорои бори пуриқтидори ғайрихаттӣ мебошад, самаранокии худро исбот намуд: алгоритм гиреҳи оптималӣ (гиреҳи 4) ва тавоноии зарурирo (25 МВАр) барои насби ДҶ бомуваффақият муайян кард. Татбиқи усули беҳинсозии пешниҳодшуда имкон дод, ки нишондиҳандаҳои шабака ба таври маҷмуӣ беҳтар карда шаванд: талафоти тавоноии фаъол аз 14,2 МВт то 11,8 МВт кам карда шуда, шиддат дар гиреҳи буҳронӣ аз 94,5 то 99,1 % аз нишондоди номиналӣ баланд бардошта шуд, инчунин хавфи максималии ба амал омадани резонанс аз 0,88 то 0,76 кам карда шуд.

ХУЛОСА

Дар кори диссертатсионӣ ҳалли масъалаи муҳимми илмию техникӣ ба даст оварда шудааст, усули пешгӯӣ ва пешгирии ҳодисаҳои резонансӣ дар шабакаҳои мураккаби электрикии дорои манбаъҳои пуриқтидори гармоникаҳои олӣ такмил дода шудааст, ки ин барои баланд бардоштани эътимоднокӣ, сарфакорӣ ва сифати кори системаҳои электроэнергетикӣ аҳамияти муҳим дорад.

Натиҷаҳои асосии илмӣ ва амалӣ аз инҳо иборатанд:

1. Зариби пешгӯишавандаи бавуҷудоии резонанс аз ҷиҳати назариявӣ асоснок ва таҳия карда шудааст. Гузариш аз таҳлили сифатии графикҳои ТАБ ба баҳодиҳии қатъии миқдорӣ имкон дод, ки хатари резонанс тавассути таносуби муқовимати хусусии гирех дар басомади гармоникаи n – ум ба муқовимат дар басомади асосӣ ба танзим дароварда шавад. Шартҳои қатъии математикии мавҷудияти резонанси хатарнок $\left(K_{\text{р}} \geq K_{\text{р. чоиз}}\right)$, ки бо талаботи меъёрӣ оид ба сифати энергияи электрикӣ алоқаманд аст, таҳия шудаанд [1-М, 3 - М, 4-М, 6-М, 7-М, 9-М].

2. Алгоритми муайянкунии автоматикунонидашудаи минтақаҳои резонансӣ сохта шуд. Алгоритми коркардшуда имкон медиҳад, ки дар асоси матритсаҳои ноқилиятҳои гиреҳӣ, тавсифотҳои басомадию амплитудавии шабакаи дорои нақшаи сохтории дилхоҳ ба таври автоматикӣ нусхабардорӣ карда шаванд. Барнома коркардшуда (Шаҳодатнома дар бораи бақайдгирии давлатии №2025685699) имкон медиҳад, ки гиреҳҳои буҳронии шабакаи таҳқиқшаванда бо назардошти тағйирёбии нақша ва ё таркиби борҳои ғайрихаттӣ бештар ҳангоми резонанси параллелӣ муайян карда шаванд [4-М, 6-М, 12-М].

3. Таҳлили маҷмуии реҷаҳои ғайрисинусоидалии шабакаи электрикии СЭ-и ҶТ гузаронида шудааст. Дар заминаи моделҳои санҷидашуда дар барномаи ETAP 19.0.1 ва бо истифода аз нишондиҳандаҳои воқеии шабакаи 220 – 500 кВ, инчунин спектри гармоникаҳои истеҳсолоти электролизии КВД «ШАТ», тавсифотҳои амплитудавии басомадӣ барои гиреҳҳои буҳронӣ сохта шуданд. Муайян карда шуд, ки хавфи аз ҳама зиёдро гармоникаҳои аз 5-ум то 37-ум

доранд ва саҳвияти нисбии моделсозӣ дар муқоиса бо ҳисобҳои аналитикӣ аз 4,54 % зиёд нест, ки ин саҳеҳияти баланди моделҳоро тасдиқ мекунад [1-М, 3 - М, 12-М].

4. Усули бисёрмеъёраи беҳинсозии дастгоҳҳои ҷубронкунанда бо канорагирӣ аз минтақаҳои резонансӣ таҳия шудааст. Исбот гардид, ки усулҳои анъанавии ҷойгиркунии дастгоҳҳои ҷубронкунанда бидуни назардошти ТАБ-и шабака метавонанд басомади системаро ба минтақаи резонанс бо гармоникаҳои сарборӣ интиқол диҳанд. Усуле пешниҳод шудааст, ки дар он ЗПБР ба ҷустуҷӯи итератсионӣ ҳамчун функсияи ҷаримавӣ ворид карда шудааст. Ин кафолат медиҳад, ки реҷаи беҳтарин берун аз минтақаҳои резонанси басомадӣ қарор гирад [5-М, 6-М, 12-М].

5. Самарабахшии баланди алгоритми тӯдаи салпҳо асоснок карда шудааст. Дар ҷараёни таҳлили муқоисавии усулҳои муосири метаэвристикӣ (усули тӯдаи зарраҳо, усули тӯдаи гургҳои хокистарӣ, усули тӯдаи салпҳо) муайян карда шуд, ки алгоритми УТС дорои беҳтарин суръати наздикшавӣ (собитшавии оптимуми умумӣ дар итератсияи 25 – ум ба даст омадааст), устувории баланд нисбат ба афтодан ба экстремумҳои маҳаллӣ мебошад ва ҳангоми ҳалли масъалаҳои беҳинсозии бисёрмеъёра дар шабакаҳои электрикӣ шумораи камтарини параметрҳои танзимшавандаро талаб мекунад [5-М, 12-М].

6. Самараи назарраси техникӣ-иқтисодӣ аз татбиқи усулии коркардшуда тасдиқ карда шуд. Санҷиши усули пешниҳодшудаи УТС дар мисоли қисми ҷанубии СЭ ҶТ нишон дод, ки насби оптималии ДҶ бо тавоноии 25 МВАр дар гирехи 4 самараи хуб медиҳад, яъне кам кардани талафоти тавоноии фаъол дар шабака аз 14,2 МВт то 11,8 МВт (ба андозаи 16,9 %), баланд бардоштани сатҳи шиддат дар нуқтаи критикӣ аз 0,945 в.н. то меъёри 0,991 в.н. ва инчунин қимати ЗПБР дар гирехи осебпазири 5 аз сатҳи хатарноки 0,88 то қиматии бехатари 0,76 кам карда шудааст [5 - М].

Тавсияҳо барои истифодаи амалӣ

Усулҳо, моделҳои математикӣ ва барномаи компютерии сохташудаи «Барнома барои таҳлил ва муайян кардани гиреҳҳои системаи электроэнергетикӣ, ки дар онҳо ҳодисаҳои резонансӣ имконпазиранд» [12-М], ки дар раванди таҳқиқот ба даст омада, барои пешгӯии ҳодисаҳои резонансӣ дар шабакаҳои электрикии дорои бори ғайрихаттӣ пешбинӣ шудаанд, метавонанд аз ҷониби ташкилотҳои лоиҳакашӣ ҳангоми таҳияи чорабиниҳо оид ба баланд бардоштани СЭЭ, инчунин барои ошкор кардани гиреҳҳои осебпазир ва ҳассоси ШЭ ҳангоми тағйирёбии сохтор ва реҷаҳои кори онҳо истифода карда шаванд.

Усули таҳияшудаи беҳинсозии бисёрмеъёрии ҷои насб ва тавоноии дастгоҳҳои ҷубронкунанда (БСК) бо истифода аз алгоритми тӯдаи салпҳо [5-М], ки дар он қимати ЗПБР ба раванди ҷустуҷӯи итератсионӣ ҳамчун функсияи ҷаримавӣ ворид карда шудааст [4-М], ба хадамоти танзимгарӣ ва корхонаҳои лоиҳакашӣ имкон медиҳад, ки нуқтаҳои пайвасткунии БСК-ро барои кафолати канораҷӯӣ аз минтақаҳои резонансӣ, меъёрбандии сатҳи шиддат ва паст намудани талафоти тавоноии фаъол дар ШЭ дуруст интихоб намоянд.

Натиҷаҳои бадастомада оид ба беҳинсозӣ ва пешгӯии реҷаҳои резонансӣ, моделҳои математикӣ ва алгоритмҳои таҳияшуда [4-М, 5-М, 12-М] метавонанд дар ҶСК «Барқи Тоҷик» ва шабакаҳои ШЭ ҳангоми идоракунии реҷаҳои кори ШЭ дорои бори ғайрихаттӣ барои пешгирии ҳолатҳои садамавии вобаста ба афзоиши ТГОШ, инчунин ҳангоми рушди минбаъдаи СЭ Ҷумҳурии Тоҷикистон истифода шаванд.

Моделҳои математикӣ, алгоритмҳо ва барномаи компютерии дар натиҷаи таҳқиқоти гузаронидашуда таҳиягардида [12-М] ба раванди таҳсили Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, Институти энергетикаи Тоҷикистон ва Филиали ДМТ «ДЭМ» дар шаҳри Душанбе ворид карда шуда, ҳангоми омӯзиши фанҳои «Масъалаҳои математикӣ дар электроэнергетика» ва «Мутобиқати электромагнитӣ», инчунин ҳангоми иҷрои корҳои илмии магистрантон ва докторантони PhD истифода бурда мешаванд.

РӮЙХАТИ АДАБИЁТИ ИСТИФОДАШУДА

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 15 с

2. Карташев, И.И. Управление качеством электроэнергии: Учебное пособие / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов [и др.]. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2017. – 347 с. – ISBN 978-5-383-01074-7. – EDN ZUXXRL.

3. Аррилага, Дж., Брэдли, Д., Боджер, П. Гармоники в электрических системах: перевод с английского //– Москва: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.

4. Emanuel, A. E. Apparent Power: Components and Physical Interpretation // Proceedings of the 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP 1998) (Athens, Greece, October 14–16, 1998). – Athens, 1998. – Vol. 1. – P. 1–12.

5. Wilkosz, K. Two-State Investigation of Resonances in Power System // IEEE MELECON 2006 : IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (May 16–19, 2006, Benalmadena, Malaga, Spain). – Benalmadena, 2006. – P. 961–964.

6. Fuchs, E. F. Power Quality in Power Systems, Electrical Machines, and Power-Electronic Drives / E. F. Fuchs, M. A. S. Masoum. — 3rd ed. — Amsterdam : Academic Press, 2023. — 1282 p.

7. Resonance-Free Shunt Capacitors Configurations, Design Methods and Comparative Analysis / W. Xu, T. Ding X. Li, H. Liang // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2016. – Vol. 31, no. 4. – P. 1654–1662. – DOI: 10.1109/TPWRD.2015.2507440.

8. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий //– 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, 2000. – 332 с.

9. Железко, Ю.С., Кордюков, Е.И. Высшие гармоники и напряжения обратной последовательности в энергосистемах Сибири и Урала // Электричество. – 1989. – № 7. – С. 62–65.

10. Смирнов, С.С. Высшие гармоники в сетях высокого напряжения // – Новосибирск: Наука, 2010. – 327 с. – ISBN 978-5-02-023320-1.

11. Коверникова, Л.И., Смирнов, С.С. Один из подходов к поиску резонансных режимов на высших гармониках // Электричество. – 2005. – № 10. – С. 62–69.

12. Курбацкий, В.Г. Качество электроэнергии и электромагнитная совместимость технических средств в электрических сетях // – Братск: БрИИ, 1999. – 220 с.

13. Тульский, В. Н. Развитие методики определения фактического вклада при оценке качества электрической энергии в точке общего присоединения: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.14.02 / Тульский, В. Н; Московский энергетический институт. – Москва, 2004. – 134 с.

14. Осипов, Д.С., Горюнов, В.Н., Коваленко, Д.В. Идентификация резонансных режимов при наличии нелинейных нагрузок в системах электроснабжения промышленных предприятий.// Динамика систем, механизмов и машин. – 2014. – № 1. – С. 42–47.

15. Назиров, Х. Б. Разработка системы управления качеством электрической энергии в электрических сетях: диссертация ... кандидата технических наук: 05.14.02 / Назиров Х. Б. – Москва, 2012. – 200 с.

16. Джураев, Ш. Д. Разработка алгоритма снижения влияния токов высших гармоник на режим работы гидрогенераторов: диссертация ... кандидата технических наук: 05.14.02 / Джураев Ш. Д. – Москва, 2018. – 180 с.

17. Оркина, Б. Г. О высших гармониках в энергосистеме, питающей ртутные выпрямители // Электричество. – 1955. – № 2. – С. 41–49.

18. Фишлер, Я.Л., Урманов, Р.Н., Пестряева, Л.М. Трансформаторное оборудование для преобразовательных установок // – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 320 с.

19. Симуткин, М.Г. Разработка методов оценки влияния нелинейных электроприемников на режимы работы оборудования распределительных сетей: дис. … канд. техн. наук: 05.14.02 / Симуткин, М. Г. – М. 2014. – 163с.

20. Симуткин, М.Г., Тульский В.Н. Методы оценки влияния гармоник тока на силовые масленые трансформаторы и кабельные линии // Управление качеством электроэнергии: сборник трудов международной научно-практической конференции (Москва, 26–28 ноября 2014 г.). – Москва: МЭИ, 2017. – С. 161–170.

21. Влияние режимов работы автотрансформаторов на качество электроэнергии / Ю. В. Шаров, Р. Р. Насыров [и др.] // Электричество. – 2014. – № 6. – С. 10а–19.

22. Исследование влияния короны в электропередачах на качество электроэнергии по n-й гармонической составляющей тока и напряжения / Ю. В. Шаров, Р. Р. Насыров [и др.] // Электричество. – 2013. – № 6. – С. 8–13.

23. Лютер, Р. А. Учет влияния высших гармонических в кривые тока на работу синхронных генераторов // Электросила: сборник статей. – Москва; Ленинград: Госэнергоиздат, 1948. – № 5. – С. 19–22.

24. Костенко, М.П., Нейман, Л.Р., Блавдзевич, Г.Н. Электромагнитные процессы в системах с мощными выпрямительными установками // Москва: Изд-во АН СССР, 1946. – 108 с.

25. Володин, В.В., Рысев, А.М. Особенности расчетов несинусоидальности режимов электрических систем методом узловых напряжений // Применение математических методов при управлении режимами и развитием электрических систем: материалы конференции. – Иркутск, 1978. – С. 175–183.

26. Султонов, Ш.М., Секретарев, Ю.А. Современное состояние, проблемы и перспективы развития электроэнергетической системы Таджикистана // Материалы научно-практической конференции «Защита родины – священный долг каждого человека». – Душанбе, 2015. – С. 56–61.

27. Современное состояние электрических сетей Республики Таджикистан по качеству электрической энергии / Ю. В. Шаров, В. Н. Тульский [и др.] // Вестник ТТУ. – 2011. – № 4 (16). – С. 39–48.

28. Тульский, В.Н., Джураев, Ш.Дж. Актуальные проблемы обеспечения качества электроэнергии в энергосистеме Республики Таджикистан //

Экономическое развитие энергетики в Республике Таджикистан: материалы республиканской научно-практической конференции (Курган-Тюбе, 16 июня 2015 г.). – Курган-Тюбе: Институт энергетики Таджикистана, 2015. – С. 30–35.

29. Нурмахмадов, Д. Н. Гидроэнергетика Таджикистана: современное состояние и перспективы развития / Д. Н. Нурмахмадов; Министерство энергетики Республики Таджикистан. – Душанбе, 2009. – 112 с.

30. Инструментальная оценка качества электроэнергии в энергосистеме Республики Таджикистан / Ю. В. Шаров, В. Н. Тульский [и др.] // Управление качеством электроэнергии: сборник трудов международной научно-практической конференции (Москва, 23–25 ноября 2016 г.). – Москва: МЭИ, 2017. – С. 219–226.

31. Современное состояние и перспективы обеспечения качества электроэнергии в электрических сетях открытой акционерной холдинговой компании «Барки Точик» / В. Н. Тульский [и др.] // Вестник МЭИ. – 2018. – № 1. – С. 34–40.

32. Study and Analysis of Power Quality of Electric Power System. Case Study: Republic of Tajikistan / V. N. Tulsky, B. J. Inoyatov [et al.] // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus) (Saint Petersburg, Russia, January 29 – February 1, 2018). – St. Petersburg: Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», 2018. – Section 7. – P. 837–843.

33. Шамонов, Р. Г. Разработка методики оценки влияния качества электроэнергии на потери мощности и энергии в электрических сетях: диссертация ... кандидата технических наук: 05.14.02 / Шамонов, Р. Г. – Москва, 2003. – 155 с.

34. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. В 2 т. Т. 1. Электрические цепи: учебник для вузов / Л. А. Бессонов. – 12-е изд., испр. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2023. – 831 с.

35. A comprehensive study approach for evaluation of resonance and ferro-resonance in HV substations. A case study: Khuzestan Regional Electric Company /

M. A. Amini [et al.] // International Journal of Research and Technology in Electrical Industry. – 2022. – Vol. 1, no. 1. – P. 57–65. – DOI: 10.52547/ijrtei.1.1.57.

36. Ҷӯраев, Ш. Ҷ. Электротехника (қисми 2). Занҷирҳои электрикии якфаза ва сефазаи ҷараёни синусоидалӣ: воситаи таълимӣ / Ш. Ҷ. Ҷӯраев, С. Т. Исмоилов. – Душанбе: ДТТ ба номи академик М. С. Осимӣ, 2021. – 168 с.

37. Иноятов, Б.Д. Разработка методики оценки состояния электрооборудования распределительных электрических сетей по результатам контроля качества электроэнергии: диссертация ... кандидата технических наук: 05.14.02 / Иноятов Б. Д. – Москва, 2019. – 121 с.

38. Камолов, М. М. Разработка методики расчёта и прогнозирования показателей качества электроэнергии в сетях коммунально-бытового назначения: диссертация ... доктора философии (PhD): 6D071800 – Электроэнергетика / Камолов М. М. – Душанбе, 2021. – 158 с.

39. Амирханов, А. С. Коркарди системаи идоракунии сифати энергияи электрикӣ дар корхонаҳои металлургияи ранга (дар мисоли ҶСК «ШАТ»): диссертация ... номзади илмҳои техникӣ // Амирханов А. С. – Душанбе, 2023. – 167 с.

40. IEEE Std 519-1992. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. – New York: IEEE, 1993. – 100 p.

41. Баланс энергий в электрических цепях // В.Е. Тонкаль, А.В. Новосельцев [и др.] – Киев: Наук. думка, 1992. – 312 с.

42. Кенкс, Ю.А., Жураховский, А.В. Реактивная мощность в линейных электрических цепях при несинусоидальных режимах // Электричество. – 1998. – № 7. – С. 55–62.

43. Шульц, Ю. Электроизмерительная техника: 1000 понятий для практиков: справочник // перевод с немецкого под редакцией К. К. Зелова. – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 288 с.

44. Осипов, Д. С., Коваленко, Д. В., Долгих, Н. Н. Расчет резонанса тока высших гармониках в системах электроснабжения на основе пакетного

вейвлетпреобразования // Динамика систем, механизмов и машин. – 2017. – Т. 5, № 3. – С. 68–78. – DOI: 10.25206/2310-9793-2017-5-3-68-78.

45. Harmonic resonance mode analysis / W. Xu, Z. Huang [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2005. – Vol. 20, no. 2. – P. 1182–1190.

46. Нгуен, Д. Д. Разработка методики исследования распространения высших гармоник в электроэнергетических системах: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.14.02 / Нгуен Динь Дык; Московский энергетический институт. – Москва, 2008. – 143 с.

47. Лосев, С.Б., Чернин, А.Б. Вычисление электрических величин в несимметричных режимах электрических систем // Москва: Энергоатомиздат, 1983. – 527 с.

48. О проекте Технологических правил оптового рынка электроэнергии: в научно-техническом совете ОАО РАО «ЕЭС России» // Энергетик. – 2004. – № 1. – С. 12–15.

49. О программе разработки национальных стандартов на 2005 год для обеспечения общего технического регламента «Об электромагнитной совместимости»: (информация секретариата ТК 30) // Технологии электромагнитной совместимости. – 2004. – № 4 (11). – С. 10–18.

50. Общий технический регламент «Об электромагнитной совместимости» // Новости электротехники. – 2004. – № 4. – С. 58–62.

51. Трубилов, В. Закон о техническом регулировании ставит задачи // Новости электротехники. – 2003. – № 3. – С. 22–23.

52. Яременко, В.Н., Суров, В.Н. Анализ мероприятий по повышению качества электроэнергии на Братском алюминиевом заводе // Промышленная энергетика. – 1995. – № 12. – С. 45–47.

53. CIGRE Working Group 36-05. Harmonics – characteristic parameters – methods of study – estimates of existing values in the network // Electra. – 1981. – No. 77. – P. 35–54.

54. Masada, E., Nishimoto I., Hashimoto E. Present state and future estimation of harmonic interference's in Japan // Catalogue of CIGRE Papers and Session Papers. – Paris, 1990. – P. 1–8.

55. Slonim, M.A., Van Wyk J.D. Power components in system with sinusoidal and nonsinusoidal voltages and occurrence // IEE Proceedings B (Electric Power Applications). – 1988. – Vol. 135, no. 2. – P. 76–84.

56. Воронин, В. П. Научно-техническая политика ОАО РАО «ЕЭС России» // Энергетик. – 2004. – № 7. – С. 12–15.

57 Контроль гармонических искажений в электрических сетях Австралии / Д. К., Геддей, Д., С. Смит [и др.] // Влияние электроустановок высокого напряжения на окружающую среду: перевод докладов Международной конференции по большим электрическим системам (СИГРЭ-86) / под редакцией Ю. П. Шкарина. – Москва: Энергоатомиздат, 1988. – С. 51–59.

58. Железко, Ю. С. О совершенствовании нормативных документов, определяющих отношения энергоснабжающих организаций и потребителей в части качества электроэнергии и условия потребления реактивной мощности // Промышленная энергетика. – 2000. – № 6. – С. 25–27.

59. Железко, Ю.С. Стандартизация параметров электромагнитной совместимости в международной и отечественной практике // Электричество. – 1996. – № 1. – С. 2–7.

60. ГОСТ Р 8.622-2006. Государственная система обеспечения единства измерений. Показатели качества электрической энергии. Методика выполнения измерений при проведении контроля качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Москва: Стандартинформ, 2006. – 73 с.

61. РД 153-34.0-15.502-2002. Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Часть 2. Анализ качества электрической энергии. – Москва: НЦ ЕЭН, 2002. – 32 с.

62. Галанов, В.П., Галанов, В.В. К вопросу определения вклада нагрузки тяговой подстанции в ухудшение несинусоидальности напряжения // Промышленная энергетика. – 1999. – № 12. – С. 33–38.

63. Кордюков, Е. И. Многоцелевая оптимизация качества электроэнергии и средств его улучшения в системах электроснабжения электрических железных дорог и промышленных предприятий: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.14.02 / Кордюков Евгений Иванович; Омский институт инженеров железнодорожного транспорта. – Омск, 1993. – 42 с.

64. Курбацкий, В. Г. Мониторинг качества электроэнергии в электрических сетях России для выбора мероприятий по обеспечению электромагнитной совместимости: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.14.02 / Курбацкий Виктор Георгиевич; Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН. – Иркутск, 1997. – 46 с.

65. Тимофеев, Д.В. Режимы в электрических системах с тяговыми нагрузками // Москва : Энергия, 1972. – 296 с.

66. Mahmoud, A.D., Schults, R.D. A method for analyzing harmonic distribution in a.c. power systems // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1982. – Vol. PAS-101, no. 6. – P. 1815–1824.

67. Железко, Ю.С., Живов, С.А. Применение скидок и надбавок к тарифу за качество энергии // Промышленная энергетика. – 1990. – № 11. – С. 24–28.

68. Проблемы установления размера ответственности за ухудшение качества электрической энергии и пути их решения / В. С. Соколов, В. В. Скакунов [и др.] // Промышленная энергетика. – 1999. – № 8. – С. 52–55.

69. Уильямс, Т. ЭМС для разработчиков продукции / перевод с английского В. Н. Романова. – Москва: Издательский дом «Технологии», 2003. – 540 с.

70. Правила технологического присоединения энергопринимающих устройств потребителей электрической энергии, объектов по производству

электрической энергии, а также объектов электросетевого хозяйства, принадлежащих сетевым организациям и иным лицам, к электрическим сетям: утверждены постановлением Правительства Российской Федерации от 27 декабря 2004 г. № 861. – Москва, 2005.

71. О программе разработки национальных стандартов на 2005 год для обеспечения общего технического регламента «Об электромагнитной совместимости»: (информация секретариата ТК 30) / Секретариат ТК 30. – Текст: непосредственный // Технологии электромагнитной совместимости. – 2004. – № 4 (11). – С. 10–18.

72. Глинтерник, С.Р. Электромагнитная совместимость мощных вентильных преобразователей и электрических систем // лектричество. – 1991. – № 5. – С. 1–4.

73. Головщиков, В.О., Курбацкий, В.Г., Яременко, В.Н. Экспериментальный анализ несинусоидальности режимов работы Северо–Восточной ОЭС Сибири // Электрические станции. – 1988. – № 11. – С. 53–56.

74. Курбацкий, В. Г. Исследование качества электрической энергии в протяженных системах тягового электроснабжения // Улучшение качества и снижение потерь электрической энергии в системах электроснабжения железных дорог. – Омск, 1991. – С. 75–81.

75. Investigation of resonance phenomena in power lines supplying powerful rectifier plants / S. Molot, V. Kovalenko [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 288. – Art. 01053. – P. 1–6. DOI:10.1051/e3sconf/202128801053.

76. High order spectral analysis of ferroresonance phenomena in electric power systems / T. C. Akinci [et al.] // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – P. 61289–61297.

77. Осипов, Д.С., Дюба Е.А. Анализ несинусоидальных нестационарных режимов электрических сетей на основе вейвлет-преобразований // Вестник Югорского государственного университета. – 2023. – Вып. 3 (70). – С. 117–126.

78. Разработка метода расчета потерь мощности в токоведущих частях при наличии интергармоник / Д. С. Осипов [и др.] // Омский научный вестник. – 2017. – № 4 (154). – С. 60–65.

79. Электрические системы. Математические задачи электроэнергетики: учебник для студентов вузов / В. А. Веников [и др.]; под редакцией В. А. Веникова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 1981. – 288 с.

80. Филяев, К. Ю. Математические задачи электроэнергетики: учебно-методический комплекс / К. Ю. Филяев. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – 211 с.

81. Ҷӯраев, Ш. Ҷ. Масъалаҳои математикӣ дар электроэнергетика: восоити таълимӣ барои иҷрои корҳои мустақилона / Ш. Ҷ. Ҷӯраев, Ҷ. Б. Раҳимов, Ш. М. Султонов. – Душанбе: ДТТ ба номи академик М. С. Осимӣ, 2021. – 94 с.

82. Методика формирования математической модели ЭЭС для расчетов несинусоидальных установившихся режимов и исследования резонансных явлений. Часть 1. Алгоритм методики и практические аспекты моделирования / В.Е. Солодовников [и др.] // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2023. – № 4 (79). – С. 54–62. – EDN: GGAEKK.

83. Методика формирования математической модели ЭЭС для расчетов несинусоидальных установившихся режимов и исследования резонансных явлений. Часть 2. Апробация методики / В.Е. Солодовников [и др.] // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2023. – № 5 (80). – С. 72–85. – EDN: CHDQPB.

84. Коваленко, Д.В. Определение резонансной частоты системы электроснабжения при изменении степени компенсации реактивной мощности и наличии высших гармоник // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2017. – № 8-1. – С. 16–21.

85. Тугунцев, С.Г. Разработка мероприятий по устранению резонансных явлений на частотах высших гармоник на линии электропередачи 35 кВ // Вестник ИГЭУ. – 2023. – Вып. 5. – С. 40–50.

86. Коверникова, Л.И. Активный мощности гармоника в узлах присоединения нелинейный высокого напряжения // Электричество. – 2017. – № 3. – С. 12–20.

87. Асанов, А.К. Прогнозирование тока высших гармоник в городских распределительных сетях 0,38 кВ // Известия КГТУ им. И. Раззакова. – 2018. – № 3 (47). – С. 43–46.

88. Power system series harmonic resonance assessment based on improved modal analysis / H. Zhou [et al.] // Istanbul University Journal of Electrical & Electronics Engineering. – 2007. – Vol. 7, no. 2. – P. 423–430.

89. Исследование влияния источников высших гармоник на качество электроэнергии в электроэнергетических системах 220–500 кВ / И.И. Карташев [и др.] // Электричество. – 2013. – № 1. – С. 13–18.

90. Коваленко, Д.В. Определение резонансной частоты системы электроснабжения при изменении степени компенсации реактивной мощности и наличии высших гармоник // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2027. – №8. – С. 16-21.

91. Салимова, А.С., Тульский, В.Н., Шамонов, Р.Г. Метод анализа высших гармоник напряжения в магистральной электрической сети // Элекричество. – 2014. – № 7. – С. 26-33.

92. Валиуллин, К.Р. Исследование резонансных явлений в цепях со светодиодными светильниками // ЭлСиК. – 2021. – №4(53). – С. 56-61.

93. Кучумов, Л.А., Кузнецов, А.А. Методика расчета высших гармоник токов намагничивания понижающих трансформатор // Элекричество. – 1998. – №3. – С. 15-22.

94. Использование метода гармонического баланса для расчета несинусоидальных и несимметричных режимов в системах электроснабжения / Л.А. Кучумов [и др.] // Элекричество. – 1999. – №12. – С.12-22.

95. Investigation of resonance phenomena in power lines supplying powerful rectifier plants / Svetlana Molot, Vasilina Kovalenko, Elena Pylskaya [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 288. – P. 01053. – DOI: 10.1051/e3sconf/202128801053.

96. Study on the Method for Analyzing Electric Network Resonance Stability / Zheng Xu, Shijia Wang, Facai Xing [et al.]. // Energies. – 2018. – Vol. 11, no. 3. – Art. 646. – DOI: 10.3390/en11030646.

97. Федосов, Д.С., Тарасов, И.А., Воронцов, Д.В. Исследование резонансных явлений на высших гармониках в схеме внешнего электроснабжения нелинейной нагрузки // Вестник ИрГТУ. – 2016. – № 4 (111). – С. 145–154.

98. Ощепков, В.А., Логунова, Я.Ю. Расчет резонансных режимов в электрический сетях при наличии источников высших гармоников // Вестник Югорского государственного университета. – 2023. – Вып. 1 (68). – С. 147–155.

99. Osipov, D. S., Kovalenko, D. V., Dolgikh, N. N. Calculation of currents resonance at higher harmonics in power supply systems based on wavelet packet transform // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics) (Omsk, Russia, 14–16 Nov. 2017). – Omsk, 2017. – DOI: 10.1109/Dynamics.2017.8239492.

100. Обзор современных исследований по идентификации резонансных режимов, возникающих в элементах электрических сетей промышленных предприятий и коммунально-бытового сектора / Д.В. Коваленко, Е.А. Пугачева, Д.А [и др.] // Омский научный вестник. – 2018. – № 6 (162). – С. 103–107. – DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-103-107.

101. Силкин, Д. А. О резонансах высших гармоник в электрический сетях // Труды Национального исследовательского университета «МЭИ». – Москва, 2018. – С. 184–187.

102. Анализ резонансных режимов в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой / Д.А. Шандрыгин, В.П. Довгун [и др.] / Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020. – Т. 24, № 2. – С. 396–407.

103. Wakiler, G. Power Systems Harmonics: Fundamentals, Analysis and Filter Design // – Berlin : Springer, 2001. – 506 p.

104. Eajal, A. A., El-Hawary, M. E. Optimal capacitor placement and sizing in unbalanced distribution systems with harmonics consideration using particle swarm

optimization // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2010. – Vol. 25, no. 3. – P. 1734–1741.

105. Rizzoni, Giorgio. Fundamentals of electrical engineering //– New York : McGraw-Hill Higher Education, 2009. – 726 p.

106. Optimal Capacitor Placement and Rating for Large-Scale Utility Power Distribution Systems / E. S. Jones, N. Jewell [et al.] // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – P. 19324–19338.

107. Gil-González, W. Optimal Placement and Sizing of D-STATCOMs in Electrical Distribution Networks Using a Stochastic Mixed-Integer Convex Model // Electronics. – 2023. – Vol. 12, no. 7. – Art. 1565. – DOI: 10.3390/electronics12071565.

108. Сидорова, В. Т. Метод оптимизации размещения компенсирующих и симметрирующих устройств в электрических сетях низкого напряжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2021. – Т. 13, № 2. – С. 45–56.

109. Тульский, В. Н. Ванин, А. С., Толба, М. А. Оптимизация размещения компенсирующих устройств и возобновляемой распределенной генерации в радиальных электрических сетях // Электричество. – 2018. – № 6. – С. 22–29.

110. Абрамович, Б. Н., Сычев, Ю. А. Многокритериальный выбор фильтрокомпенсирующих устройств для сетей с нелинейной нагрузкой // Промышленная энергетика. – 2015. – № 8. – С. 40–45.

111. A review of meta-heuristic algorithms for reactive power planning problem / A. M. Shaheen [et al.] // Ain Shams Engineering Journal. – 2018. – Vol. 9, no. 2. – P. 215–231.

112. Meng, K., Dong, Z. Y., Qiao, Y. Swarm Intelligence in Power System Planning // International Journal of Clean Coal and Energy. – 2013. – Vol. 2, no. 1. – P. 1–7.

113. Методика прогнозирования резонансных явлений в электроэнергетических системах с нелинейными нагрузками / Р. А. Алехин, Ю.

П. Кубарьков, Д. В [и др.] // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2019. – № 3 (63). – С. 6–19.

114. Prakash, K., Sydulu, M. Particle Swarm Optimization Based Capacitor Placement on Radial Distribution Systems // IEEE Power Engineering Society General Meeting (24–28 June 2007, Tampa, FL, USA). – IEEE, 2007. – P. 1–5.

115. Devabalaji, K. R., Ravi, K., Kothari, D. P. Optimal location and sizing of capacitor placement in radial distribution system using Bacterial Foraging Optimization Algorithm // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2015. – Vol. 71. – P. 383–390.

116. Elmaouhab, A., Boudour, M., Gueddouche, R. New Evolutionary Technique for Optimization Shunt Capacitors in Distribution Networks // Journal of Electrical Engineering. – 2011. – Vol. 26, no. 3. – P. 163–167.

117. Optimal Placement and Sizing of Reactive Power Compensation Devices in Power Grids with High Penetration of Distributed Generation // Nan Feng, Tao Niu, Jun Yan, Yufan Zhang, Yuyao Feng, Yuli Lei / Processes. – 2025. – № 13(9). – pp. 2-16. DOI: https://doi.org/10.3390/pr13092953.

ИНТИШОРОТ АЗ РӮЙИ МАВЗУИ ДИССЕРТАТСИЯ

Нашрияҳо дар маҷаллаҳои илмӣ, ки Комиссияи олии аттестатсионии назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон тавсия додааст:

[1-М] Ҳабибуллозода, З. Ҳ. Таҳқиқи реҷаи ғайрисинусоидалӣ дар шабакаҳои электрикӣ барои баҳодиҳии ба вуҷуд омадани ҳодисаи резонанс / З. Ҳ. Ҳабибуллозода, Ш. Ҷ. Ҷӯразода, М. К. Ҷаборов, С. Т. Исмоилов // Паёми политехникӣ. Бахши: Таҳқиқоти муҳандисӣ. — 2025. — № 2 (70). — С. 47–58.

[2-М] Хабибуллозода, З. Х. Инструментальная оценка качества электрической энергии в южных электрических сетях Республики Таджикистан / З. Х. Хабибуллозода, Ш. Д. Джуразода, М. К. Джаборов [и др.] // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. — 2025. — № 1 (69). — С. 5–16.

[3-М] Ҳабибуллозода, З. Ҳ. Баррасии таҳқиқоти ҳисоби резонанс дар шабакаҳои электрикӣ / З. Ҳ. Ҳабибуллозода // Паёми политехникӣ. Бахши: Таҳқиқоти муҳандисӣ. — 2025. — № 4 (72). — С. 16–22. — DOI 10.65599/HYZM5412. — EDN GKBJCL.

[4-М] Хабибуллозода, З. Х. Методика прогнозирования резонансных явлений в электроэнергетических системах с нелинейными нагрузками / З. Х. Хабибуллозода, Ш. Д. Джуразода, С. А. Абдулкеримов [и др.] // Электричество. — 2026. — № 6. — С. 26–31.

[5-М] Хабибуллозода, З. Х. Применение метаэвристических алгоритмов для многокритериальной оптимизации размещения компенсирующих устройств с учетом рисков возникновения резонанса / З. Х. Хабибуллозода, Ш. Д. Джуразода, М. К. Джаборов, С. Т. Исмоилов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. — 2026. — № 1 (74). — С. 28–41.

Интишорот дар пойгоҳҳои байналмилалии SCOPUS ва IEEE

[6-М] Habibullozoda, Zikrullo. Valuation of Potential of Resonance Phenomena in Electric Power Systems Containing Nonlinear Loads / Zikrullo Habibullozoda, Jurazoda Shohin, Khurshed Nazirov [et al.] // 2026 ElCon Conference of Young Researchers in Power, Energy & Industry Applications (ElCon-PEIA). — Saint

Petersburg, 2026. — 03–05 February 2026. — DOI: 10.1109/ElCon-PEIA69858.2026.11452017.

Интишорот дар нашриҳои илмӣ, маводҳои конференсияҳои минтақавӣ ва байналмилалӣ:

[7-М] Саидбеков, З. Ҳ. Такмили усули пешгӯии ҳодисаи резонансӣ дар шабакаҳои электрикӣ ҳангоми мавҷуд будани манбаъҳои гармоникаи олӣ / З. Ҳ. Саидбеков, М. К. Ҷаборов, Д. С. Аминов, А. Ғ. Қаюмов // Энергетика соҳаи калидии рушди иқтисодиёти миллӣ: Конференсияи байналмилалии илмӣ-амалӣ. — Кӯшониён, 2023. — С. 16–24.

[8-М] Саидбеков, З. Ҳ. Баҳодиҳии сифати энергияи электрикӣ дар зернеругоҳи «Истиқлол» (110/35/10 кВ) / З. Ҳ. Саидбеков, М. К. Ҷаборов, А. Ғ. Қаюмов, А. С. Амирханов // Энергетика соҳаи калидии рушди иқтисодиёти миллӣ: Конференсияи байналмилалии илмӣ-амалӣ. — Кӯшониён, 2023. — С. 31–36.

[9-М] Саидбеков, З. Ҳ. Ҳисоб кардани реҷаҳои резонансӣ дар шабакаҳои электрикӣ ҳангоми мавҷуд будани манбаъҳои гармоникаи олӣ / З. Ҳ. Саидбеков, М. К. Ҷаборов, А. Ғ. Қаюмов // Энергетика: ҳолат ва дурнамои рушд: Конференсияи байналмилалии илмӣ-амалӣ. — Душанбе: Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М. С. Осимӣ, 2023. — С. 168–175.

[10-М] Саидбеков, З. Ҳ. Влияние резонансных частот на высших гармониках в системы электроснабжения / З. Ҳ. Саидбеков, М. К. Ҷаборов, А. Ғ. Қаюмов, Ф. Ҳ. Исматов // Энергетика соҳаи калидии рушди иқтисодиёти миллӣ: Конференсияи байналмилалии илмӣ-амалӣ. — Кӯшониён, 2024. — С. 78–86.

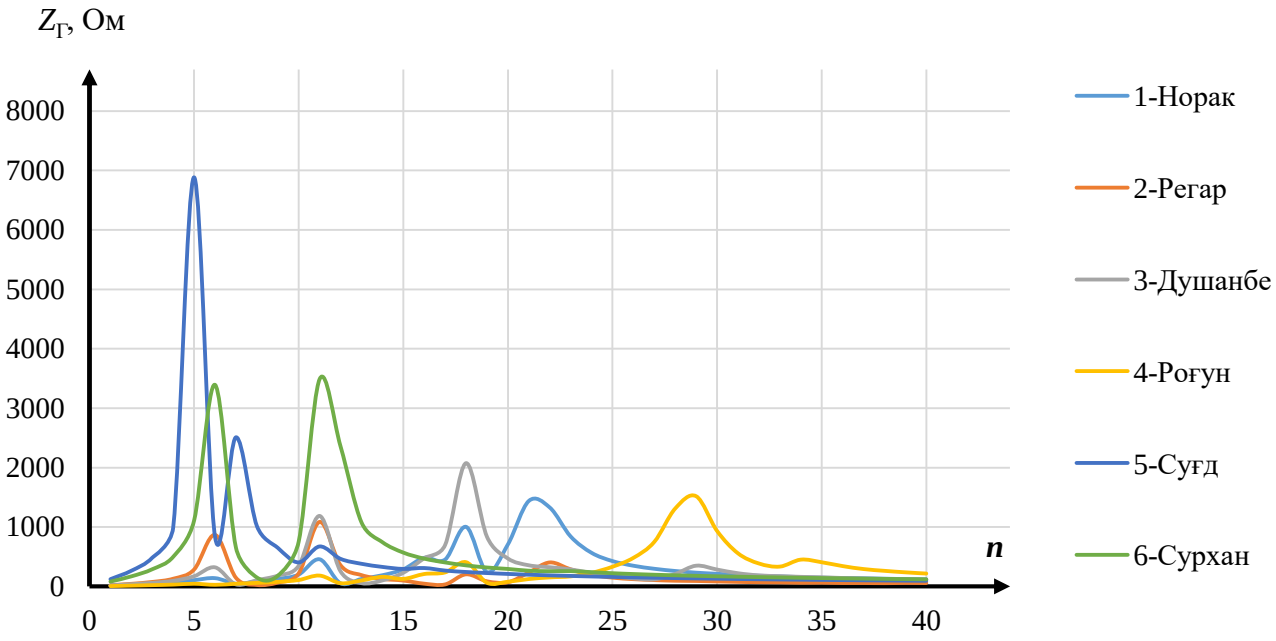
[11-М] Ҳабибуллозода, З. Ҳ. Баррасии усулҳои маъмули ҳисоби зуҳуроти резонанс дар шабакаҳои электрикӣ / З. Ҳ. Ҳабибуллозода, Ш. Ҷ. Ҷӯразода, С. Т. Исмоилов, М. К. Ҷаборов // Энергетика: ҳолат ва дурнамои рушд: Конференсияи байналмилалии илмӣ-амалӣ. — Душанбе: Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М. С. Осимӣ, 2024. — С. 38–46.

Шаҳодатномаҳои муаллифӣ ва патентҳо

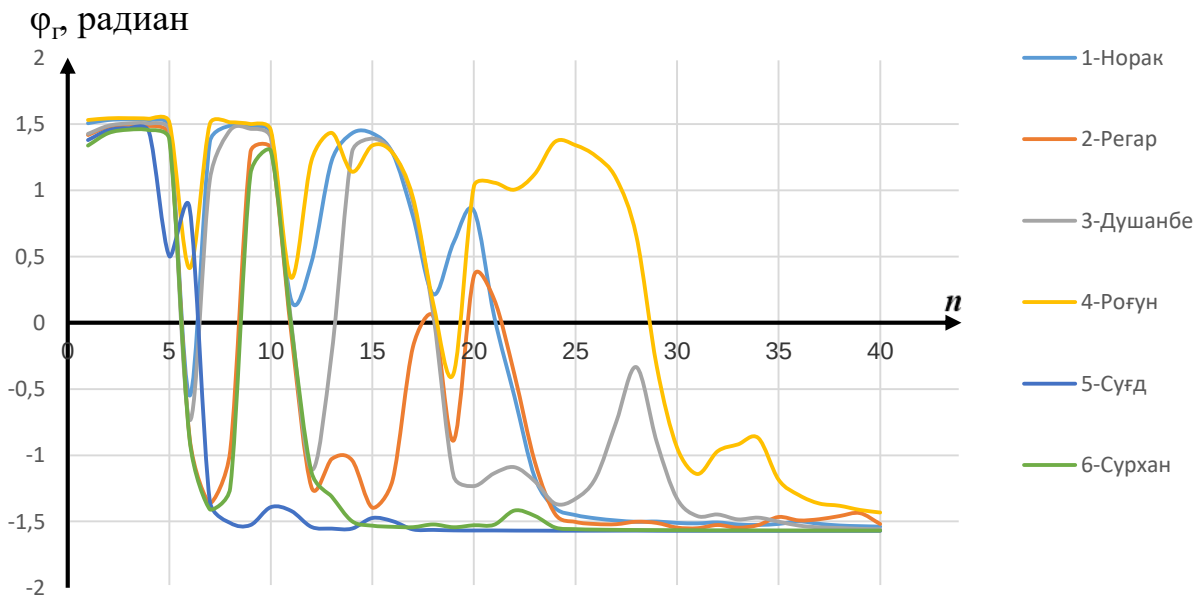
[12-М] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025685699 Российская Федерация. Программа для анализа и определения узлов в электроэнергетической системе, где возможны резонансные явления: заявл. 04.09.2025: опубл. 25.09.2025 / З. Х. Хабибуллозода, С. А. Абдулкеримов, Ш. Д. Джуразода [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ». — EDN OTHGQR.

ЗАМИМАҲО

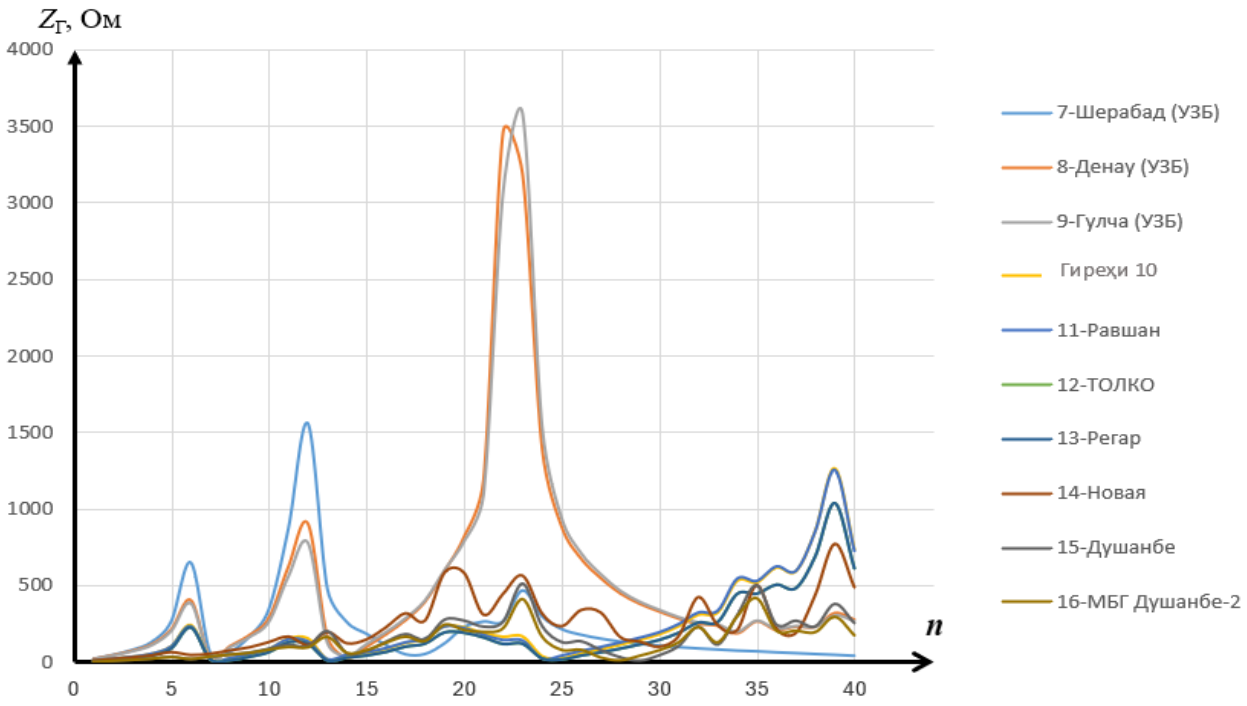
ЗАМИМАИ 1. Натиҷаҳои ҳисоб дар амсилаи коркард кардашуда дар барномам Etap



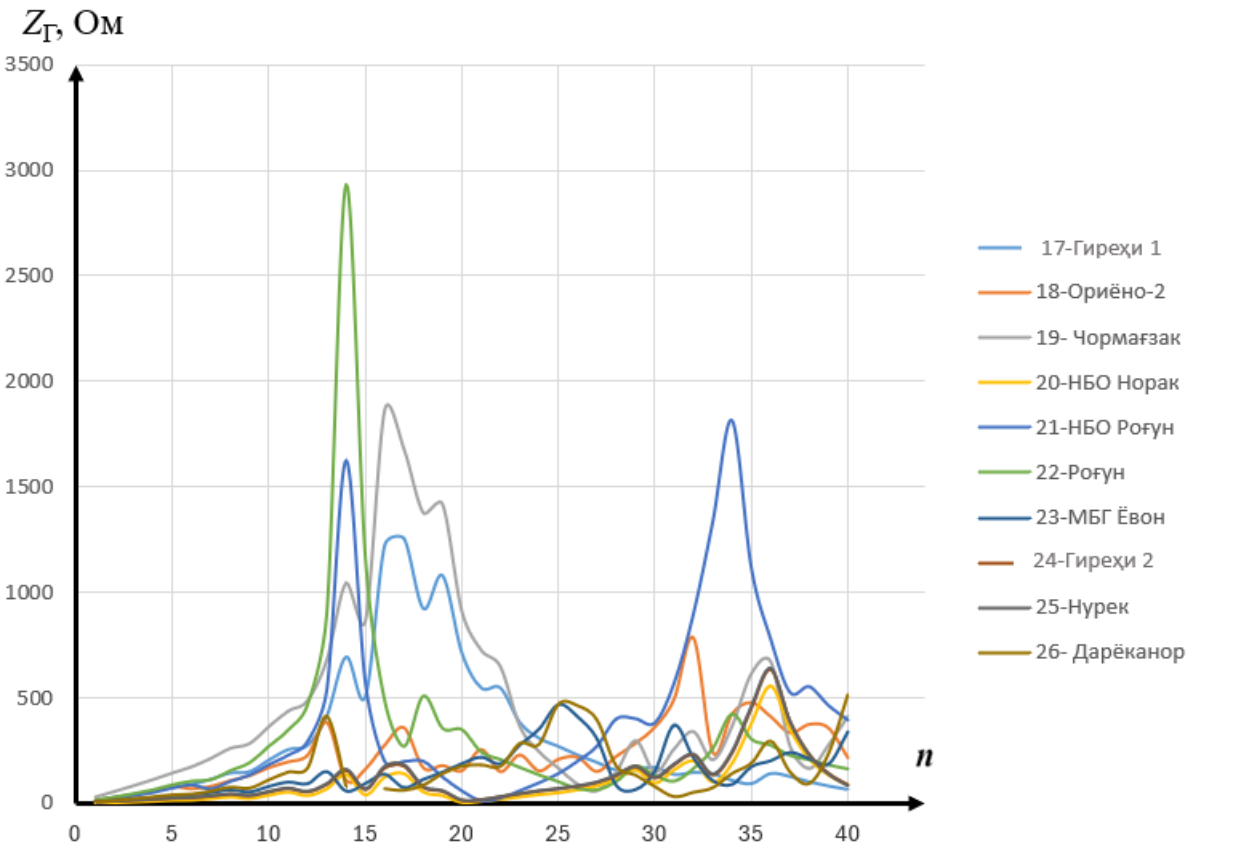
Расми 3.1.1. – ТАБ-и гирехҳои 500 кВ-и нақшаи таҳқиқшаванда дар реҷаи муътадил



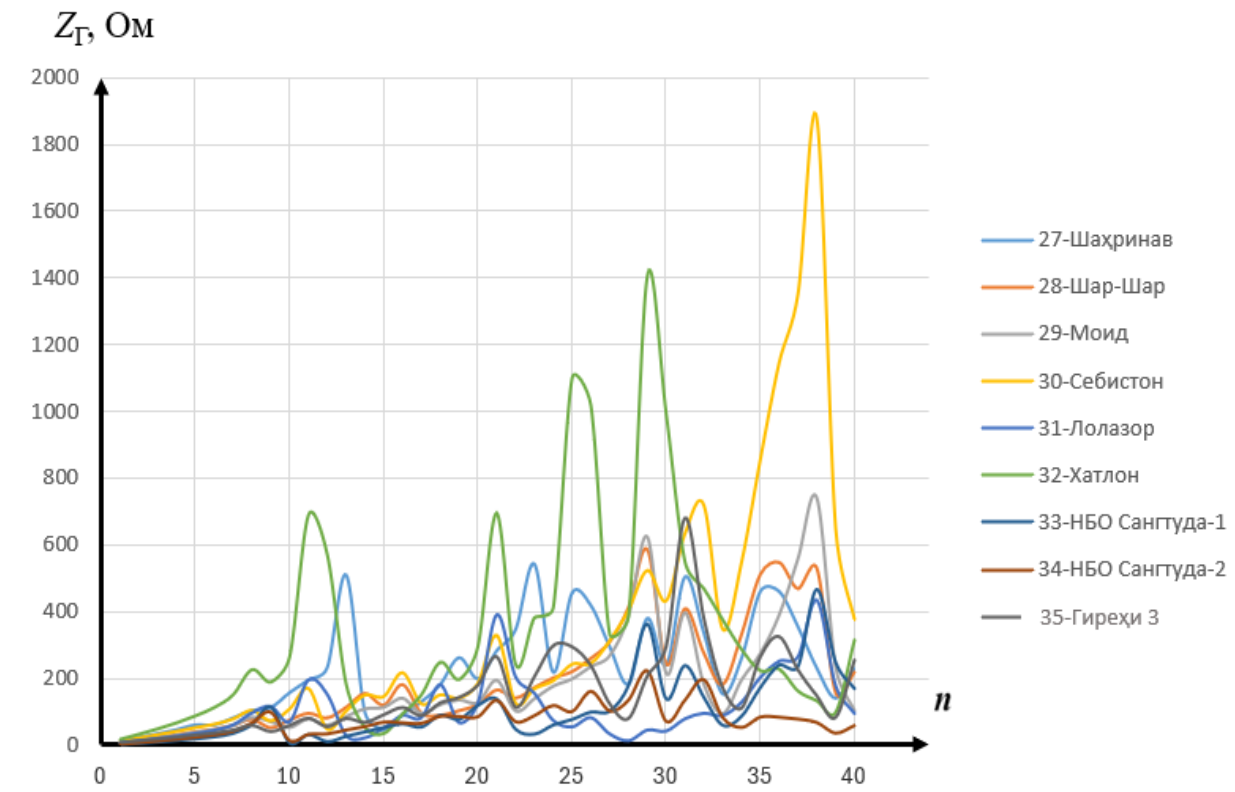
Расми 3.1.2. – Тавсифи фазавию басомадии (ТФБ) гирехҳои 500 кВ-и нақшаи таҳқиқшаванда дар реҷаи муътадил


$Z_Г$, Ом
4000
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
0
5
10
15
20
25
30
35
40
n
7-Шерабад (УЗБ)
8-Денау (УЗБ)
9-Гулча (УЗБ)
Гиреҳи 10
11-Равшан
12-ТОЛКО
13-Регар
14-Новая
15-Душанбе
16-МБГ Душанбе-2

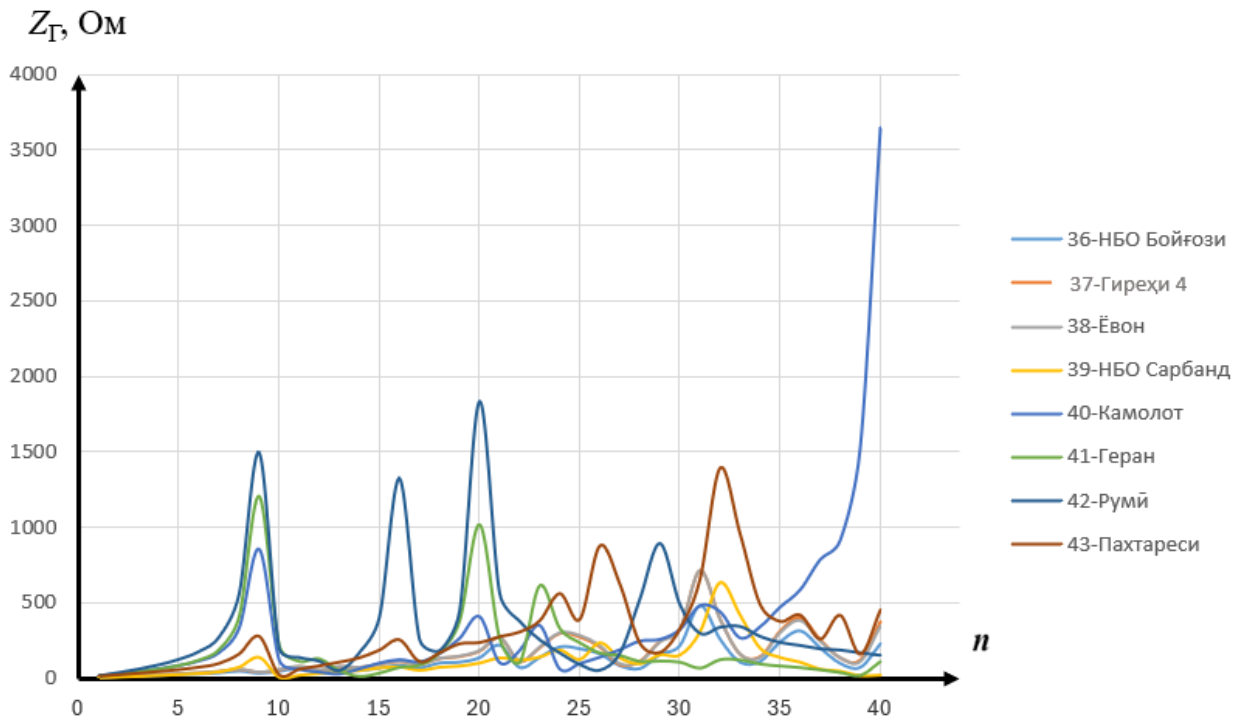
а)


$Z_Г$, Ом
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
0
5
10
15
20
25
30
35
40
n
17-Гиреҳи 1
18-Ориёно-2
19- Чормағзак
20-НБО Норак
21-НБО Роғун
22-Роғун
23-МБГ Ёвон
24-Гиреҳи 2
25-Нурек
26- Дарёканор

б)

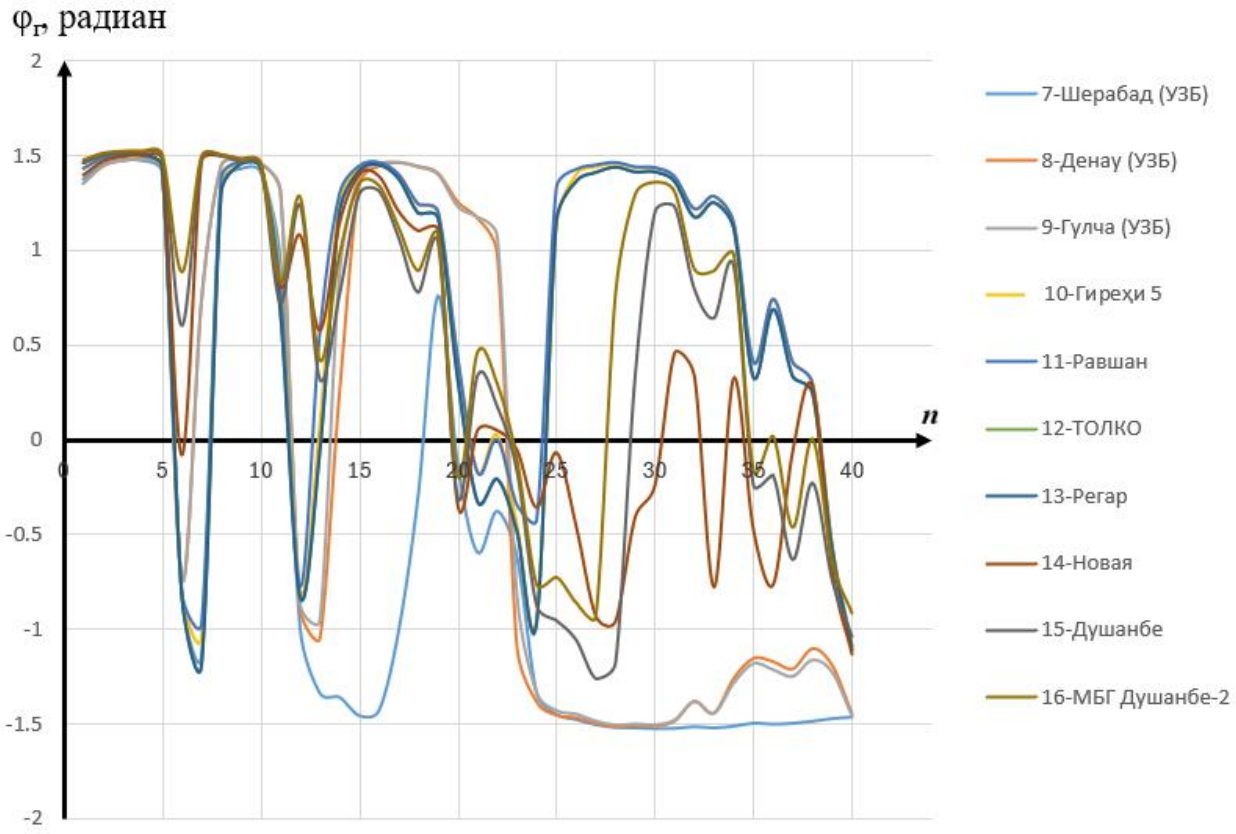


в)

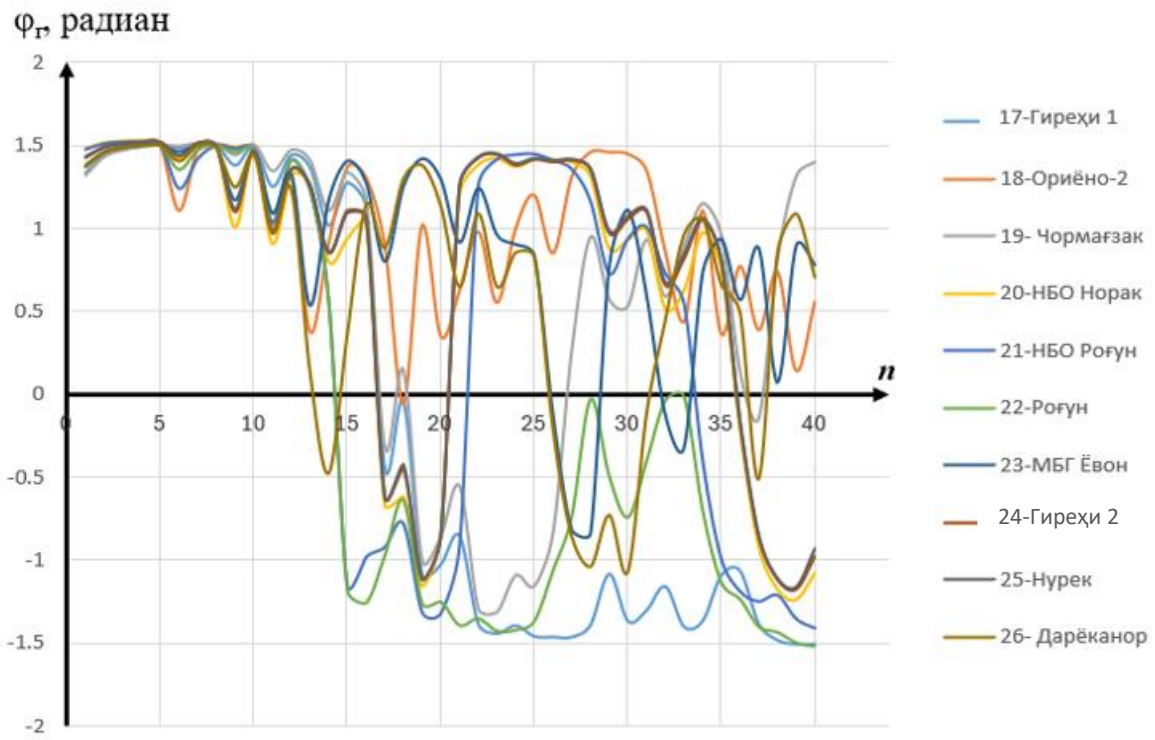


г)

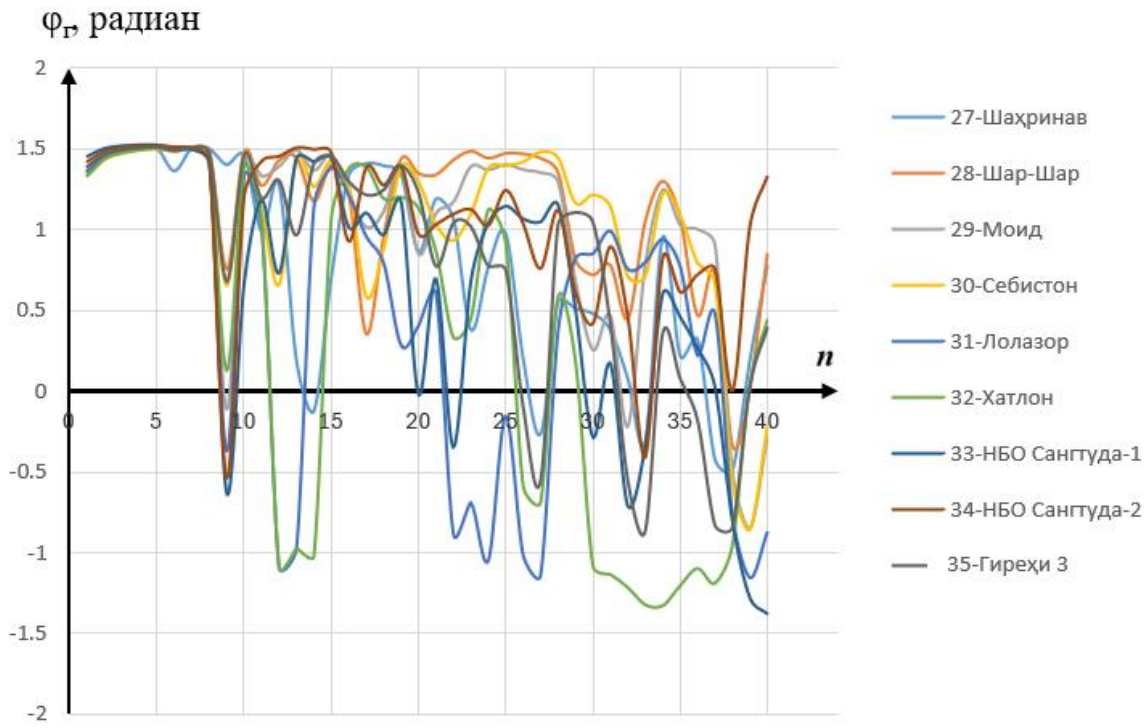
Расми 3.1.3. – ТАБ-и гирехҳои 220 кВ-и нақшаи таҳқиқшаванда дар реҷаи муътадил


φг, радиан
2
1.5
1
0.5
0
-0.5
-1
-1.5
-2
0
5
10
15
20
25
30
35
40
n
7-Шерабад (УЗБ)
8-Денау (УЗБ)
9-Гулча (УЗБ)
10-Гиреҳи 5
11-Равшан
12-ТОЛКО
13-Регар
14-Новая
15-Душанбе
16-МБГ Душанбе-2

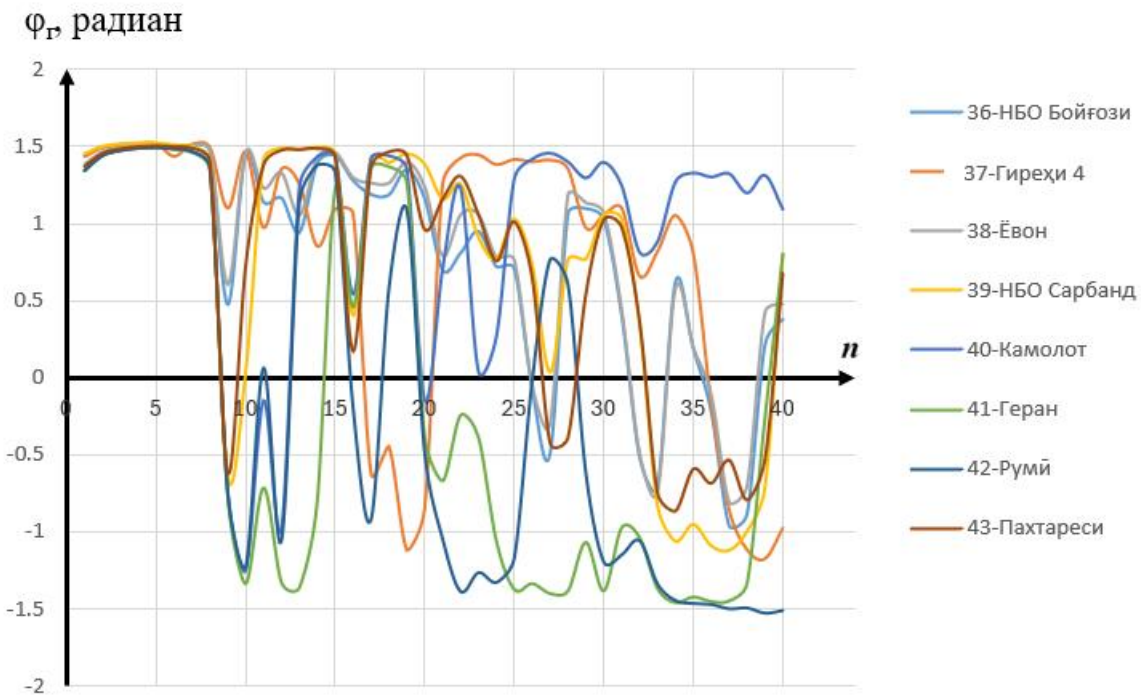
а)


φг, радиан
2
1.5
1
0.5
0
-0.5
-1
-1.5
-2
0
5
10
15
20
25
30
35
40
n
17-Гиреҳи 1
18-Ориёно-2
19- Чормағзак
20-НБО Норак
21-НБО Роғун
22-Роғун
23-МБГ Ёвон
24-Гиреҳи 2
25-Нурек
26- Дарёканор

б)

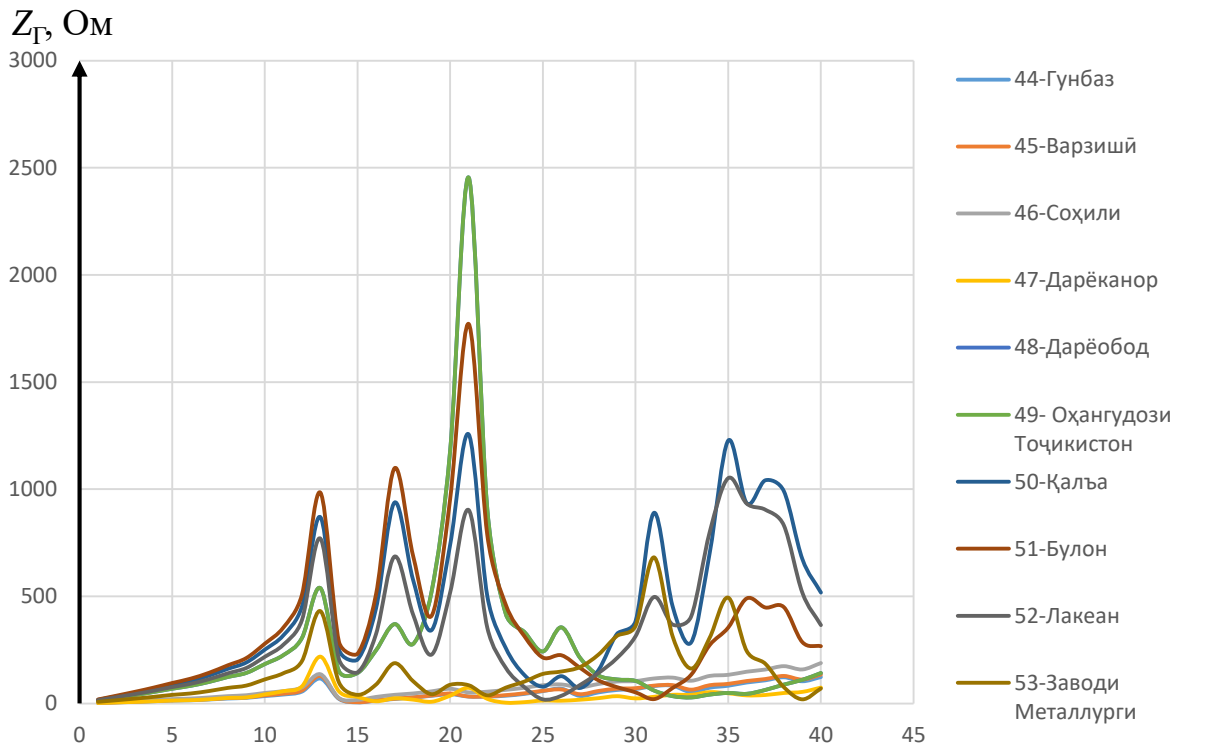


в)

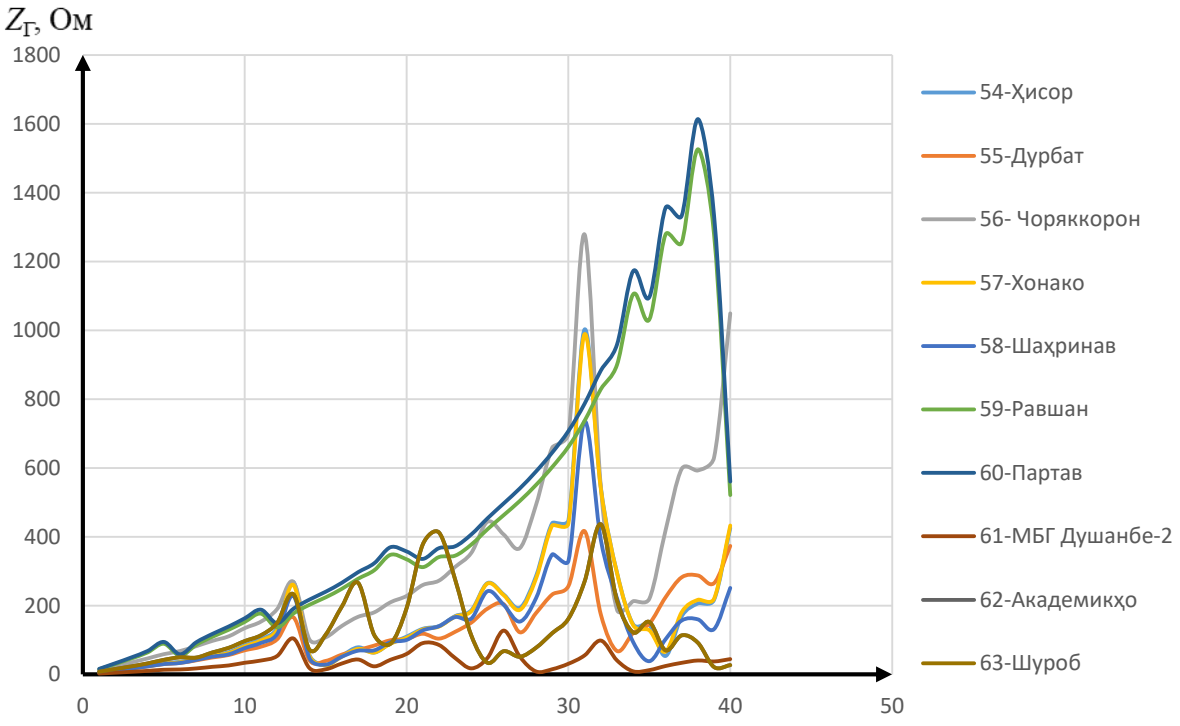


г)

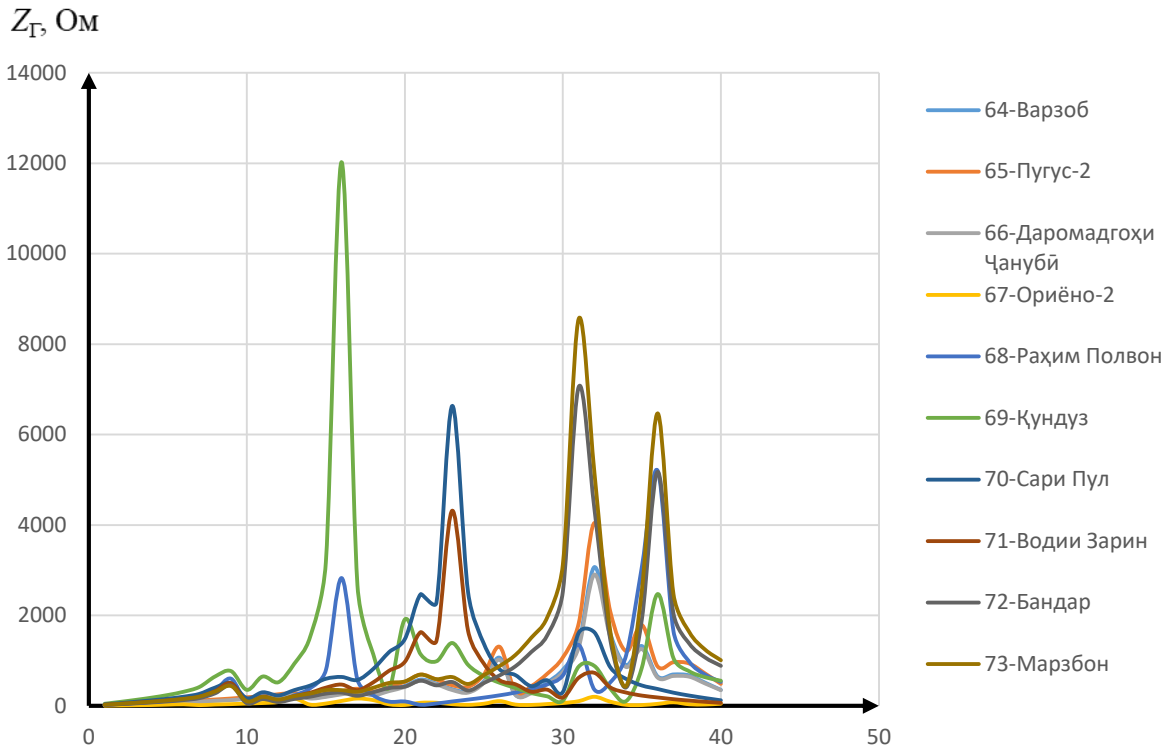
Расми 3.1.4. – Тавсифи фазавию басомадии гирехҳои 220 кВ-и нақшаи таҳқиқшаванда дар речаи муътадил


$Z_Г$, Ом
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
44-Гунбаз
45-Варзиш
46-Соҳили
47-Дарёканор
48-Дарёобод
49- Оҳангудози Тоҷикистон
50-Қалъа
51-Булон
52-Лакеан
53-Заводи Металлурги

а)

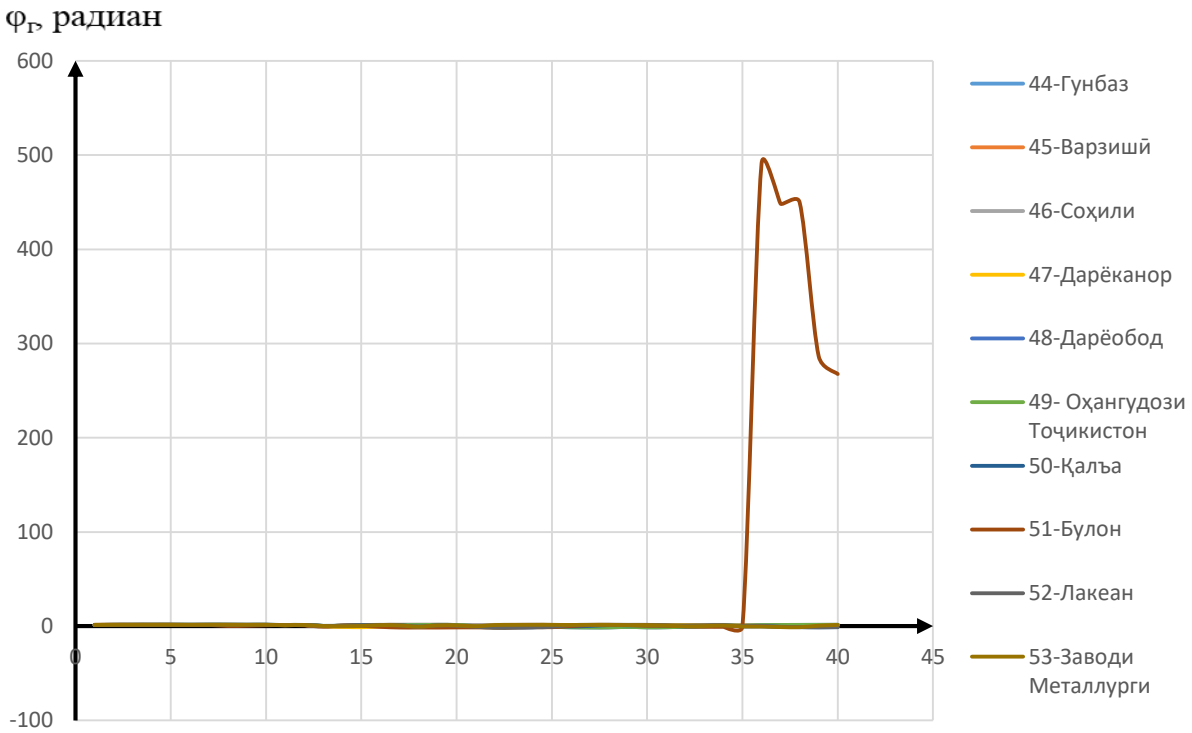

$Z_Г$, Ом
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
0
10
20
30
40
50
54-Ҳисор
55-Дурбат
56- Чоряккорон
57-Хонако
58-Шаҳринав
59-Равшан
60-Партав
61-МБГ Душанбе-2
62-Академикҳо
63-Шуроб

б)

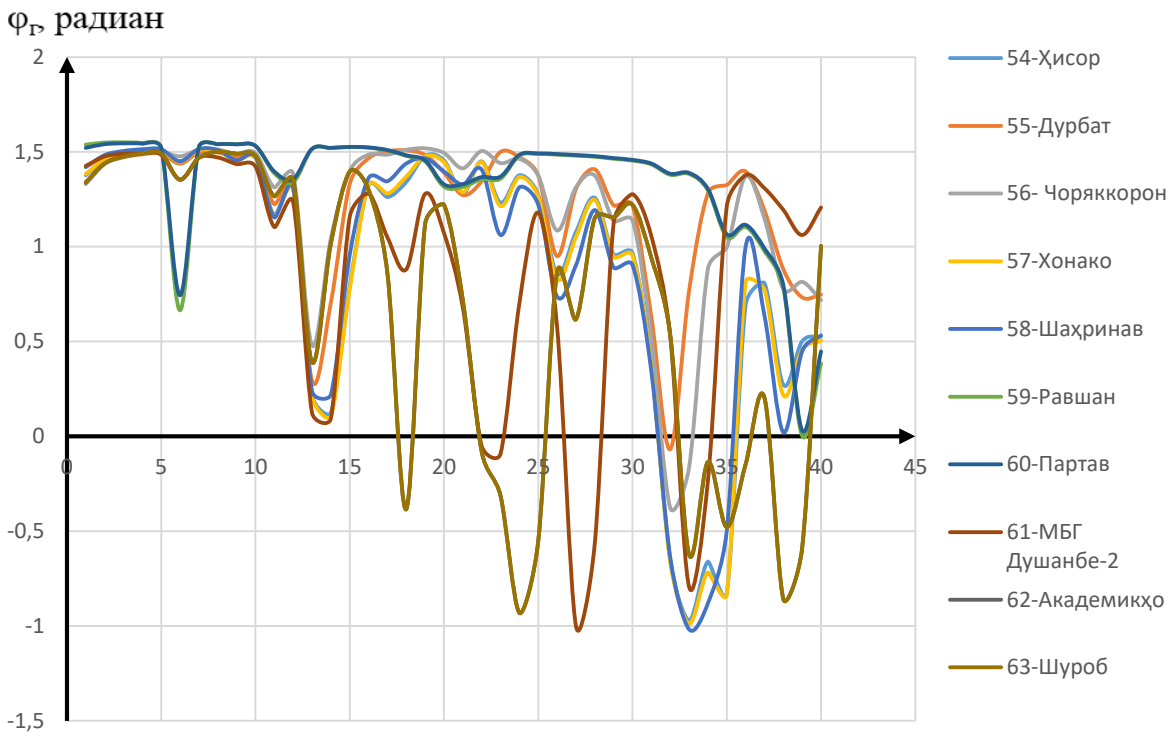


в)

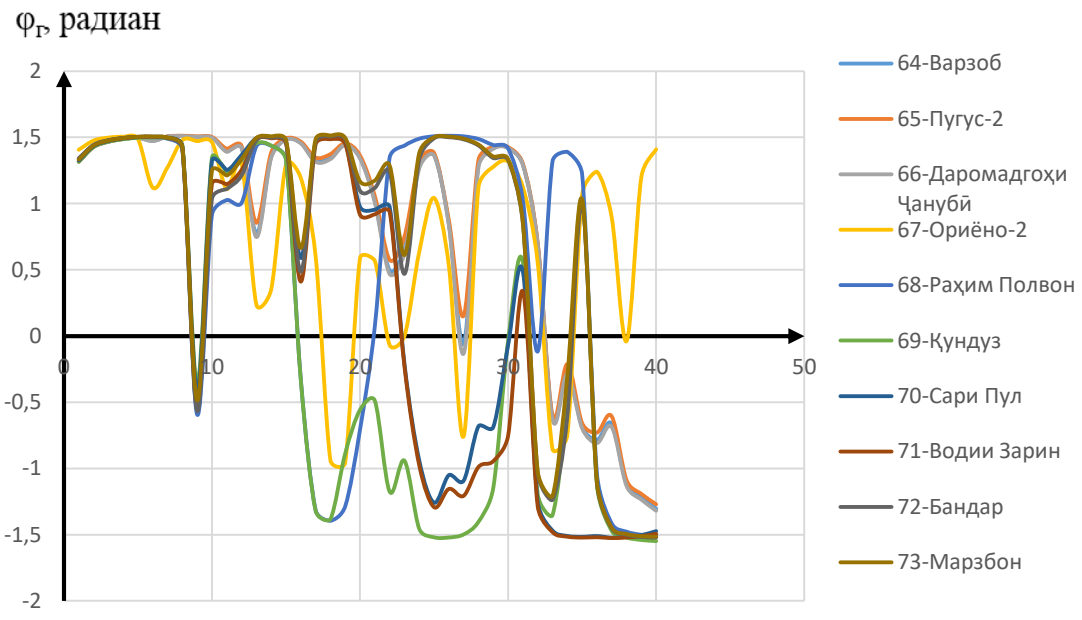
Расми 3.1.5. – ТАБ-и гирехҳои хоси 110 кВ-и нақшаи таҳқиқшаванда дар реҷаи муътадил



а)

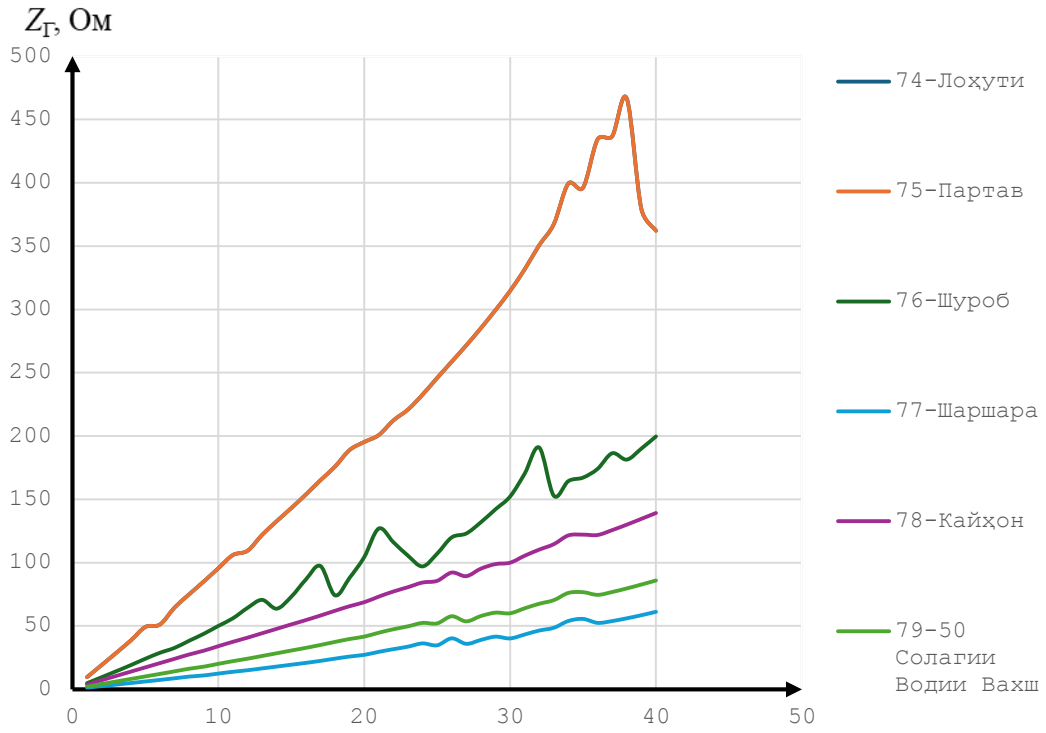


б)

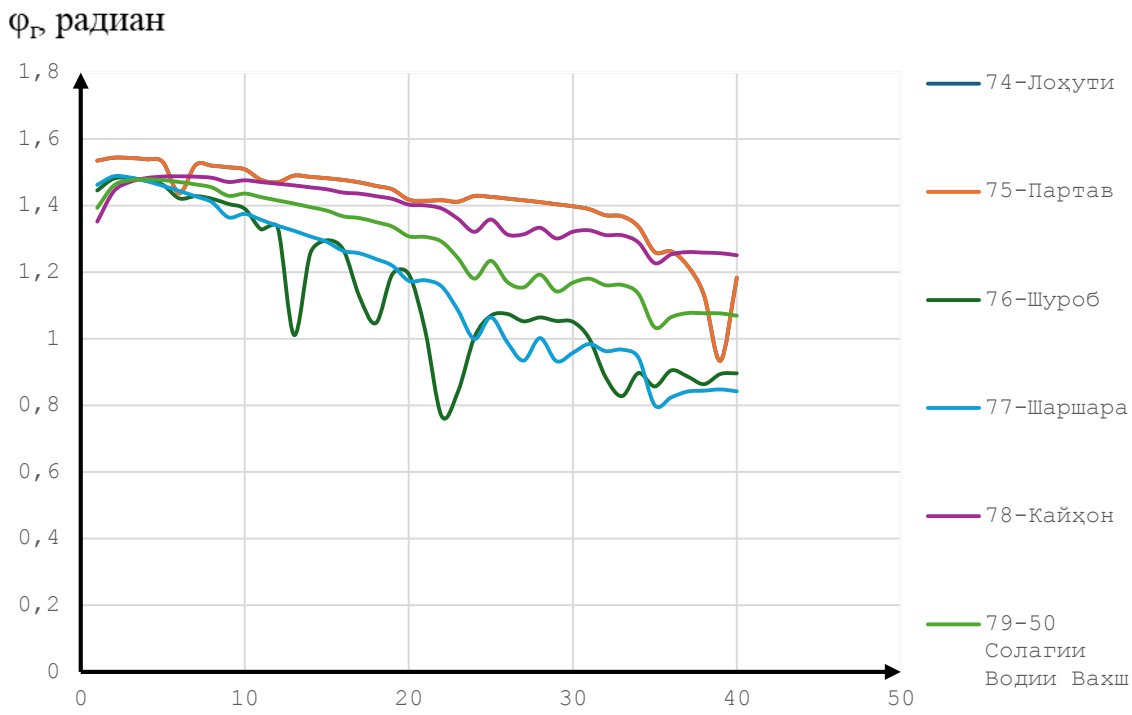


в)

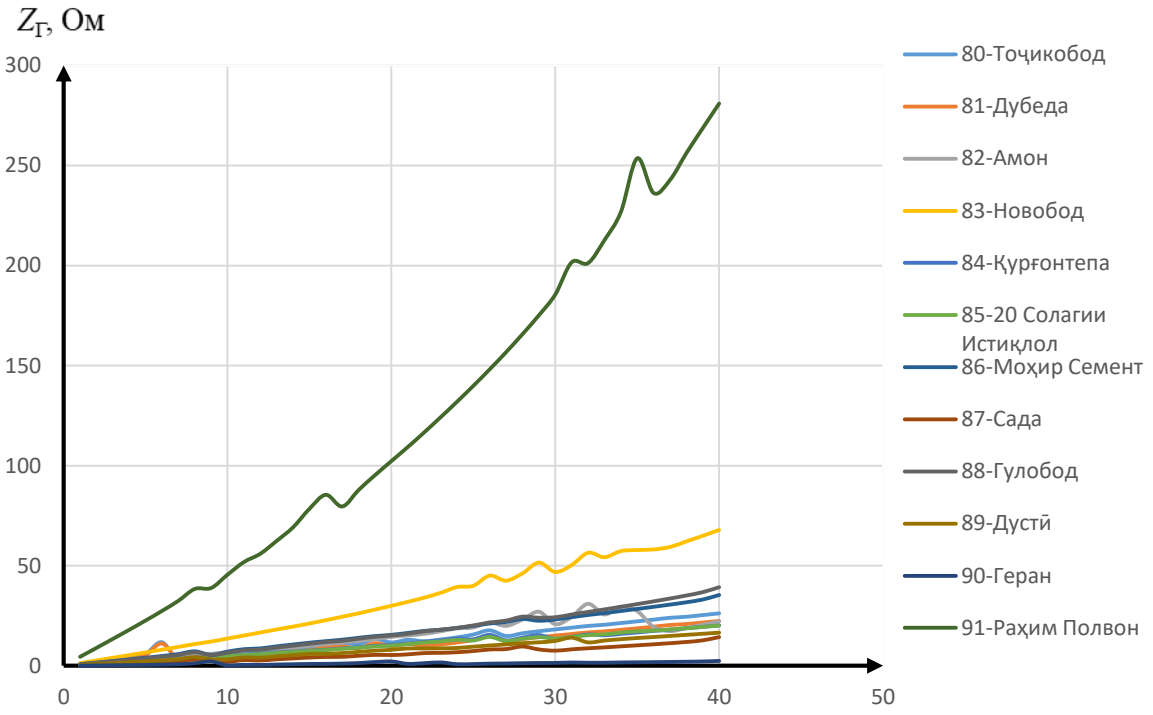
Расми 3.1.6. – Тавсифи фазавию басомадии гиреҳҳои 110 кВ-и нақшаи таҳқиқшаванда дар реҷаи муътадил



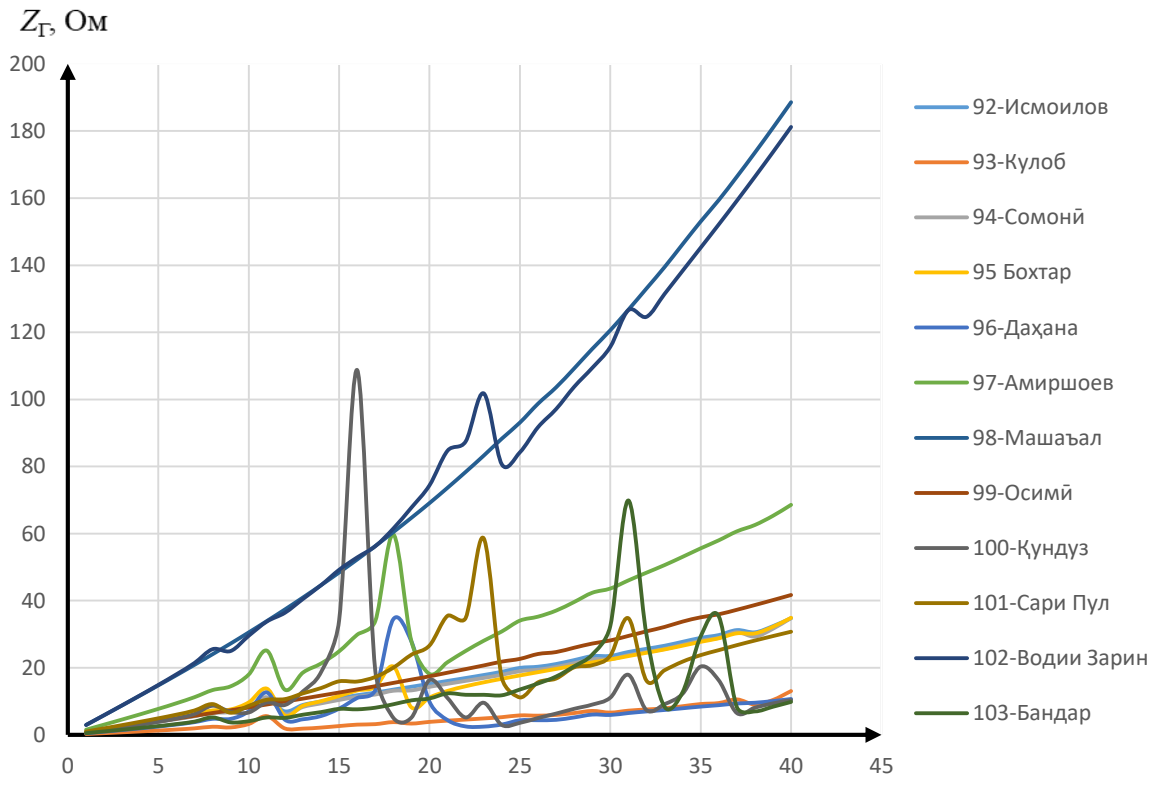
Расми 3.1.7. – ТАБ-и гиреҳҳои хоси 35 кВ-и нақшаи таҳқиқшаванда дар реҷаи муътадил



Расми 3.1.8. – Тавсифи фазавию басомадии гиреҳҳои 35 кВ-и нақшаи таҳқиқшаванда дар реҷаи муътадил

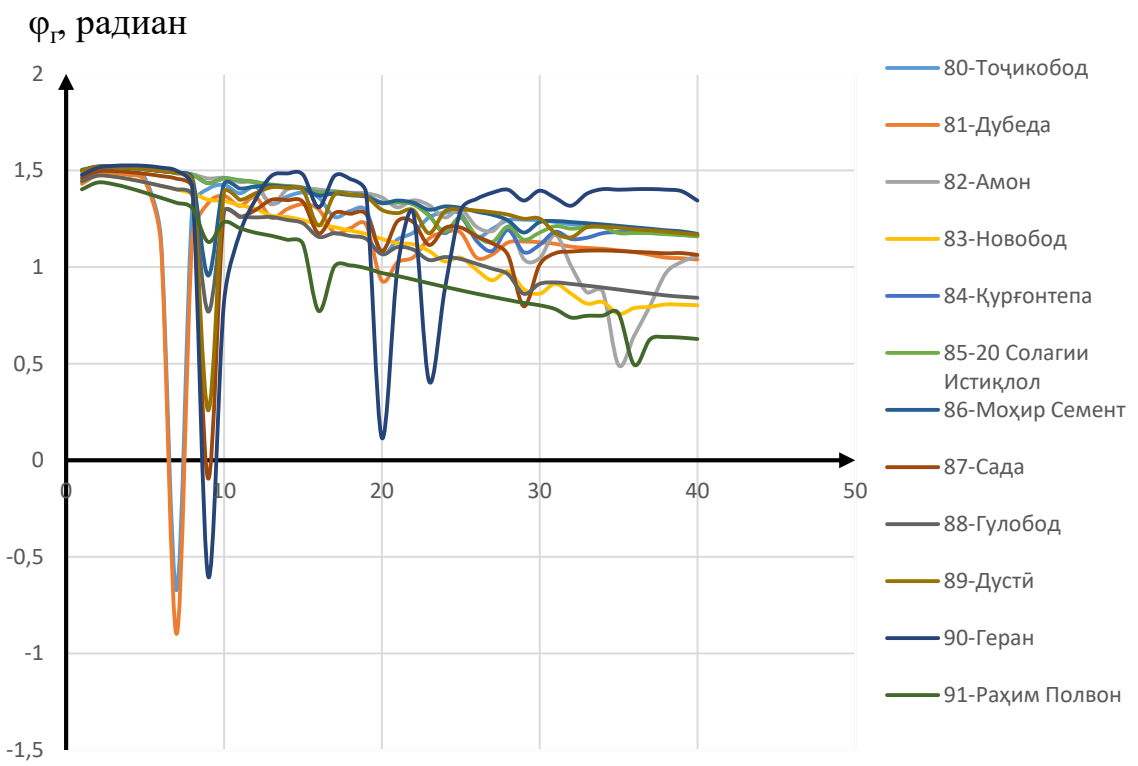


а)

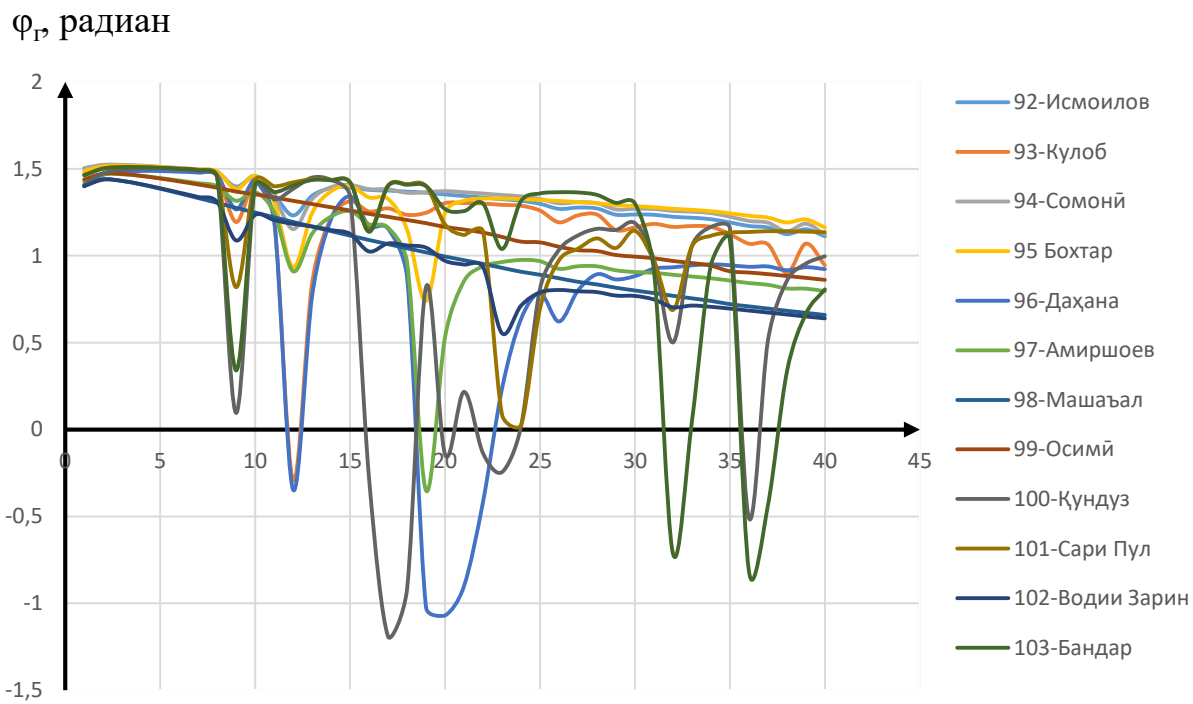


б)

Расми 3.1.9. – ТАБ-и гиреҳҳои хоси 10 кВ-и нақшаи таҳқиқшаванда дар реҷаи муътадил

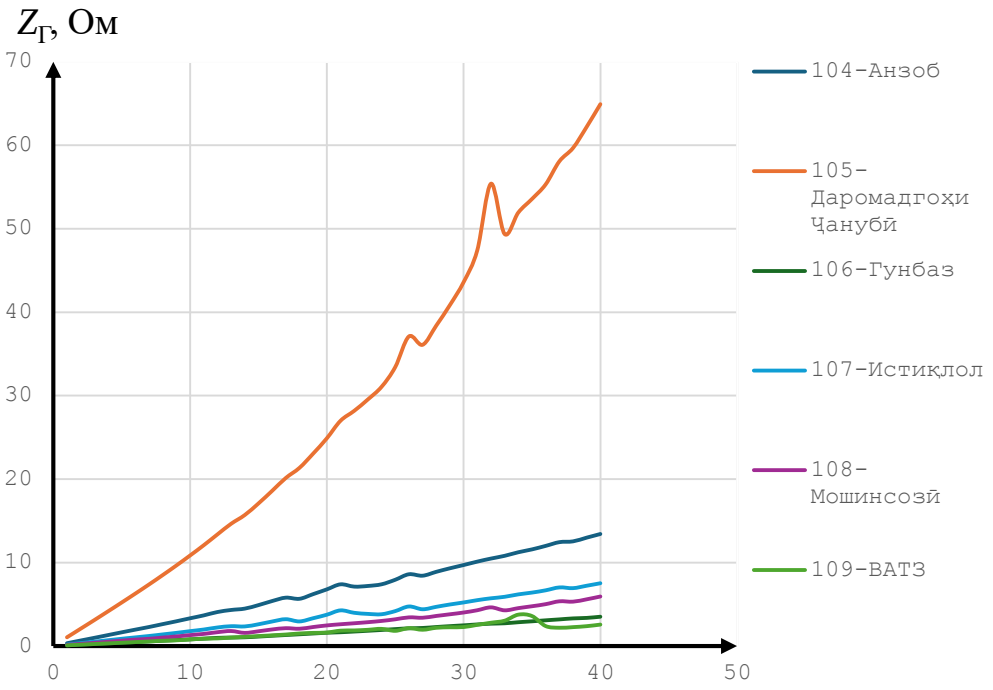


а)

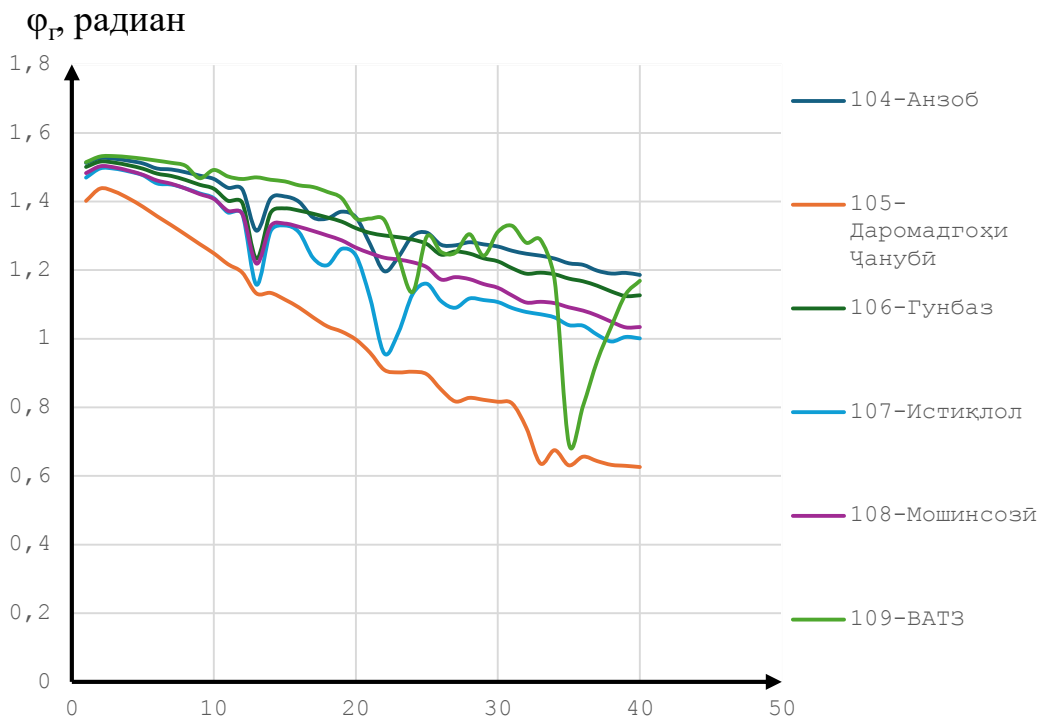


б)

Расми 3.1.10. – Тавсифи фазавию басомадии гиреҳҳои хоси 10 кВ-и нақшаи таҳқиқшаванда дар реҷаи муътадил



Расми 3.1.11. – ТАБ-и гиреҳҳои хоси 6 кВ-и нақшаи таҳқиқшаванда дар реҷаи муътадил



Расми 3.1.12. – Тавсифи фазавию басомадии гиреҳҳои хоси 6 кВ-и нақшаи таҳқиқшаванда дар реҷаи муътадил

ЗАМИМАИ 2. Натиҷаҳои ҳисоби ЗПБР дар барномаи таҳияшуда

Ҷадвали 3.2.1. – Қиматҳои ҷоизӣ ва ҳисобии ЗПБР дар реҷаҳои муътадил дар гиреҳҳои 500 кВ нақшаи таҳқиқшаванда

n	Kp(n)_1	Kp(n)2	Kp(n)_3	Kp(n)_4	Kp(n)_5	Kp(n)_6	Kp(n)ҷ_1	Kp(n)ҷ_2	Kp(n)ҷ_3	Kp(n)ҷ_4	Kp(n)ҷ_5	Kp(n)ҷ_6
5	8,00	13,24	9,08	6,28	55,76	13,46	18,82	11,57	13,19	34,23	2,02	3,03
7	3,50	6,81	1,84	6,27	20,33	7,93	12,55	7,72	8,80	22,82	1,35	2,02
11	34,47	50,34	62,69	25,13	5,45	42,28	12,55	7,72	8,80	22,82	1,35	2,02
13	9,55	8,89	2,95	13,99	3,09	13,08	11,71	7,20	8,21	21,30	1,26	1,88
17	34,19	1,62	36,93	32,53	2,17	4,90	8,36	5,14	5,86	15,21	0,90	1,35
19	18,21	4,04	44,19	8,63	1,83	3,87	8,73	5,37	6,12	15,88	0,94	1,40
23	63,40	13,37	15,16	23,31	1,44	3,13	8,73	5,37	6,12	15,88	0,94	1,40
25	32,20	6,88	9,27	45,56	1,30	2,71	22,30	13,72	15,64	40,57	2,40	3,59
29	17,52	4,30	18,50	208,10	1,10	2,18	22,30	13,72	15,64	40,57	2,40	3,59
31	14,66	3,59	11,78	76,42	1,02	1,99	28,68	17,64	20,10	52,16	3,08	4,61
35	11,14	2,95	8,17	55,93	0,90	1,72	28,68	17,64	20,10	52,16	3,08	4,61
37	10,39	2,70	7,09	40,21	0,84	1,61	45,62	28,06	31,98	82,99	4,90	7,34

Ҷадвали 3.2.2.1. – Қиматҳои ҷоизӣ ва ҳисобии ЗПБР дар реҷаҳои муътадил дар гиреҳҳои 220 кВ СЭ ҶТ

n	Kp(n)_7	Kp(n)_8	Kp(n)_9	Kp(n)_10	Kp(n)_11	Kp(n)_12	Kp(n)ҷ_7	Kp(n)ҷ_8	Kp(n)ҷ_9	Kp(n)ҷ_10	Kp(n)ҷ_11	Kp(n)ҷ_12
5	10,92	8,87	8,84	10,06	9,86	10,61	12,74	12,85	13,47	30,67	30,46	35,95
7	2,45	1,11	1,09	1,79	1,55	2,55	8,49	8,57	8,98	20,45	20,31	23,97
11	35,32	25,59	24,10	14,84	14,39	15,26	8,49	8,57	8,98	20,45	20,31	23,97
13	19,39	6,82	5,49	1,63	1,77	1,53	7,93	8,00	8,38	19,08	18,95	22,37
17	2,20	11,32	12,42	12,17	12,43	12,00	5,66	5,71	5,99	13,63	13,54	15,98
19	5,06	24,42	25,89	22,74	22,43	22,65	5,91	5,96	6,25	14,22	14,13	16,67
23	19,05	130,16	153,38	16,28	13,53	14,15	5,91	5,96	6,25	14,22	14,13	16,67
25	8,84	36,28	40,44	2,35	3,98	2,38	15,10	15,23	15,96	36,35	36,10	42,61
29	4,95	15,70	17,03	14,07	15,33	13,60	15,10	15,23	15,96	36,35	36,10	42,61
31	4,08	11,74	12,74	22,74	23,98	22,39	19,41	19,58	20,53	46,73	46,42	54,78
35	2,99	11,01	11,76	50,56	51,27	51,59	19,41	19,58	20,53	46,73	46,42	54,78
37	2,51	9,64	10,27	57,63	57,59	55,72	30,88	31,16	32,65	74,35	73,84	87,16

Ҷадвали 3.2.2.2. – Қиматҳои ҷоизӣ ва ҳисобии ЗПБР дар реҷаҳои муътадил дар гиреҳҳои 220 кВ СЭ ҶТ

n	Kp(n)_13	Kp(n)_14	Kp(n)_15	Kp(n)_16	Kp(n)_17	Kp(n)_18	Kp(n)ҷ_13	Kp(n)ҷ_14	Kp(n)ҷ_15	Kp(n)ҷ_16	Kp(n)ҷ_17	Kp(n)ҷ_18
5	10.61	6.36	6.10	5.83	5.09	5.55	35.95	30.90	49.64	49.15	21.14	22.30
7	2.55	5.37	6.27	6.43	7.71	5.70	23.97	20.60	33.09	32.77	14.09	14.87
11	15.26	16.43	18.35	16.08	17.19	13.96	23.97	20.60	33.09	32.77	14.09	14.87
13	1.53	19.32	32.24	26.32	27.87	27.19	22.37	19.23	30.89	30.58	13.15	13.88
17	12.00	31.45	29.23	26.54	84.44	25.45	15.98	13.73	22.06	21.85	9.39	9.91
19	22.65	57.66	43.86	38.68	72.56	12.69	16.67	14.33	23.02	22.79	9.80	10.34
23	14.15	55.76	80.48	64.56	25.80	16.27	16.67	14.33	23.02	22.79	9.80	10.34
25	2.38	23.08	21.13	13.16	18.19	14.81	42.61	36.62	58.83	58.25	25.05	26.43
29	13.60	13.19	2.25	7.22	10.84	20.22	42.61	36.62	58.83	58.25	25.05	26.43
31	22.39	16.80	17.15	20.90	9.21	35.17	54.78	47.09	75.64	74.90	32.21	33.98
35	51.59	49.54	78.73	65.48	6.32	33.92	54.78	47.09	75.64	74.90	32.21	33.98
37	55.72	18.75	42.81	32.58	8.57	23.75	87.16	74.91	120.34	119.15	51.24	54.06

Ҷадвали 3.2.2.3. – Қиматҳои ҷоизӣ ва ҳисобии ЗПБР дар реҷаҳои муътадил дар гиреҳҳои 220 кВ СЭ ҶТ

n	Kp(n)_19	Kp(n)_20	Kp(n)_21	Kp(n)_22	Kp(n)_23	Kp(n)_24	Kp(n)ҷ_19	Kp(n)ҷ_20	Kp(n)ҷ_21	Kp(n)ҷ_22	Kp(n)ҷ_23	Kp(n)ҷ_24
5	4.91	5.44	6.02	5.64	5.04	5.28	10.75	98.14	25.41	19.78	45.61	75.90
7	7.28	7.85	5.68	7.18	7.30	7.63	7.17	65.43	16.94	13.19	30.41	50.60
11	14.94	17.58	18.58	22.00	14.59	16.35	7.17	65.43	16.94	13.19	30.41	50.60
13	23.24	22.32	43.48	56.82	21.74	21.16	6.69	61.07	15.81	12.31	28.38	47.23
17	57.39	44.59	16.17	17.10	10.82	42.30	4.78	43.62	11.29	8.79	20.27	33.73
19	48.46	12.43	10.19	22.47	21.46	13.26	4.99	45.52	11.78	9.17	21.15	35.20
23	12.47	10.48	4.99	10.80	40.10	10.33	4.99	45.52	11.78	9.17	21.15	35.20
25	5.69	16.51	11.53	6.55	67.82	15.99	12.74	116.32	30.11	23.45	54.06	89.96
29	10.16	50.01	32.51	11.25	9.48	41.75	12.74	116.32	30.11	23.45	54.06	89.96
31	8.82	50.09	46.18	6.71	53.80	43.85	16.38	149.55	38.71	30.15	69.50	115.66
35	21.02	118.27	90.10	19.26	25.18	109.45	16.38	149.55	38.71	30.15	69.50	115.66
37	9.27	109.79	42.55	14.40	34.96	94.04	26.06	237.92	61.59	47.96	110.57	184.00

Ҷадвали 3.2.2.4. – Қиматҳои ҷоизӣ ва ҳисобии ЗПБР дар реҷаҳои муътадил дар гиреҳҳои 220 кВ СЭ ҶТ

n	Kp(n)_25	Kp(n)_26	Kp(n)_27	Kp(n)_28	Kp(n)_29	Kp(n)_30	Kp(n)_31	Kp(n)ҷ_25	Kp(n)ҷ_26	Kp(n)ҷ_27	Kp(n)ҷ_28	Kp(n)ҷ_29	Kp(n)ҷ_30	Kp(n)ҷ_31
5	5.26	5.25	5.21	4.90	4.98	4.95	5.48	72.27	39.68	27.45	37.83	40.96	30.92	51.96
7	7.60	7.47	7.06	7.21	7.73	7.50	9.70	48.18	26.45	18.30	25.22	27.31	20.62	34.64
11	16.12	18.87	16.97	11.54	10.34	16.47	32.02	48.18	26.45	18.30	25.22	27.31	20.62	34.64
17	41.73	7.95	11.27	11.57	12.47	11.94	13.30	32.12	17.64	12.20	16.81	18.21	13.74	23.09
19	13.37	17.96	22.82	12.49	17.72	13.69	10.78	33.52	18.40	12.73	17.54	19.00	14.34	24.10
23	10.17	36.05	47.36	20.78	18.20	16.42	25.38	33.52	18.40	12.73	17.54	19.00	14.34	24.10
25	15.74	59.51	39.79	26.54	25.95	23.65	8.71	85.66	47.03	32.54	44.83	48.55	36.65	61.58
29	40.23	17.01	33.13	70.37	81.51	51.32	7.12	85.66	47.03	32.54	44.83	48.55	36.65	61.58
31	42.66	4.13	43.97	49.12	51.86	62.24	12.72	110.13	60.47	41.83	57.64	62.42	47.12	79.17
35	105.80	24.19	40.17	61.49	35.94	84.05	33.24	110.13	60.47	41.83	57.64	62.42	47.12	79.17
37	89.25	18.99	30.90	56.33	73.05	132.87	43.48	175.21	96.20	66.55	91.70	99.30	74.97	125.96

Ҷадвали 3.2.2.5. – Қиматҳои ҷоизӣ ва ҳисобии ЗПБР дар реҷаҳои муътадил дар гиреҳҳои 220 кВ СЭ ҶТ

n	Kp(n)_32	Kp(n)_33	Kp(n)_34	Kp(n)_35	Kp(n)_36	Kp(n)_37	Kp(n)ҷ_32	Kp(n)ҷ_33	Kp(n)ҷ_34	Kp(n)ҷ_35	Kp(n)ҷ_36	Kp(n)ҷ_37
5	5.34	5.56	5.22	5.04	5.18	5.04	19.37	85.20	63.32	55.01	74.35	54.53
7	9.22	10.01	8.72	7.58	7.91	7.64	12.91	56.80	42.21	36.67	49.57	36.36
11	42.42	8.96	6.90	13.74	15.20	13.14	12.91	56.80	42.21	36.67	49.57	36.36
13	11.22	7.60	9.51	13.67	13.07	13.01	12.05	53.01	39.40	34.23	46.26	33.93
17	9.23	15.14	13.49	15.22	15.64	16.04	8.61	37.87	28.14	24.45	33.04	24.24
19	12.05	21.47	17.58	24.70	24.63	24.88	8.98	39.51	29.36	25.51	34.48	25.29
23	23.46	9.39	18.08	35.58	32.12	35.12	8.98	39.51	29.36	25.51	34.48	25.29
25	67.67	21.25	20.52	51.20	45.56	47.38	22.96	100.98	75.04	65.19	88.12	64.63
29	86.58	98.44	44.72	36.04	36.53	42.59	22.96	100.98	75.04	65.19	88.12	64.63
31	33.73	64.91	27.40	118.64	112.92	124.06	29.52	129.83	96.48	83.82	113.29	83.10
35	13.68	47.10	17.22	45.96	56.16	54.32	29.52	129.83	96.48	83.82	113.29	83.10
37	9.91	64.11	16.02	39.08	46.76	44.41	46.96	206.55	153.50	133.35	180.24	132.20

Ҷадвали 3.2.2.6. – Қиматҳои ҷоизӣ ва ҳисобии ЗПБР дар реҷаҳои муътадил дар гиреҳҳои 220 кВ СЭ ҶТ

n	Kp(n)_38	Kp(n)_39	Kp(n)_40	Kp(n)_41	Kp(n)_42	Kp(n)_43	Kp(n)доп_38	Kp(n)доп_39	Kp(n)доп_40	Kp(n)доп_41	Kp(n)доп_42	Kp(n)доп_43
5	5.02	5.45	5.71	6.19	5.95	5.30	52.33	69.71	21.72	23.15	14.34	30.66
7	7.56	9.69	11.62	14.01	12.69	9.30	34.88	46.48	14.48	15.43	9.56	20.44
11	13.15	4.58	3.99	8.21	6.53	5.50	34.88	46.48	14.48	15.43	9.56	20.44
13	13.06	9.22	1.83	3.65	2.57	10.14	32.56	43.38	13.51	14.40	8.92	19.08
17	15.75	11.84	7.35	6.35	11.98	10.42	23.26	30.98	9.65	10.29	6.37	13.63
19	24.53	18.01	18.15	27.86	20.48	22.07	24.27	32.33	10.07	10.74	6.65	14.22
23	34.64	31.05	24.06	45.24	11.82	37.04	24.27	32.33	10.07	10.74	6.65	14.22
25	47.36	27.77	6.58	17.28	4.40	37.95	62.02	82.62	25.74	27.44	16.99	36.34
29	40.19	34.44	17.66	8.31	40.84	16.43	62.02	82.62	25.74	27.44	16.99	36.34
31	119.23	68.02	33.07	4.87	13.76	64.15	79.74	106.23	33.09	35.28	21.85	46.72
35	50.56	30.63	32.48	5.93	11.03	36.60	79.74	106.23	33.09	35.28	21.85	46.72
37	41.09	13.57	54.33	4.06	9.11	25.17	126.85	169.00	52.64	56.12	34.76	74.33

Ҷадвали 3.2.3.1. – Қиматҳои ҷоизӣ ва ҳисобии ЗПБР дар реҷаҳои муътадил дар гиреҳҳои 110 кВ СЭ ҶТ

n	Kp(n)_44	Kp(n)_45	Kp(n)_46	Kp(n)_47	Kp(n)_48	Kp(n)_49	Kp(n)ҷ_44	Kp(n)ҷ_45	Kp(n)ҷ_46	Kp(n)ҷ_47	Kp(n)ҷ_48	Kp(n)ҷ_49
5	5.03	5.03	4.91	5.42	4.93	4.93	106.72	98.78	70.39	114.59	21.36	21.36
7	6.74	6.81	6.71	7.66	7.21	7.21	71.15	65.85	46.92	76.39	14.24	14.24
11	15.02	15.20	13.66	22.08	16.13	16.13	142.30	131.70	93.85	152.79	28.48	28.48
13	41.60	42.52	32.17	83.79	38.42	38.42	99.61	92.19	65.69	106.95	19.94	19.94
17	7.61	7.49	9.57	9.38	26.45	26.45	79.69	73.75	52.56	85.56	15.95	15.95
19	12.90	12.36	13.42	3.28	37.36	37.36	79.69	73.75	52.56	85.56	15.95	15.95
23	13.03	13.01	15.01	1.57	29.84	29.84	199.22	184.38	131.39	213.90	39.87	39.87
25	20.66	19.63	20.14	5.48	17.34	17.34	199.22	184.38	131.39	213.90	39.87	39.87
29	22.60	22.92	24.16	13.16	8.03	8.03	199.22	184.38	131.39	213.90	39.87	39.87
31	29.15	27.65	27.52	12.10	4.33	4.33	199.22	184.38	131.39	213.90	39.87	39.87
35	29.68	30.31	31.51	18.34	3.53	3.53	398.43	368.76	262.78	427.81	79.75	79.75
37	38.62	37.75	37.32	15.33	4.53	4.53	398.43	368.76	262.78	427.81	79.75	79.75

Ҷадвали 3.2.3.2. – Қиматҳои ҷоизӣ ва ҳисобии ЗПБР дар реҷаҳои муътадил дар гирехҳои 110 кВ СЭ ҶТ

n	Kp(n)_50	Kp(n)_51	Kp(n)_52	Kp(n)_53	Kp(n)_54	Kp(n)_55	Kp(n)ҷ_50	Kp(n)ҷ_51	Kp(n)ҷ_52	Kp(n)ҷ_53	Kp(n)ҷ_54	Kp(n)ҷ_55
5	5.00	5.01	4.98	5.03	5.06	4.88	17.13	15.65	19.39	37.20	46.20	48.53
7	7.48	7.52	7.38	7.28	7.12	6.64	11.42	10.43	12.93	24.80	30.80	32.35
11	18.22	18.54	17.79	17.59	15.82	13.08	22.84	20.86	25.85	49.60	61.60	64.71
13	49.74	51.42	49.84	53.59	41.48	26.94	15.99	14.61	18.10	34.72	43.12	45.29
17	53.67	57.40	44.42	23.43	12.18	11.54	12.79	11.68	14.48	27.78	34.50	36.23
19	19.62	21.42	14.81	5.42	13.90	16.13	12.79	11.68	14.48	27.78	34.50	36.23
23	14.83	24.11	10.81	9.24	26.17	20.10	31.97	29.21	36.19	69.44	86.24	90.59
25	4.50	11.22	1.27	17.17	41.00	31.00	31.97	29.21	36.19	69.44	86.24	90.59
29	18.60	4.00	13.75	39.23	67.90	37.67	31.97	29.21	36.19	69.44	86.24	90.59
31	50.93	1.08	32.21	84.76	154.73	67.49	31.97	29.21	36.19	69.44	86.24	90.59
35	70.21	18.53	68.12	61.42	22.23	23.94	63.95	58.42	72.39	138.89	172.48	181.17
37	59.59	23.43	58.58	23.09	26.11	45.76	63.95	58.42	72.39	138.89	172.48	181.17

Ҷадвали 3.2.3.3. – Қиматҳои ҷоизӣ ва ҳисобии ЗПБР дар реҷаҳои муътадил дар гирехҳои 110 кВ СЭ ҶТ

n	Kp(n)_56	Kp(n)_57	Kp(n)_58	Kp(n)_59	Kp(n)_60	Kp(n)_61	Kp(n)ҷ_56	Kp(n)ҷ_57	Kp(n)ҷ_58	Kp(n)ҷ_59	Kp(n)ҷ_60	Kp(n)ҷ_61
5	4.79	5.08	5.12	5.89	5.81	5.26	24.28	48.30	50.80	19.76	18.40	115.30
7	6.67	7.15	7.15	5.70	5.75	6.75	16.19	32.20	33.87	13.17	12.27	76.87
11	12.45	15.94	15.55	11.66	11.57	15.60	32.38	64.40	67.74	26.34	24.53	153.74
17	13.58	11.98	11.72	18.35	18.26	16.71	18.13	36.07	37.93	14.75	13.74	86.09
19	17.00	14.41	15.90	22.94	22.72	16.44	18.13	36.07	37.93	14.75	13.74	86.09
23	25.35	27.12	28.28	22.78	22.89	18.36	45.33	90.16	94.83	36.88	34.35	215.23
25	36.00	42.62	41.06	27.85	27.89	18.56	45.33	90.16	94.83	36.88	34.35	215.23
29	53.48	69.87	59.20	39.78	39.64	5.87	45.33	90.16	94.83	36.88	34.35	215.23
31	103.70	159.52	124.77	48.65	48.36	21.34	45.33	90.16	94.83	36.88	34.35	215.23
35	17.84	20.67	6.55	68.09	67.40	4.88	90.66	180.33	189.66	73.76	68.70	430.46
37	48.46	29.22	26.61	82.82	81.92	13.01	90.66	180.33	189.66	73.76	68.70	430.46

Ҷадвали 3.2.3.4. – Қиматҳои ҷоизӣ ва ҳисобии ЗПБР дар реҷаҳои муътадил дар гиреҳҳои 110 кВ СЭ ҶТ

n	Kp(n)_62	Kp(n)_63	Kp(n)_64	Kp(n)_65	Kp(n)_66	Kp(n)_67	Kp(n)ҷ_62	Kp(n)ҷ_63	Kp(n)ҷ_64	Kp(n)ҷ_65	Kp(n)ҷ_66	Kp(n)ҷ_67
5	5.20	5.20	4.77	4.75	4.78	6.17	36.58	36.58	19.87	16.61	21.04	71.64
7	5.99	5.99	6.57	6.57	6.58	3.71	24.39	24.39	13.25	11.07	14.03	47.76
11	13.93	13.93	11.99	11.87	12.07	14.72	48.78	48.78	26.50	22.15	28.06	95.53
13	28.51	28.51	16.42	15.65	16.78	39.14	34.14	34.14	18.55	15.50	19.64	66.87
17	32.54	32.54	20.78	20.91	20.89	38.55	27.32	27.32	14.84	12.40	15.71	53.49
19	10.89	10.89	22.82	23.39	22.83	7.88	27.32	27.32	14.84	12.40	15.71	53.49
23	33.67	33.67	24.39	25.22	24.50	8.66	68.29	68.29	37.09	31.00	39.28	133.74
25	4.13	4.13	35.92	38.27	35.75	11.02	68.29	68.29	37.09	31.00	39.28	133.74
29	14.68	14.68	34.31	39.15	33.56	9.29	68.29	68.29	37.09	31.00	39.28	133.74
31	33.03	33.03	90.95	101.01	90.49	24.56	68.29	68.29	37.09	31.00	39.28	133.74
35	18.64	18.64	87.75	99.12	88.26	4.15	136.58	136.58	74.19	62.01	78.56	267.47
37	13.88	13.88	46.06	53.47	46.41	18.67	136.58	136.58	74.19	62.01	78.56	267.47

Ҷадвали 3.2.3.5. – Қиматҳои ҷоизӣ ва ҳисобии ЗПБР дар реҷаҳои муътадил дар гиреҳҳои 110 кВ СЭ ҶТ

n	Kp(n)_68	Kp(n)_69	Kp(n)_70	Kp(n)_71	Kp(n)_72	Kp(n)_73	Kp(n)ҷ_68	Kp(n)ҷ_69	Kp(n)ҷ_70	Kp(n)ҷ_71	Kp(n)ҷ_72	Kp(n)ҷ_73
5	5.37	5.29	5.09	5.20	5.20	5.08	14.56	6.63	9.65	13.43	15.96	12.57
7	9.79	9.23	8.52	9.04	9.05	8.53	9.71	4.42	6.43	8.96	10.64	8.38
11	10.20	14.34	9.65	8.90	7.94	8.32	19.41	8.83	12.87	17.91	21.27	16.76
13	11.25	20.57	11.19	9.63	8.12	9.03	13.59	6.18	9.01	12.54	14.89	11.73
17	28.02	59.01	18.43	15.58	11.82	12.99	10.87	4.95	7.21	10.03	11.91	9.39
19	4.53	8.68	38.26	34.78	21.01	21.26	10.87	4.95	7.21	10.03	11.91	9.39
23	4.67	30.75	213.85	193.71	28.07	26.71	27.18	12.37	18.02	25.08	29.78	23.46
25	8.85	14.60	44.35	41.89	26.86	28.51	27.18	12.37	18.02	25.08	29.78	23.46
29	23.00	4.66	18.26	16.03	82.74	81.78	27.18	12.37	18.02	25.08	29.78	23.46
31	65.55	19.17	52.04	27.85	375.82	359.31	27.18	12.37	18.02	25.08	29.78	23.46
35	149.55	18.70	14.50	10.15	101.97	107.26	54.36	24.73	36.03	50.16	59.57	46.93
37	80.14	23.31	9.35	6.56	108.56	103.67	54.36	24.73	36.03	50.16	59.57	46.93

Ҷадвали 3.2.3.6. – Қиматҳои ҷоизӣ ва ҳисобии ЗПБР дар реҷаҳои муътадил дар гиреҳҳои 35 кВ СЭ ҶТ

n	Kp(n)_74	Kp(n)_75	Kp(n)_76	Kp(n)_77	Kp(n)_78	Kp(n)_79	Kp(n)ҷ_74	Kp(n)ҷ_75	Kp(n)ҷ_76	Kp(n)ҷ_77	Kp(n)ҷ_78	Kp(n)ҷ_79
5	5.16	5.16	5.05	5.00	4.69	4.81	6.36	6.36	12.72	49.66	16.47	28.92
7	6.77	6.77	6.85	7.07	6.52	6.73	4.24	4.24	8.48	33.11	10.98	19.28
11	11.12	11.12	11.75	11.28	10.17	10.57	8.48	8.48	16.96	66.21	21.96	38.56
13	12.79	12.79	14.81	13.46	12.01	12.52	5.94	5.94	11.88	46.35	15.37	26.99
17	17.32	17.32	20.43	18.34	15.81	16.67	4.75	4.75	9.50	37.08	12.30	21.59
19	19.82	19.82	18.47	21.15	17.82	18.93	4.75	4.75	9.50	37.08	12.30	21.59
23	23.17	23.17	22.14	27.54	21.89	23.69	11.87	11.87	23.75	92.70	30.74	53.98
25	25.80	25.80	22.47	28.42	23.25	24.80	11.87	11.87	23.75	92.70	30.74	53.98
29	31.42	31.42	29.83	34.01	26.85	28.85	11.87	11.87	23.75	92.70	30.74	53.98
31	34.80	34.80	35.74	35.40	28.64	30.48	11.87	11.87	23.75	92.70	30.74	53.98
35	41.56	41.56	35.08	45.49	33.17	36.56	23.75	23.75	47.50	185.40	61.48	107.96
37	45.82	45.82	39.12	44.09	34.14	36.62	23.75	23.75	47.50	185.40	61.48	107.96

Ҷадвали 3.2.4.1. – Қиматҳои ҷоизӣ ва ҳисобии ЗПБР дар реҷаҳои муътадил дар гиреҳҳои 10 кВ СЭ ҶТ

n	Kp(n)_80	Kp(n)_81	Kp(n)_82	Kp(n)_83	Kp(n)_84	Kp(n)_85	Kp(n)ҷ_80	Kp(n)ҷ_81	Kp(n)ҷ_82	Kp(n)ҷ_83	Kp(n)ҷ_84	Kp(n)ҷ_85
5	6.83	7.12	4.98	5.00	4.99	5.00	17.18	19.89	22.21	11.08	30.03	30.59
7	2.53	3.76	7.00	7.05	7.03	7.03	11.45	13.26	14.81	7.39	20.02	20.39
11	7.23	6.69	11.25	11.30	11.04	11.03	22.91	26.51	29.61	14.78	40.04	40.78
13	9.34	8.86	13.33	13.55	13.14	13.11	16.03	18.56	20.73	10.34	28.03	28.55
17	13.29	12.93	17.60	18.31	17.53	17.46	12.83	14.85	16.58	8.27	22.42	22.84
19	15.49	15.14	20.03	20.98	20.05	19.92	12.83	14.85	16.58	8.27	22.42	22.84
23	15.18	14.31	25.76	27.21	25.65	25.15	32.07	37.12	41.46	20.69	56.06	57.10
25	18.08	17.35	28.65	29.86	26.77	26.03	32.07	37.12	41.46	20.69	56.06	57.10
29	20.00	19.12	40.41	38.50	31.05	29.53	32.07	37.12	41.46	20.69	56.06	57.10
31	22.06	21.29	36.58	37.59	29.27	29.83	32.07	37.12	41.46	20.69	56.06	57.10
35	25.70	25.10	40.87	43.20	33.66	35.51	64.13	74.24	82.92	41.37	112.12	114.20
37	27.76	27.32	25.98	44.33	36.49	37.42	64.13	74.24	82.92	41.37	112.12	114.20

Ҷадвали 3.2.4.2. – Қиматҳои ҷоизӣ ва ҳисобии ЗПБР дар реҷаҳои муътадил дар гиреҳҳои 10 кВ СЭ ҶТ

n	Kp(n)_86	Kp(n)_87	Kp(n)_88	Kp(n)_89	Kp(n)_90	Kp(n)_91	Kp(n)ҷ_86	Kp(n)ҷ_87	Kp(n)ҷ_88	Kp(n)ҷ_89	Kp(n)ҷ_90	Kp(n)ҷ_91
5	5.05	5.17	5.07	5.13	5.42	5.04	18.61	48.89	20.43	35.23	179.47	3.30
7	7.34	8.01	7.43	7.74	9.36	7.23	12.41	32.59	13.62	23.48	119.65	2.20
11	10.39	9.38	10.64	9.84	6.08	11.54	24.82	65.19	27.24	46.97	239.29	4.41
13	12.19	10.66	12.53	11.28	7.72	13.90	17.37	45.63	19.07	32.88	167.50	3.08
17	16.34	14.77	17.14	15.09	13.61	17.72	13.90	36.50	15.25	26.30	134.00	2.47
19	18.61	17.96	19.96	17.96	22.62	21.21	13.90	36.50	15.25	26.30	134.00	2.47
23	22.60	21.30	24.85	20.73	20.35	27.64	34.75	91.26	38.13	65.76	335.01	6.17
25	25.05	24.26	27.76	22.69	10.43	31.14	34.75	91.26	38.13	65.76	335.01	6.17
29	28.24	26.86	33.07	27.82	16.94	38.99	34.75	91.26	38.13	65.76	335.01	6.17
31	30.46	27.08	35.27	33.39	19.83	44.88	34.75	91.26	38.13	65.76	335.01	6.17
35	35.64	33.67	42.43	32.96	21.17	56.45	69.49	182.52	76.26	131.51	670.02	12.33
37	38.35	37.21	46.28	35.42	23.23	54.04	69.49	182.52	76.26	131.51	670.02	12.33

Ҷадвали 3.2.4.3. – Қиматҳои ҷоизӣ ва ҳисобии ЗПБР дар реҷаҳои муътадил дар гиреҳҳои 10 кВ СЭ ҶТ

n	Kp(n)_92	Kp(n)_93	Kp(n)_94	Kp(n)_95	Kp(n)_96	Kp(n)_97	Kp(n)ҷ_92	Kp(n)ҷ_93	Kp(n)ҷ_94	Kp(n)ҷ_95	Kp(n)ҷ_96	Kp(n)ҷ_97
5	5.03	5.13	5.04	5.05	5.12	5.05	18.86	58.67	19.27	17.73	30.64	9.67
7	7.17	7.66	7.22	7.31	7.83	7.32	12.57	39.12	12.85	11.82	20.43	6.45
11	13.68	22.06	14.54	16.46	26.13	16.36	25.15	78.23	25.70	23.64	40.85	12.89
13	11.34	7.38	10.82	10.37	9.61	12.10	17.60	54.76	17.99	16.55	28.60	9.03
17	15.99	12.61	15.61	17.08	27.51	22.11	14.08	43.81	14.39	13.24	22.88	7.22
19	18.23	13.32	17.21	9.78	57.40	18.16	14.08	43.81	14.39	13.24	22.88	7.22
23	22.67	19.36	22.04	18.70	5.08	18.28	35.21	109.52	35.97	33.10	57.20	18.05
25	25.37	22.96	24.66	21.16	8.95	22.18	35.21	109.52	35.97	33.10	57.20	18.05
29	29.82	28.20	29.22	25.80	12.48	27.59	35.21	109.52	35.97	33.10	57.20	18.05
31	31.40	28.52	30.83	28.04	13.42	29.99	35.21	109.52	35.97	33.10	57.20	18.05
35	36.74	36.33	36.43	33.13	17.40	36.22	70.42	219.05	71.95	66.19	114.39	36.10
37	39.68	41.76	39.75	36.15	19.32	39.51	70.42	219.05	71.95	66.19	114.39	36.10

Ҷадвали 3.2.4.4. – Қиматҳои ҷоизӣ ва ҳисобии ЗПБР дар реҷаҳои муътадил дар гиреҳҳои 10 кВ СЭ ҶТ

n	Кр(n) _98	Кр(n) _99	Кр(n) _100	Кр(n) _101	Кр(n) _102	Кр(n) _103	Кр(n)ҷ _98	Кр(n)ҷ _99	Кр(n)ҷ _100	Кр(n)ҷ _101	Кр(n)ҷ _102	Кр(n)ҷ _103
5	5.01	4.97	5.19	5.04	5.03	5.08	5.04	18.24	19.73	15.17	5.02	28.74
7	7.09	6.98	8.26	7.44	7.25	7.65	3.36	12.16	13.16	10.11	3.35	19.16
11	11.52	11.13	12.84	10.70	11.42	10.06	6.72	24.32	26.31	20.23	6.69	38.32
13	13.91	13.28	17.26	12.65	13.70	11.65	4.71	17.02	18.42	14.16	4.68	26.82
17	19.12	17.82	25.31	17.63	19.01	15.67	3.76	13.62	14.73	11.33	3.75	21.46
19	21.98	20.24	6.85	24.42	22.90	19.91	3.76	13.62	14.73	11.33	3.75	21.46
23	28.27	25.42	12.72	59.85	34.41	23.12	9.41	34.04	36.84	28.32	9.37	53.65
25	31.61	27.83	4.76	11.40	28.47	26.18	9.41	34.04	36.84	28.32	9.37	53.65
29	39.07	33.44	11.99	21.22	36.97	46.33	9.41	34.04	36.84	28.32	9.37	53.65
31	43.04	36.23	23.80	35.52	42.79	135.30	9.41	34.04	36.84	28.32	9.37	53.65
35	51.97	43.05	27.07	24.30	49.09	56.87	18.82	68.09	73.67	56.63	18.73	107.30
37	56.50	45.81	8.65	27.33	53.81	16.02	18.82	68.09	73.67	56.63	18.73	107.30

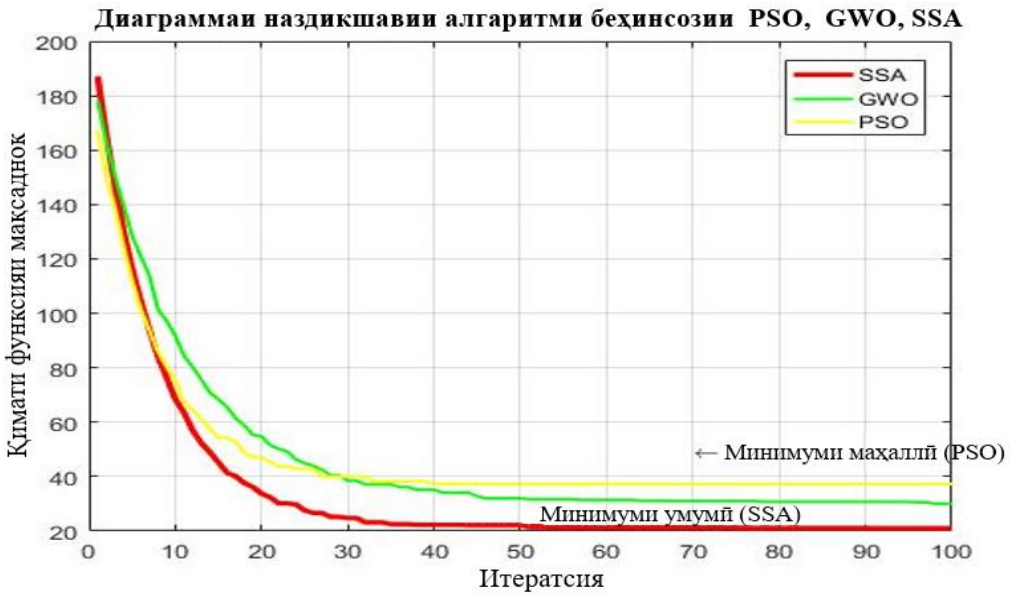
Ҷадвали 3.2.5. – Қиматҳои ҷоизӣ ва ҳисобии ЗПБР дар реҷаҳои муътадил дар гиреҳҳои 6 кВ СЭ ҶТ

n	Кр(n) _104	Кр(n) _105	Кр(n) _106	Кр(n) _107	Кр(n) _108	Кр(n) _109	Кр(n)ҷ _104	Кр(n)ҷ _105	Кр(n)ҷ _106	Кр(n)ҷ _107	Кр(n)ҷ _108	Кр(n)ҷ _109
5	5.02	5.01	5.01	5.02	5.05	3.76	27.36	8.58	114.96	51.86	70.61	3.57
7	6.98	7.09	7.01	6.96	6.78	5.31	18.24	5.72	76.64	34.57	47.08	2.38
11	11.25	11.62	11.26	11.47	11.46	8.54	36.48	11.43	153.28	69.15	94.15	4.76
13	13.25	14.10	13.01	13.80	14.18	9.81	25.53	8.00	107.29	48.40	65.91	3.33
17	17.78	19.38	16.90	18.67	16.89	13.41	20.43	6.40	85.83	38.72	52.73	2.66
19	19.08	22.19	19.25	19.36	17.98	15.33	20.43	6.40	85.83	38.72	52.73	2.66
23	22.09	28.44	23.47	22.38	22.59	18.95	51.07	16.01	214.59	96.81	131.81	6.66
25	24.36	32.17	26.08	24.31	25.30	17.73	51.07	16.01	214.59	96.81	131.81	6.66
29	28.59	39.33	30.66	28.94	30.10	21.89	51.07	16.01	214.59	96.81	131.81	6.66
31	31.05	45.66	33.31	31.96	33.94	24.74	51.07	16.01	214.59	96.81	131.81	6.66
35	35.55	51.57	38.12	37.24	37.73	35.04	102.14	32.01	429.17	193.62	263.63	13.32
37	38.21	55.91	41.10	40.84	42.41	21.34	102.14	32.01	429.17	193.62	263.63	13.32

ЗАМИМАИ 3. Барномаҳои таҳияшуда барои беҳинсозии интихоби ДҶ бо назардошти ҳодисаи резонанс

3.1. Барнома барои муқоисаи усулҳои метаэврестикии беҳинсозӣ барои муайян намудани реҷаҳои нисбатан хатарнок

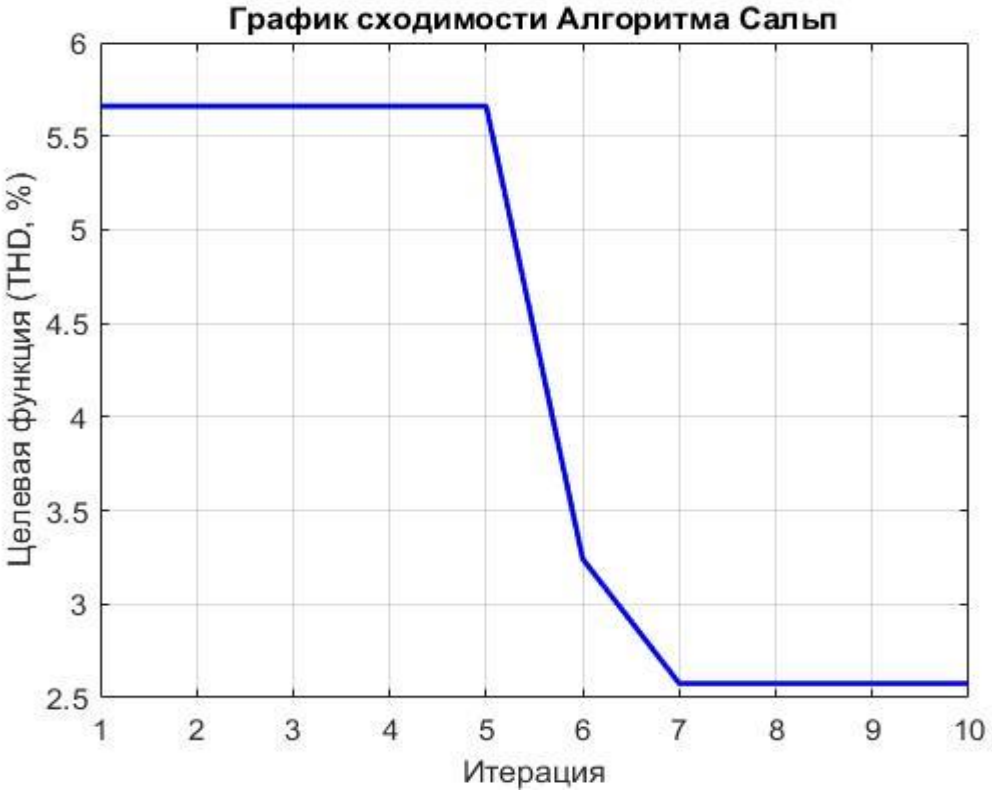
```
% Скрипт для построения кривых сходимости WSO, GWO, LSO, SSA, PSO
clear; clc;
iterations = 1:100; % Количество итераций
% Эмуляция процесса сходимости (экспоненциальный спад с разным шумом и скоростью)
% На основе реальных характеристик алгоритмов:
pso = 150 * exp(-0.15 * iterations) + 40 + randn(1,100)*1.5; % Быстро, но в локальный минимум
ssa = 170 * exp(-0.08 * iterations) + 35 + randn(1,100)*1.2; % Плавно
lso = 160 * exp(-0.10 * iterations) + 32 + randn(1,100)*1.0; % Средне
gwo = 180 * exp(-0.12 * iterations) + 28 + randn(1,100)*0.8; % Стабильно
wso = 190 * exp(-0.14 * iterations) + 22 + randn(1,100)*0.5; % Глубокий поиск (лучший результат)
% Сортировка для плавности линий (имитация лучших значений на каждой итерации)
pso = cummin(pso); ssa = cummin(ssa); lso = cummin(lso); gwo = cummin(gwo); wso = cummin(wso);
% Построение графика
figure('Color', 'w');
plot(iterations, wso, 'r', 'LineWidth', 2.5); hold on;
plot(iterations, gwo, 'b', 'LineWidth', 1.5);
plot(iterations, lso, 'g', 'LineWidth', 1.5);
plot(iterations, ssa, 'm', 'LineWidth', 1.5);
plot(iterations, pso, 'k--', 'LineWidth', 1.5);
grid on;
xlabel('Итерации (Iterations)');
ylabel('Значение целевой функции (Fitness Value)');
title('Диаграмма сходимости алгоритмов оптимизации (33-узловая схема)');
legend('WSO', 'GWO', 'LSO', 'SSA', 'PSO');
% Аннотация для статьи
text(70, 50, '\leftarrow Локальный минимум (PSO)', 'FontSize', 10);
text(40, 25, 'Глобальный минимум (WSO)', 'Color', 'r', 'FontWeight', 'bold');
```



3.2. Барнома барои алгоритми тӯдаи салпҳо (SSA) барои кам намудани қимати THD.

```
clear; clc; close all;
disp('Запуск Алгоритма Сальп (SSA) для минимизации THD...');
% --- 1. Настройки алгоритма оптимизации ---
N = 50;          % Количество агентов (сальп) в популяции
Max_iter = 10;   % Максимальное количество итераций
dim = 2;         % Количество оптимизируемых параметров (L_f и C_f)
% --- 2. Границы поиска (Search Space) ---
% Допустим, мы ищем параметры для фильтра 5-й гармоники
% Параметр 1: Индуктивность L_f (от 1 мГн до 50 мГн)
L_min = 0.005;
L_max = 0.070;
% Параметр 2: Емкость C_f (от 10 мкФ до 500 мкФ)
C_min = 20e-6;
C_max = 200e-6;
lb = [L_min, C_min]; % Нижние границы [L, C]
ub = [L_max, C_max]; % Верхние границы [L, C]
% --- 3. Запуск оптимизации ---
tic; % Засекаем время работы
[Best_Params, Best_THD, Convergence_curve] = SSA_Harmonic_Optimization(N,
Max_iter, lb, ub, dim);
RunTime = toc;
% --- 4. Вывод результатов в консоль ---
fprintf('\nОптимизация завершена за %.2f секунд.\n', RunTime);
fprintf('-------------------------------------------------\n');
fprintf('Оптимальные параметры фильтра:\n');
fprintf('Индуктивность L_f =%.4f Гн (%.2f мГн)\n', Best_Params(1),
Best_Params(1)*1000);
fprintf('Емкость C_f = %.6f Ф  (%.2f мкФ)\n', Best_Params(2), Best_Params(2)*1e6);
fprintf('-------------------------------------------------\n');
```

```
fprintf('Минимальный коэффициент искажений (THD) = %.3f %%\n', Best_THD);
% --- 5. Построение графика сходимости ---
figure('Name', 'Сходимость алгоритма SSA', 'Color', 'w');
plot(1:Max_iter, Convergence_curve, 'LineWidth', 2, 'Color', 'b');
title('График сходимости Алгоритма Сальп', 'FontSize', 14);
xlabel('Итерация', 'FontSize', 12);
ylabel('Целевая функция (THD, %)', 'FontSize', 12);
grid on;
set(gca, 'FontSize', 11);
```




```
Запуск Алгоритма Сальп (SSA) для минимизации THD...

Оптимизация завершена за 0.01 секунд.
---------------------------------------------------
Оптимальные параметры фильтра:
Индуктивность L_f = 0.0056 Гн (5.61 мГн)
Емкость C_f       = 0.000178 Ф  (178.01 мкФ)
---------------------------------------------------
Минимальный коэффициент искажений (THD) = 2.576 %
```

ЗАМИМАИ 4. Шаҳодатнома

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025685699

Программа для анализа и определения узлов в электроэнергетической системе, где возможны резонансные явления

Правообладатель: ***федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (RU)***

Авторы: ***Хабибуллозода Зикрулло Хабибулло (TJ), Абдулкеримов Сагид Абдурахманович (RU), Джуразода Шохин Джура (TJ), Назиров Хуршед Бобоходжаевич (TJ), Ганиев Зокирджон Султонович (TJ), Бобоев Шараф Асрорович (TJ), Джаборов Манучехр Камолович (TJ)***



Заявка № **2025684711**

Дата поступления **04 сентября 2025 г.**

Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ ***25 сентября 2025 г.***

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

ЗАМИМАИ 5. Санадҳои татбиқ

Ҳуҷҷат дар бораи истифодаи натиҷаҳои кори диссертатсионии Ҳабибуллозода З.Ҳ. дар раванди таҳсилот дар Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ

ВАЗОРАТИ МАОРИФ ВА ИЛМИ ҶУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН
ДОНИШГОҲИ ТЕХНИКИИ ТОҶИКИСТОН
ба номи академик М.С. Осимӣ

734042, Душанбе, хиёбони академикҳо Раҷабовҳо, 10, Тел.: (+992 37) 221-35-11, Факс: (+992 37) 221-71-35
Веб: www.ttu.tj Почтаи электронӣ: info@ttu.tj

№ 125/09-26
аз «3» 09 соли 2026

"ТАСДИҚ МЕКУНАМ"
Ректори ДТТ ба номи акад. М.С. Осимӣ
д.и.и., проф. Давлатзода Қ.К.
«3» 09 2026 с.

САНАД

оид ба татбиқи натиҷаҳои кори илмии Ҳабибуллозода Зикрулло Ҳабибулло дар мавзӯи «Барнома барои таҳлил ва муайян кардани гирехҳо дар системаи электроэнергетикӣ, ки дар онҳо ҳодисаи резонанс ба вуҷуд меояд»

Комиссия дар ҳайати: раиси комиссия, н.и.т., Маҷидзода Т.С., аъзои комиссия: н.и.т. Юсуфзода М.Ю., мудири кафедраи «Нерӯгоҳҳои электрикӣ», н.и.т., Зокирзода А. Р. шаҳодат медиҳад, ки натиҷаҳои кори Ҳабибуллозода З.Ҳ. дар раванди таълими донишгоҳ амалӣ карда шуданд. Дар натиҷаи кори илмӣ Ҳабибуллозода З.Ҳ. ба дастовардҳои зерин ноил гардид:

1. Барнома барои таҳлил ва муайян кардани гирехҳо дар системаи электроэнергетикӣ, ки дар онҳо ҳодисаи резонанс ба вуҷуд меояд, таҳия карда шуд.
2. Усули таҳлил ва муайян кардани гирехҳо дар системаи электроэнергетикӣ, ки дар онҳо ҳодисаи резонанс ба вуҷуд меояд, пешниҳод гардид.

Бо ин васила тасдиқ менамоем, ки натиҷаҳои таҳқиқоти илмии Ҳабибуллозода З.Ҳ. дар мавзӯи «Таҳлил ва муайян кардани гирехҳо дар системаи электроэнергетикӣ, ки дар онҳо ҳодисаи резонанс ба вуҷуд меояд» ҳангоми тартиб додани барномаҳои таълимии ихтисосҳои кафедраи «Нерӯгоҳҳои электрикӣ» зимни омӯзиши фанни барномаи бакалавриат — «Масъалаҳои математикӣ дар электроэнергетика», ки дар шакли муқаррароти назариявӣ ва усули ҳисоб пешниҳод шудаанд, татбиқ гардиданд.

Истифодаи натиҷаҳои зикршуда имкон медиҳад, ки сифати омӯзиши фанни мазкур бо назардошти талаботи муосири илмӣ ва амалӣ баланд бардошта шавад.

Дар натиҷаи татбиқ самараи мусбати зерин ба даст омад:

- ✓ **Баланд бардоштани сифати таълим:** амиқ гардонидани омодагии назариявии донишҷӯёни зинаи бакалавриат тавассути истифодаи усулҳои муосири таҳлили ҳодисаи резонансӣ дар низомҳои мураккаби энергетикӣ.
- ✓ **Навсозии раванди таълим:** таҷдиди таъминоти методии фанни «Масъалаҳои математикӣ дар электроэнергетика» бо ҷорӣ намудани элементҳои автоматикунонии ҳисобҳо (таъминоти барномавӣ).
- ✓ **Рушди малакаҳои амалӣ:** ташаккули салоҳиятҳои донишҷӯён дар соҳаи ҷустуҷӯ ва бартараф кардани реҷаҳои хатарноки кори шабакаҳои барқӣ, ки ба талаботи муосири корхонаҳои истеҳсолӣ ҷавобгӯ мебошад.
- ✓ **Фаъолгардонии кори илмӣ-таҳқиқотии донишҷӯён (КИТД):** истифодаи усулҳои таҳияшуда ҳамчун замина барои иҷрои корҳои курсӣ ва рисолаҳои хатм.

Натиҷаҳои таҳқиқот дар раванди таълими кафедраи «Нерӯгоҳҳои электрикӣ»-и Донишгоҳи техникии Тоҷикистон бо номи академик М.С.Осимӣ ҳангоми омӯзиши фанни «Масъалаҳои математикӣ дар электроэнергетика» татбиқ карда шуданд.

РАИСИ КОМИССИЯ:

Муовини ректор оид ба таълим, муовини аввал — н.и.т., дотсент, Маҷидзода Т.С.

АЪЗОЁНИ КОМИССИЯ:

Декани факултети энергетикӣ — н.и. т. Юсуфзода М.Ю.

Мудири кафедраи «Нерӯгоҳҳои электрикӣ» — н.и.т. Зокирзода А. Р.

Имзоҳои Маҷидзода Т.С., Юсуфзода М.Ю. ва Зокирзода А. Р.-ро

ТАСДИҚ МЕНАМОЯМ:

Сардори раёсати кадрҳо ва корҳои махсуси ДТТ — Қодирзода Н.Ҳ.

Ҳуҷҷат дар бораи истифодаи натиҷаҳои кори диссертатсионии Ҳабибуллозода З.Ҳ. дар раванди таҳсилот дар Филиали Донишгоҳи миллии тадқиқотии «ДЭМ» дар шаҳри Душанбе

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»
ФИЛИАЛ в г. ДУШАНБЕ
(Республика Таджикистан)
ул. М. Турсунзода, 82
тел.: + 992 37 221 82 53

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ 1930 МЭИ
www.df.mpei.ru

Филиали Муассисаи федералии давлатии буҷавии таълимии маълумоти олии
ДОНИШГОҲИ МИЛЛИИ ТАДҚИҚОТӢ «ДЭМ»
ДАР ш. ДУШАНБЕ
(Ҷумҳурии Тоҷикистон)
кӯч. М. Турсунзода, 82
тел.: + 992 37 221 82 53

№ 03/13-204
«26» 12 2025 г.

УТВЕРЖДАЮ:
Директор . Филиала ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Душанбе
Абдулкеримов С.А.
«26» 12 2025 г.

А К Т

о внедрении результатов научной работы Хабибуллозода Зикрулло Хабибулло на тему «Программа для анализ и определения узлов в электроэнергетической системе, где возможны резонансные явления».

Комиссия в составе: председателя комиссии к.т.н., доцент Гадоев С.А., члены комиссии к.т.н., доцент Чиркина Т.В., зав. каф. «Электроэнергетика», к.т.н., доцент Назиров Х.Б. свидетельствует о том, что результаты работы Хабибуллозода З.Х. были реализованы учебном процессе филиала. В результате научной работе Хабибуллозода З.Х. получил следующие результаты:

1. Разработана программа для анализа и определения узлов в электроэнергетической системе, где возможны резонансные явления.
2. Предложена методика анализа и определения узлов в электроэнергетической системе, где возможны резонансные явления.

Настоящим подтверждаем, что результаты научного исследования Хабибуллозода З.Х. на тему «Анализ и определение узлов в электроэнергетической системе, где возможны резонансные явления» внедрены при составлении учебных программ специальностей кафедры «Электроэнергетика» при изучении дисциплин программы бакалавриата «Математические задачи в электроэнергетике» и «Электроснабжение», которые представлены в виде теоретических положений и методики расчета.

Использование указанных результатов позволяет повысить качество изучения вышеуказанных дисциплин с учетом современных научных и практических требований.

По результатам реализации получен следующий положительный эффект:

Повышение качества обучения: углубление теоретической подготовки студентов бакалавриата за счет использования актуальных методов анализа резонансных явлений в сложных энергосистемах.

Модернизация учебного процесса: обновление методического обеспечения дисциплин «Математические задачи в электроэнергетике» и «Электроснабжение» с внедрением элементов автоматизации расчетов (программного обеспечения).

Развитие практических навыков: формирование у обучающихся компетенций в области поиска и устранения критических режимов работы электросетей, что соответствует современным требованиям производственных предприятий.

Активизация научно-исследовательской работы студентов (НИРС): использование разработанной методики как базы для выполнения курсовых и выпускных квалификационных работ.

Результаты исследования внедрены в учебный процесс кафедры «Электроэнергетика» филиала НИУ «МЭИ» в г. Душанбе при изучении курсов «Математические задачи в электроэнергетике» и «Электроснабжение».

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ КОМИССИИ:
Первый заместитель директора филиала / _____ / **С.А. Гадоев**
ЧЛЕНЫ КОМИССИИ:
Заместитель директора
по учебно-воспитательной работе / _____ / **Т.В. Чиркина**

Заведующий кафедрой «Электроэнергетика» / _____ / **Х.Б. Назиров**

Подписи Гадоева С.А., Чиркиной Т.В. и Назирова Х.Б.
ЗАВЕРЯЮ:
Ведущий специалист по кадрам / _____ / **Б.К. Цариева**

ШУЪБАИ КАДРҲО
ОТДЕЛ КАДРОВ

Ҳуҷҷат дар бораи истифодаи натиҷаҳои кори диссертатсионии Ҳабибуллозода З.Ҳ. дар раванди таҳсилот дар Донишкадаи энергетикии Тоҷикистон

ВАЗОРАТИ ЭНЕРГЕТИКА ВА ЗАХИРАҲОИ ОБИ ҶУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН
ДОНИШКАДАИ ЭНЕРГЕТИКИИ ТОҶИКИСТОН

ш. Кӯшониён, ҷ/ш Бохтариён, тел/факс 935646407, E-mail: det-tj@mail.ru

№ 341/12-25
аз «27» 12 соли 2025

ТАСДИҚ МЕНАМОЯМ :
Ректори Донишкадаи энергетикии Тоҷикистон
Исозода Д.Т.
12 2025 с.

С А Н А Д

оид ба татбиқи натиҷаҳои кори илмии Ҳабибуллозода Зикрулло Ҳабибулло дар мавзӯи «Барнома барои таҳлил ва муайян кардани гирехҳо дар системаи электроэнергетикӣ, ки дар онҳо ҳодисаи резонанс ба вуҷуд меояд»

Комиссия дар ҳайати: раиси комиссия, н.и.п., Зувайдуллозода Ф.З., аъзои комиссия: н.и.т. Амирханов А.С., мудири кафедраи «Нерӯгоҳҳои барқӣ», н.и.т., Давлатов А.М. шаҳодат медиҳад, ки натиҷаҳои кори Ҳабибуллозода З.Ҳ. дар раванди таълими донишкада амалӣ карда шуданд. Дар натиҷаи кори илмӣ Ҳабибуллозода З.Ҳ. ба дастовардҳои зерин ноил гардид:

1. Барнома барои таҳлил ва муайян кардани гирехҳо дар системаи электроэнергетикӣ, ки дар онҳо ҳодисаи резонанс ба вуҷуд меояд, таҳия карда шуд.
2. Усули таҳлил ва муайян кардани гирехҳо дар системаи электроэнергетикӣ, ки дар онҳо ҳодисаи резонанс ба вуҷуд меояд, пешниҳод гардид.

Бо ин васила тасдиқ менамоем, ки натиҷаҳои таҳқиқоти илмии Ҳабибуллозода З.Ҳ. дар мавзӯи «Таҳлил ва муайян кардани гирехҳо дар системаи электроэнергетикӣ, ки дар онҳо ҳодисаи резонанс ба вуҷуд меояд» ҳангоми тартиб додани барномаҳои таълимии ихтисосҳои кафедраи «Нерӯгоҳҳои барқӣ» зимни омӯзиши фанни барномаи бакалавриат — «Масъалаҳои математикӣ дар электроэнергетика», ки дар шакли мукаррароти назариявӣ ва усули ҳисоб пешниҳод шудаанд, татбиқ гардиданд.

Истифодаи натиҷаҳои зикршуда имкон медиҳад, ки сифати омӯзиши фанни мазкур бо назардошти талаботи муосири илмӣ ва амалӣ баланд бардошта шавад.

Дар натиҷаи татбиқ самараи мусбати зерин ба даст омад:

- **Баланд бардоштани сифати таълим:** амиқ гардонидани омодагии назариявии донишҷӯёни зинаи бакалавриат тавассути истифодаи усулҳои муосири таҳлили ҳодисаи резонансӣ дар низомҳои мураккаби энергетикӣ.
- **Навсозии раванди таълим:** таҷдиди таъминоти методии фанни «Масъалаҳои математикӣ дар электроэнергетика» бо ҷорӣ намудани унсурҳои автоматикунонии ҳисобҳо (таъминоти барномавӣ).
- **Рушди малакаҳои амалӣ:** ташаккули салоҳиятҳои донишҷӯён дар соҳаи ҷустуҷӯ ва бартараф кардани реҷаҳои хатарноки кори шабакаҳои барқӣ, ки ба талаботи муосири корхонаҳои истеҳсолӣ ҷавобгӯ мебошад.
- **Фаъолгардонии кори илмӣ-таҳқиқотии донишҷӯён (КИТД):** истифодаи усулҳои таҳияшуда ҳамчун замина барои иҷрои корҳои курсӣ ва рисолаҳои хатм.

Натиҷаҳои таҳқиқот дар раванди таълими кафедраи «Нерӯгоҳҳои барқӣ»-и Донишкадаи энергетикии Тоҷикистон ҳангоми омӯзиши фанни «Масъалаҳои математикӣ дар электроэнергетика» татбиқ карда шуданд.

РАИСИ КОМИССИЯ:

Муовини аввали ректор оид ба таълим ва идораи сифати таҳсилот

Зувайдуллозода Ф.З

АЪЗОЁНИ КОМИССИЯ:

Декани факултети ЭУ ва ТР Амирханов А.С.

Мудири кафедраи «Нерӯгоҳҳои барқӣ» Давлатов А.М.

Имзоҳои Зувайдуллозода Ф.З., Амирханов А.С. ва Давлатов А.М.-ро

ТАСДИҚ МЕНАМОЯМ:

Сардори шуъбаи кадрҳо ва корҳои махсуси ДЭТ Каримов З.А.