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

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

Душанбе – 2026

Диссертатсия дар кафедраи неругоҳҳои электрикии Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ иҷро шудааст.

Роҳбари илмӣ: **Ҷӯразода Шоҳин Ҷӯра**
номзади илмҳои техникӣ, дотсенти кафедраи электроэнергетикаи Донишгоҳи миллии тадқиқотии «ДЭМ», филиал дар шаҳри Душанбе

Муқарризони расмӣ: **Мадвалиев Умархон**
доктори илмҳои физика ва математика, узви вобастаи Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон (АМИТ), сарходими илмии Институти физикаю теникаи ба номи С.У. Умаров

Сайфиддинзода Одил Сайфиддин
доктори PhD аз рӯи ихтисоси 6D071800 – Энергетикаи электрикӣ (6D071804 – Системаҳо ва комплексҳои энергетикӣ), муовини сардори «Шуъбаи ҳимояи релегӣ, автоматика ва метрология», ҶСК «Барқи Тоҷик»

Муассисаи пешбар: **Донишгоҳи аграрии Тоҷикистон ба номи Шириншоҳ Шоҳтемур**

Ҳимояи диссертатсия санаи «24» ноябри соли 2026, соати 13:00 дар ҷаласаи Шурои диссертатсионии 6D.KOA–083 назди Донишкадаи энергетикии Тоҷикистон бо суроғаи: 735162, Ҷумҳурии Тоҷикистон, вилояти Хатлон, ноҳияи Кӯшониён, шаҳраки Бохтариён, кӯчаи Н. Хусрав, 73 баргузор мегардад. E–mail: messi.ilhom@yandex.ru

Бо диссертатсия ва автореферати он дар китобхона ва сомонаи Донишкадаи энергетикии Тодикистон https://www. tpei.tj шинос шудан мумкин аст.

Автореферат санаи «_____» _____ соли 2026 ирсол шудааст.

Котиби илмии
Шурои диссертатсионӣ,
номзади илмҳои техникӣ, дотсент Бурҳонзода И.Б.

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 пайвасти умумӣ дар шабакаҳои электрикӣ бояд ба талаботи стандарти мазкур мутобиқат кунад» [1]. Нишондиҳандаҳои асосии сифати энергияи электрикиро (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 ва тағйирёбии тези шиддат ва ба гурӯҳи сеюм бошад, нишондиҳандаҳои тавсифдиҳандаи ҳодисаҳои тасодуфии электромагнитӣ ва равандҳои электромагнитӣ дар шабакаҳои электрикӣ дохил мешаванд» [2]. Яке аз хосиятҳои асосии энергияи электрикӣ (ЭЭ) шакли каҷхаттаи шиддат (нишондиҳандаҳои тавсифдиҳандаи шакли каҷхаттаи шиддат K_U ва $K_{U(n)}$ маҳсуб меёбанд) мебошад. Нишондиҳандаҳои K_U ва $K_{U(n)}$ ҳам аз манбаъҳои ЭЭ ва ҳам аз истеъмолкунандагони он вобастагӣ доранд. Шакли каҷхаттаи шиддат дар тахтасимҳои неругоҳҳои электрикӣ 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 электрикӣ, 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 элементҳои 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 каҷхаттаҳои 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 ҷараён ва ё шиддат, 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 ТГОҶ 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 ТГОҶ 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 ТГОҶ 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 содда 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 баҳрабардорӣ масъалаи муҳими илмию техникӣ ба шумор меравад.

Дараҷаи таҳқиқи мавзуи илмӣ. Таҳқиқот дар самти беҳтар кардани СЭЭ, махсусан омузиши реҷаҳои ғайрисинусоидалӣ ва ҲР дар ШЭ, дар конференсияҳои байналмилалӣ, ба монанди CIRED (конференсияи байналмилалӣ оид ба низомҳои тақсимоти ЭЭ) ва созмонҳои илмии байналмилалӣ: CIGRE (шурои байналмилалӣ оид ба системаҳои бузурги электрикӣ), IEEE (институти муҳандисони электротехника ва радиоэлектроника, зеркумитаи СЭЭ) 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 дилхоҳии ШЭ ҳангоми РР 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 реҷаҳои ғайрихаттии резонансӣ (РКҒ) ва муайян кардани сабабҳои асосии камбудиҳо ҳангоми пешгӯии резонанс дар басомадҳои баланд.
2. Коркарди модели математикии шабакаи электрикии дорои бори ғайрихаттӣ (дар мисоли шабакаҳои электрикӣ Ҷумҳурии Тоҷикистон) ба назар гирифтани тағйирёбии конфигуратсияи он барои баҳодиҳии пурраи шароити бавуҷудоии ҳодисаҳои резонансӣ. Санҷиши (верификатсияи) модели коркардшуда. Дар асоси модели коркардшуда паҳншавии гармоникаҳои олӣ дар шабакаҳои электрикӣ ҳангоми реҷаҳои ғайрихаттии резонансӣ (РҒР). таҳлил намудан. Паҳншавии ташкилдиҳандаҳои гармоникаҳои олии ҷараёнро дар шабакаҳои электрикӣ Ҷумҳурии Тоҷикистон баҳо додан.
3. Коркарди алгоритми пешгӯии ҳодисаҳои резонансӣ дар гиреҳҳои ШЭ ҳангоми реҷаҳои ғайрисинусоидалӣ (РҒС) ва муайян кардани қиматҳои ҷоизии муқовиматҳои гиреҳӣ бо назардошти қиматҳои меъёрии ташкилдиҳандаҳои гармоникии олии шиддат (ТГОШ) ва ТГОҶ.
4. Такмили усули пешгӯии ҲР дар гиреҳҳои ШЭ ҳангоми (РҒС) ва коркарди алгоритм ва барнома 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 ҲР дар ШЭ бо истифода аз усулҳои беҳинсозии

метаэвристикӣ барои муайян кардани реҷаҳои хавфноктарин ва баҳодиҳии натиҷаҳои истифодаи алгоритмҳои коркардшуда дар ШЭ ҶТ, барои аниқ намудан ва пешгӯии ҲР.

Объекти таҳқиқот. Шабакаҳои электрикие, ки дорои ҳиссаи назарраси борҳои 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 назарияи электротехника, 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 (ДҶ) усулҳои муосири зеҳни сунъӣ, аз ҷумла алгоритмҳои метаэвристикӣ ба кор бурда шуданд.

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

1. Усули пешгӯии ҲР 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 хусуси гиреҳ дар ГО ба муқовимати хусуси 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 СЭЭ – $K_{U(n)}$ ва $K_{I(n)}$ 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 тавоноии табиии ($P_{\text{таб}}$) хати интиқоли барқ (ХИБ) муқаррар карда шудааст. Ин мутобиқшавии усулро ба конфигуратсияҳои гуногуни СЭ таъмин намуда, маҳдудиятҳои физикии тавоноӣ 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 ШЭ 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 канорагирӣ 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 гирехҳои 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 канорагирӣ 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 ҳангоми моделсозии математикӣ дар барномавии муосири санҷидашудаи (верификатсияшудаи) ETAP 19.0.1 ба даст омада тасдиқ мегардад (хатогии нисбии ҳисоби муқовиматҳои гирехӣ барои шабакаҳои 500 кВ аз 4,54 % зиёд нашуд). Илова бар ин, мувофиқати моделҳо ба истифодаи нишондиҳандаҳои ҳақиқии элементҳои шабака ва маълумот дар бораи тартиби гармоникии ҷараёнҳои корхонаи саноатии фаъол (КВД «ШАТ») асос меёбад. Ҳамгироии бомуваффақияти натиҷаҳои оптимизатсияи метаэвристикӣ (дар итератсияи 25-уми АТС) қобилияти корӣ ва устувории алгоритмҳои пешниҳодшударо иловатан 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 дар шабакаҳои электрикии дорои бори ғайрихаттӣ тааллуқ дорад;

• банди 3 «Таҳиясозии усулҳои ҳисоб, пешбиниҳо, оптимизатсия…» – дар кор усули пешгӯии эҳтимолияти бавуҷудоии ҳодисаҳои резонансӣ дар шабакаҳои электрикӣ бо назардошти конфигуратсияи шабака ва ҳуҷҷатҳои меъёрии сифати энергияи электрикӣ коркард шудааст;

• банди 6 «Таҳиясозии усулҳои моделсозии математикӣ.…» – дар кор модели 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 амалисозӣ. Муқаррароти асосии диссертатсия, қисмҳои ҷудогонаи он, инчунин натиҷаҳои таҳқиқот дар конференсияҳои зерин гузориш ва муҳокима карда шудаанд: конференсияи байналмилалии илмӣ-амалӣ дар мавзӯи: «Энергетика — соҳаи калидии рушди иқтисоди миллӣ» Донишкадаи энергетикаи Тоҷикистон — Кӯшониён, 25 декабри соли 2023; конференсияи байналмилалии илмӣ-амалӣ дар мавзӯи: “Энергетика — соҳаи калидии рушди иқтисоди миллӣ» Донишкадаи энергетикаи Тоҷикистон — Кӯшониён, 20 апрели соли 2024; конференсияи байналмилалии илмӣ-амалӣ дар мавзӯи: «Саноати рақамӣ ва рушди энергетика аз нигоҳи олимон ва таҳқиқотчиён», бахшида ба Иди илми тоҷик ва “Бистсолаи омӯзиш 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, автоматикунонӣ 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 «Нерӯгоҳҳои электрикӣ»-и Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ.

Интишорот аз рӯйи мавзуи диссертатсия. Муҳтавои кори диссертатсионӣ дар мақолаҳо ва баромадҳо аз ҷониби муаллиф чопшуда баён гардидааст. Доир ба мавзӯи диссертатсия 12 кори чопию илмӣ, 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 нашрия дар маводҳои 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 дохил карда шудааст.

ҚИСМҲОИ АСОСИИ ТАҲҚИҚОТ

Дар муқаддима асоснокунии мубрамияти мавзуи кор, муайян намудани мақсад ва вазифаҳои таҳқиқот, инъикоси сохтори диссертатсия, кушодани навгониҳои илмӣ, методология ва усулҳои таҳқиқот, аҳамияти назариявӣ ва амалии таҳқиқот, боэътимодии натиҷаҳои дар диссертатсия гирифташуда, муқаррароте, ки ба ҳимоя бароварда мешаванд, саҳми шахсии довталаби дараҷаи илмӣ дар омодасозии диссертатсия аҳаммияти назариявӣ ва амалии таҳқиқот оварда шудаанд.

Дар боби якум «*Паҳншавии гармоникаҳои олии ҷараён ва шиддат ҳангоми реҷаҳои ғайрисинусоидалӣ*» таъсири асосии ТГОҶ ва ТГОШ ба реҷаи кори ТЭ оварда шудааст. Нишон дода шудааст, ки мавҷудияти ТГОҶ ва ТГОШ дар СЭ ба реҷаҳои кори ТЭ ва ҚЭ таъсири манфӣ мерасонад. Мушкилот дар он аст, ки ТЭ 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]. Дар асоси ақидаи Карташев И.И. ТГОҶ ва ТГОШ ба оқибатҳои манфии зерин оварда мерасонанд: «кам шудани самаранокии раванди истеҳсол ҳангоми интиқол, тақсимот ва истеъмоли энергияи электиркӣ бо сабаби талафоти иловагии тавоноӣ; ба вуҷуд овардани талафоти иловагии ЭЭ дар элементҳои асосии ШЭ; кори бардурӯғӣ таҷҳизоти ҳимояи релеӣ ва автоматика; вайроншавии функционалӣ вобаста ба нодуруст кор кардан, кам шудани муҳлати кор ва аз кор баромадани таҷҳизот, инчунин нуқсони маҳсулот ва садама; босуръат кӯҳнашавии оиқи ТЭ; зиёд шудани хатогии таҷҳизоти ченкунандаи электрикӣ; монеа дар шабакаҳои телемеханика» [2, 1-М, 11-М]**.**

Яке аз сабабҳои манфии мавҷуд будани ГО дар ШЭ – ин эҳтимолияти ба вуқуъ омадани резонанс дар басомадҳои ГО мебошад. Чӣ хеле, ки Бессонов Л.А. дар китобаш менависад: «резонанс – ин равандҳои гузариши электромагнитӣ мебошад, ки пайдоиши онҳо ба нишондиҳандаҳои СЭЭ (НСЭЭ) таъсир мерасонад» [17]. Маълумоти умумӣ оиди ҲР дар ШЭ ҷараёни тағйирёбанда дар [9-М, 10-М] оварда шудаанд.

Дар СЭ резонанс барои кам намудани ТГОҶ бо ёрии филтрҳои ғайрифаъол истифода мешавад. Аз ҷониби дигар, ин ҳодиса метавонад дар системаҳои энергетикӣ хеле зараррасон бошад, бинобар ин ҳангоми лоиҳакашӣ ва истифодабарии шабакаҳои электрикӣ эҳтиёт кардан лозим аст, то ки аз пайдоиши резонанс дар басомади саноатӣ (50 Ҳс) 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 фузуншиддатӣ оварда мерасонад, ки метавонад боиси серборӣ ва осеб дидани таҷҳизоти электрикӣ гардад. Резонанси электрикӣ дар занҷир вақте ба вуҷуд меояд, ки муқовиматҳои (ноқилиятҳои) ғунҷоишӣ ва индуктивӣ дар басомади муайян ба якдигар баробар шаванд. Бессонов Л.А. инчунин қайд мекунад, ки «ин басомад, ки онро инчунин басомади хусусӣ ё басомади резонансӣ меноманд ва бо ифодаи зерин муайян карда мешавад:

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

Вобаста ба нақшаи пайвасткунии элементҳои *RLC* – ду намуди резонанс мавҷуд аст: пайдарпай ва параллелӣ (мувозӣ)» [17]. Дар реҷаҳои резонансӣ қиматҳои ТГОҶ ва ё ТГОШ қимати максималиро соҳиб мешаванд, ки метавонанд аз қимати меъёрии мувофиқи [1] зиёд бошанд.

Ба сифати объекти таҳқиқот қисми ҷанубии СЭ ҶТ интихоб шудааст. Истеъмолкунандагони асосӣ дар СЭ ҶТ аҳолии шаҳрҳо ва деҳот, пойгоҳҳои обкашӣ (асосан дар мавсими тобистон), инчунин бори ғайрихаттии пуриқтидор дар мисоли Ширкати алюминийи тоҷик маҳсуб меёбанд. Агар дар гузашта дар таркиби истеъмолкунандагони коммуналию маишӣ дар ҷумҳурӣ асосан ҚЭ ТВА-ашон хаттӣ қарор доштанд, аммо айни замон таркиби ин гуна истеъмолкунандагон ба куллӣ тағйир ёфтаанд ва дар таркиби истеъмолкунандагони коммуналию маишӣ бо маром ҚЭ ТВА-ашон ғайрихаттӣ пайваст шуда истодаанд. Маълум аст, ки ин гуна ҚЭ манбаи ТГОҶ буда, паҳншавии ин гуна ҷараёнҳо ба ШЭ СЭЭ-ро вобаста ба шакли каҷхаттаи шиддат паст мекунанд.

То имрӯз ба мушкилоти таъмини СЭЭ дар ШЭ ҶТ Назиров Х.Б. [15], Ҷӯразода Ш.Ҷ. [16], Иноятов Б.Ҷ. [17], Камолов М.М. [18] ва Амирхонов А.С. машғул шудаанд. Натиҷаҳои асосии корҳои олимони номбурда асосан ба баҳодиҳии СЭЭ, аз ҷумла ғайрисинусоидалӣ будани шиддат ва ҷараён дар элементҳои шабакаҳои электрикӣ, таҳлили вазъи электромагнитии СЭ ҶТ; имкониятҳои танзими шиддат дар гиреҳҳо ва усули интихобу ҷойгиркунии батареяҳои конденсаторӣ дар баъзе зеристгоҳҳои қисми марказии СЭ ҶТ;

инчунин чорабиниҳо оид ба таъмини СЭЭ равона карда шудаанд. Аммо, ҳангоми таҳлили РКҒ СЭ, 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 каҷхатти шиддат дар муқоиса бо ҳуҷҷати меъёрии [1] дар ҷадвали 1 оварда шудаанд.

Натиҷаҳои ҷадвал нишон медиҳанд, ки ба ғайр аз шабакаи 500 кВ, амалан дар тамоми синфҳои шиддат риоя нашудани зарибҳои тавсифкунандаи ғайрисинусоидалӣ будани шакли каҷхаттаи шиддат мушоҳида карда мешавад. Бояд қайд кард, ки ҳангоми ченкунӣ Ширкати алюминийи тоҷик бо тавонои пурраи худ кор намекард (тахминан 30% – и тавонои пурра) [16] 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 синфҳои гуногуни шиддат равона кард. Бо назардошти афзоиши шадиди борҳои ғайрихаттӣ дар таркиби истеъмолкунандагони ЭЭ ва эҳтимолияти ба вуҷуд омадани резонанс дар шабака бинобар мавҷудияти ТГОҶ, масъалаи омузиши РКҒ шабака муҳим мебошад [1-М, 6-М].

Ҷадвали 1. – Натиҷаҳои ченкунии НСЭЭ дар СЭ – и ҶТ дар солҳои гуногун

$U_{ном}$, кВ	НСЭЭ, тавсифкунандаи ғайрисинусоидалӣ будани шиддат					
	K_U			$K_{U(n)}$		
	2011 [15]	2015 [16,17]	2022 [18]	2011 [15]	2015 [16,17]	2022 [18]
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.

Меъёрҳои ГО дар ШЭ дар асоси қимматҳои зарибҳои K_U ва $K_{U(n)}$ мувофиқи ҳуҷҷати меъёрии [1] муайян карда мешаванд. Зарибҳои K_I ва $K_{I(n)}$ дар ҶТ меъёрбандӣ карда намешаванд, вале мувофиқи стандарти аврупоии [20] онҳо меъёрбандӣ карда мешаванд. Ҳамин тариқ, қиммати зариби $K_{U(n)}$ мавҷудияти монеаҳоро дар ШЭ нишон диҳад, қиммати зариби $K_{I(n)}$ бошад – бузургии монеаҳоеро, ки аз ҷониби манбаъҳои ГО ба ШЭ ворид карда мешаванд, ифода менамояд [10]. Дар асоси натиҷаҳои ченкуниҳое, ки дар солҳои 1994 – 2004 дар ШЭ Сибири Шарқӣ [10] ва ҶТ дар солҳои гуногун [15 – 18, 2-М, 7-М] гузаронида шудаанд, хосиятҳои зерини реҷаҳои ГО муқаррар карда шудаанд: қиммати $K_{U(n)}$ дар давоми шабонарӯз тез ва ба таври назаррас тағйир меёбад, инчунин ин зариб ҳатто дар фазаҳои гуногуни ШЭ шиддати баланд (ШБ) аз якдигар ба куллӣ фарқ мекунад; ҳангоми коммутатсияҳо дар ШЭ қимати $K_{U(n)}$ метавонад дар ҳудудҳои васеъ тағйир ёбад ва дар ин ҳолат, зиёдшавии назарраси қимати $K_{U(n)}$ метавонад дар гиреҳҳои ШЭ, ки аз ҷойи коммутатсия дуртар ҷойгиранд, ба вуҷуд ояд; афзоиши зариби $K_{U(n)}$ аз ҳисоби пайваст шудани бори ғайрихаттии нав аз мавқеи гиреҳ дар ШЭ вобаста аст; дар ШЭ-и ШБ хосиятҳои мавҷии ХИБ-и тӯлонӣ зоҳир мегарданд, ки ин боиси афзоишии назарраси қиматҳои $K_{U(n)}$ дар шумораи зиёди гиреҳҳои ШЭ оварда мерасонад.

Барои ҳисоб ва таҳлили реҷаҳои кории ШЭ асосан тавоноиҳои фаъол, ғайрифаъол ва пурра истифода мешаванд. Ҳангоми РКҒ ШЭ раванди мураккаби интиқоли тавоноӣ мушоҳида мешавад [4, 10]. Дар асоси назарияи Смирнов С.С.: «ҳангоми РКҒ, тавоноии пурраи S – ро дар намуди комплексӣ метавон чунин ифода намуд:

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

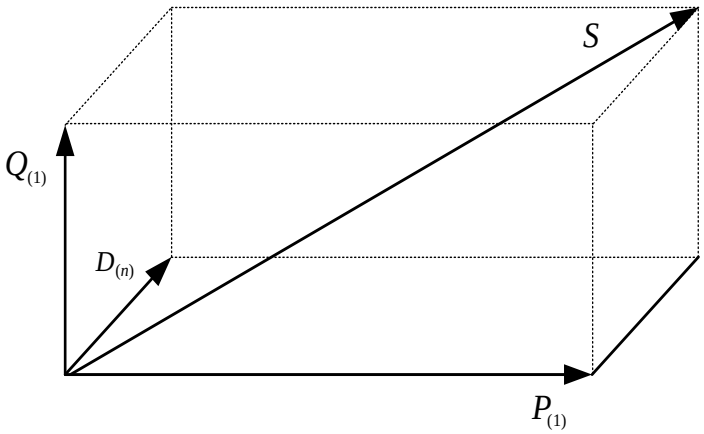
дар ин ҷо, $P_{(n)}$, $Q_{(n)}$ – муттаносибан тавоноии фаъол ва ғайрифаъоли гармоникаи тартиби n; $D_{I(n)}$ ва $D_{U(n)}$ – муттаносибан тавоноиҳои таҳрифие мебошанд, ки дар натиҷаи таъсири мутақобилаи ТГОҶ-и тартиби n бо шиддати гармоникаи асосӣ ва ҷараёни гармоникаи асосӣ бо ТГОШ-и тартиби n ба вуҷуд омадаанд; $D_{(i,j)}$ – тавоноии таҳрифие мебошад, ки дар натиҷаи таъсири мутақобилаи ТГОҶ-и тартиби i бо ТГОШ-и тартиби j вобастагӣ доранд» [10].

Аз тамоми ташкилдиҳандаҳои номбаршудаи тавоноӣ барои муайян кардани тавоноӣ дар реҷаҳои ғайрисинусоидалӣ, тавоноиҳои таҳриф, ки дар натиҷаи таъсири мутақобилаи ҷараёни гармоникаи асосӣ бо ТГОШ-и тартиби n ($D_{U(n)}$) ва таъсири мутақобилаи ТГОҶ-и тартиби i бо ТГОШ-и 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 ШЭ асосан ТГОҶ-ро ҳосил мекунанд. Бинобар ин, барои баҳодиҳии реҷаҳои ғайрисинусоидалӣ истифода бурдани тавонои таҳрифии $D_{I(n)}$, ки дар натиҷаи таъсири мутақобилаи гармоникаи якуми шиддат бо гармоникаи n-уми ҷараён пайдо мешавад, ба мақсад наздик аст [10].

Ҳамин тариқ, формулаи соддакардашудаи тавоноиҳо ҳангоми мавҷудияти ТГОҶ дар ШЭ чунин муайян карда мешавад:

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

Диаграммаи вектории тавоноиҳо ҳангоми РКҒ ШЭ дар расми 1 оварда шудааст. Дар ҶТ айни замон НСЭЭ дар асоси ҳуҷҷати меъёрии ГОСТ 3144 – 2013 [1] ба танзим дароварда мешавад.



Расми 1. – Диаграммаи вектории тавоноиҳо ҳангоми РГҒ ШЭ

Дар усулҳои гузаронидан ва таҳқиқи ченкуниҳои НСЭЭ тартиби гузаронидани ченкуниҳо ва таҳлили минбаъдаи онҳо муайян карда шудааст [21]. Ба НСЭЭ зарибҳои K_U ва $K_{U(n)}$ дохил мешаванд. Барои ин бузургиҳо қиматҳои ҷоизии муътадил ва ҳаддӣ мувофиқи [1] меъёрбандӣ мешаванд. Барои баҳодиҳии комплексии РКҒ ШЭ усулҳои анъанавии ҳисоби тавоноии фаъол ва ғайрифаъол кофӣ нестанд, бинобар ин истифодаи тавоноии таҳрифӣ имкон медиҳад, ки равандҳо дар ШЭ дорои шиддатҳои гуногуни номиналӣ дуруст муқоиса карда шаванд. Чунин равиш ҳангоми табдилдиҳӣ тавассути трансформатори

идеалӣ тағйир намеёбад, ки ин вазифаи меъёрбандии монеаҳоро аз манбаъҳои ГО содда мегардонад. Усулҳои математикии мавҷуда барои муайян кардани ҲР дар ШЭ андозаашон калон хеле пурзаҳмат боқӣ мемонанд. Барои пешгӯии дақиқи резонансҳо дар тамоми ҳудуди басомадҳо такмили алгоритмҳо ва меъёрҳои баҳодиҳии паҳншавии ТГОҶ бо назардошти омили бавуҷудоии тавоноии таҳрифӣ зарур аст.

Дар боби дуюм «***Коркарди модели математикии шабакаҳои электрикии Ҷумҳурии Тоҷикистон барои ҳисоби реҷаҳои ғайрисинусоидалӣ***» усулҳои асосии ҳисоби реҷаҳои ғайрисинусоидалӣ ва баррасии усулҳои мавҷудабуда оварда шудаанд. Маълум аст, ки ба вуҷуд омадани резонанс танҳо аз параметрҳо ва конфигуратсияи шабакаҳои электрикӣ вобаста набуда, балки ба мавҷудияти ТГОҶ низ алоқаманд мебошад. Борҳои ғайрихаттӣ ҳангоми ҳисобкуни РКҒ СЭ, хусусан дар реҷаҳои резонансӣ, дар намудҳои зерин моделсозӣ карда мешаванд: дар намуди манбаи ҷараёни гармоникаи n-ум J_n бо ноқилияти дохилии $Y_{дn}$, ки параллел ба ноқилияти контури коммутатсияи $Y_{кл}$ пайваст карда шудааст ва дар намуди манбаи ҚЭҲ-и E_n гармоникаи n-ум бо муқовимати дохилии $Z_{дn}$, ки пайдарпай ба муқовимати контури коммутатсияи $Z_{кл}$ пайваст карда шудааст [6].

Натиҷаҳои таҳлили маълумоти оморӣ нишон медиҳанд, ки дар аввали солҳои 2000-ум ҳиссаи борҳои ғайрихаттӣ ҳудуди 62,6 %-ро ташкил медод, аммо вобаста ба татбиқи васеи рӯшноидиҳии светодиодӣ, нақлиёти электрикӣ ва дигар борҳои ғайрихаттӣ, ин нишондиҳанда дар СЭ пешрафта аз 80 % гузашт, ки ин бозбинӣ кардани усулҳои пешгӯии ҳодисаҳои резонансиро талаб мекунад [4]. Натиҷаҳои муқоисаи усулҳои таҳлили ҲР дар ШЭ дар [3 - М] оварда шудаанд.

Усулҳои асосие, ки дар амалия ва корҳои таҳқиқотии муосир барои ҳисоби РКҒ истифода бурда мешаванд, инҳоянд: «усули тавозуни гармоникӣ, моделсозии динамикӣ дар фазои вақт, усули тавсифҳои басомадӣ, табдилдиҳии вейвлетӣ, усулҳо дар асоси зеҳни сунъӣ ва омузиши мошинӣ мебошанд» [1-М].

Дар асоси [10] зариби $K_{U(n)}$ – ро ба намуди зерин ёфтан мумкин аст:

$$K_{U(n)} = \frac{100 \cdot U_{i(n)}}{U_{i(1)}} = \frac{\left|\dot{I}_{Gi(n)}\right|}{0{,}01 \cdot U_{i(1)} \cdot \left|\dot{Y}_{i(n)}\right|} \cdot \frac{U_{i(1)}}{U_{i(1)}} = \frac{\left|\dot{D}_{Gi(n)}\right|}{\left|\dot{D}_{Y(n)}\right|}, \tag{3}$$

Формулаи (3) вобастагии зариби ташкилдиҳандаҳои n-уми гармоникаи шиддатро аз тавоноии таҳрифӣ ифода мекунад.

Муаллиф қайд менамояд, ки «барои ҳисоб ва таҳлили РКҒ СЭ дар замони ҳозира як қатор барномаҳои компютерӣ, аз қабили MATLAB/Simulink, ETAP, DIgSILENT PowerFactory, PSCAD/EMTDC, NEPLAN ва дигар барномаҳо вуҷуд доранд» [3-М]. Барномаҳое, ки барои таҳлили ин реҷа бештар истифода мешаванд, MATLAB/Simulink, ETAP ва DIgSILENT мебошанд. Аз байни барномаҳои номбаршуда барои ҳисоб ва таҳлили РКҒ 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.

Барои муайян намудани эҳтимолияти бавуҷудоии ҳодисаи резонансӣ дар шабакаҳои электрикии дорои борҳои ғайрихаттӣ қисми ҷанубии СЭЭ ҶТ-ро дар барномаи комплексии Etap моделсозӣ карда шудааст [1-М], дида мебароем. Натиҷаҳои моделсозиро бо натиҷаҳои ҳисобӣ, ки бо ёрии муодилаи зерин муайян карда шудааст:

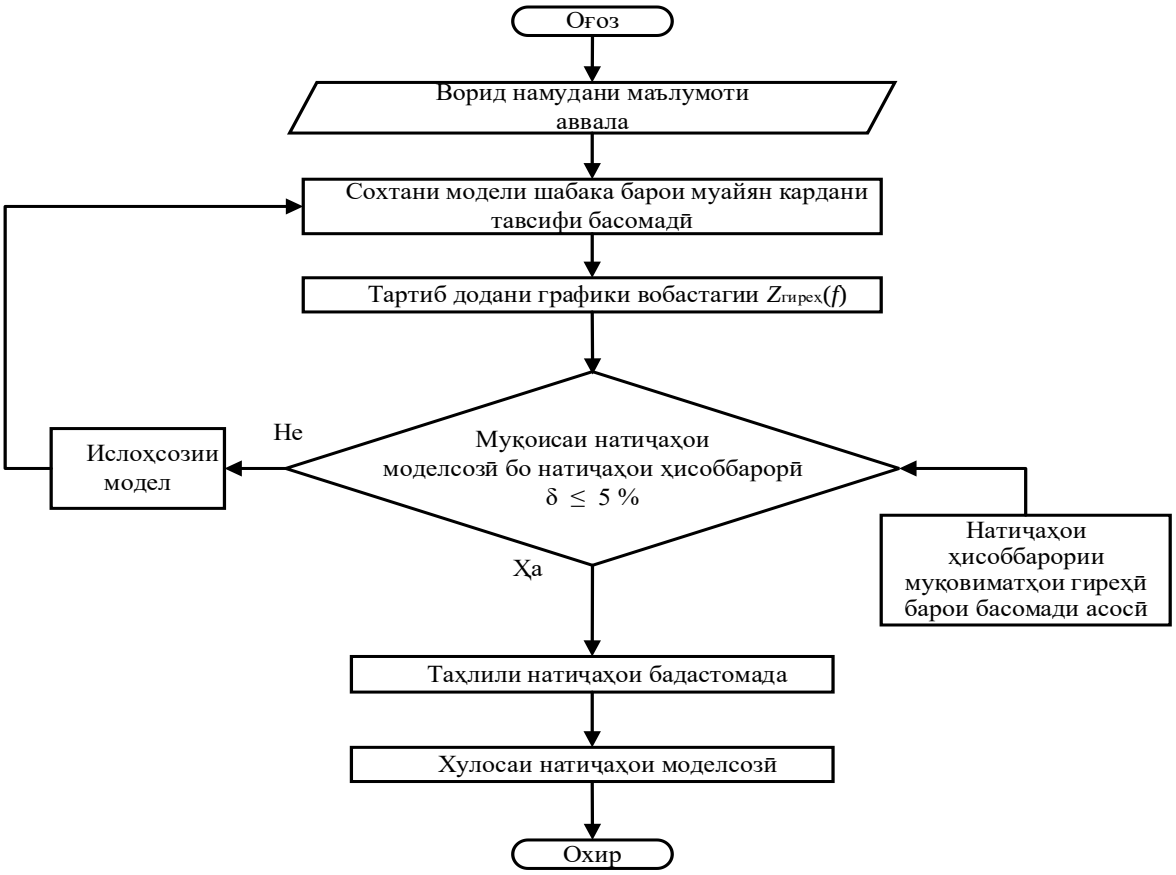
$$\dot{Y}_{i(n)} = \sum_{j=1}^{m} \dot{Y}_{ij(n)}, \tag{4}$$

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

Алгоритми муқоисаи натиҷаҳои моделсозӣ бо маълумоти ҳисобӣ дар расми 2 оварда шудааст. Агар хатогии натиҷаҳои моделсозӣ нисбат ба натиҷаҳои модел аз ҳадди ниҳоӣ нагузарад, он гоҳ таҳлили натиҷаҳои бадастомада иҷро карда мешавад. Хатогии нисбии натиҷаҳои моделсозӣ барои гиреҳи дилхоҳии i аз рӯи формулаи зерин муайян карда мешавад:

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

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



Расми 2. – Алгоритми муқоисаи натиҷаҳои моделсозӣ бо маълумоти ҳисобӣ

Муқовимати гиреҳӣ аз рӯи ифодаи зерин муайян карда мешавад:

$$Z_{i(n)} = \frac{1}{Y_{i(n)}}. \qquad (6)$$

Санҷиши натиҷаҳои моделсозӣ шабоҳати модели математикӣ ва муайянсозии муқовимати гиреҳиро бо таври ҳисобӣ тасдиқ мекунад. Натиҷаҳои ҳисоббарории хатогӣ дар гиреҳҳои 500 кВ-и шабакаи мавриди таҳқиқ буда дар ҷадвали 2 оварда шуда, дар расми 3 бошад, графики муқовиматҳои гиреҳӣ дар гармоникаи асосии шабакаҳои 500 кВ ва 220 кВ тасвир ёфтааст.

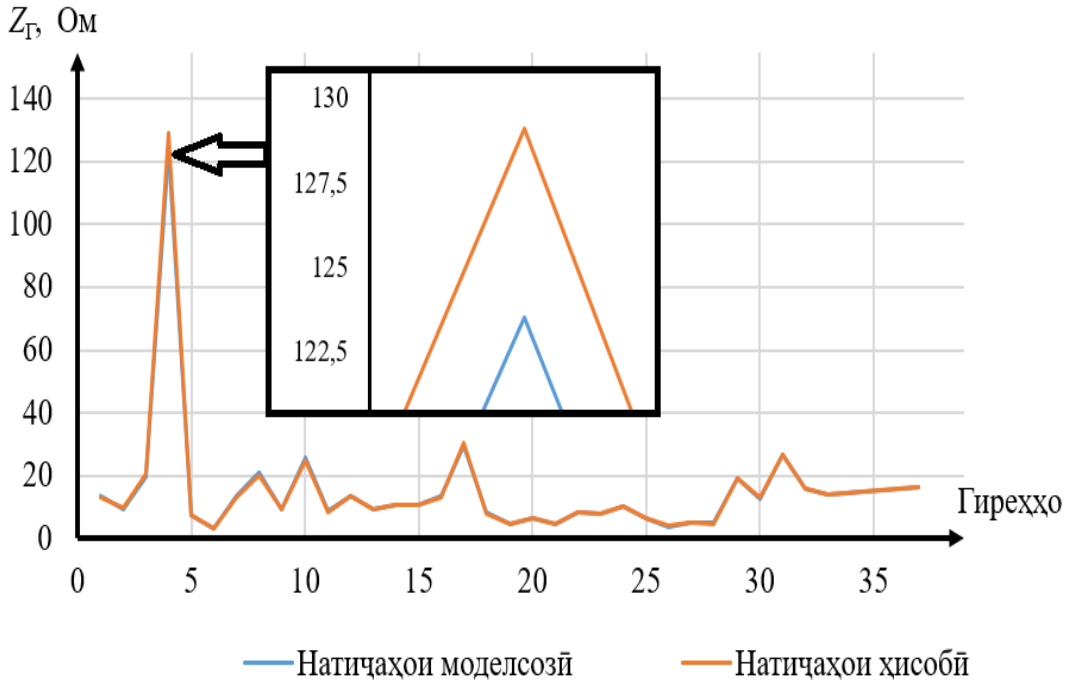
Барои нақшаи мавриди баррасӣ қарордошта тавсифҳои амплитудавии басомадӣ барои гиреҳҳои хоси нақша сохта шудаанд (расмҳои 4 ва 5).

Натиҷаҳои ҳисобкуниҳо ва ТАБ нишон медиҳанд, ки дар реҷаи муътадили нақшаи таҳқиқшаванда, муқовимати гиреҳӣ дар гиреҳи 5 дар басомади 250 Ҳс (гармоникаи 5-ум) қимати назаррасро (6885 Ом) доро мебошад. Ин чунин маъно дорад, ки ҳангоми мавҷуд

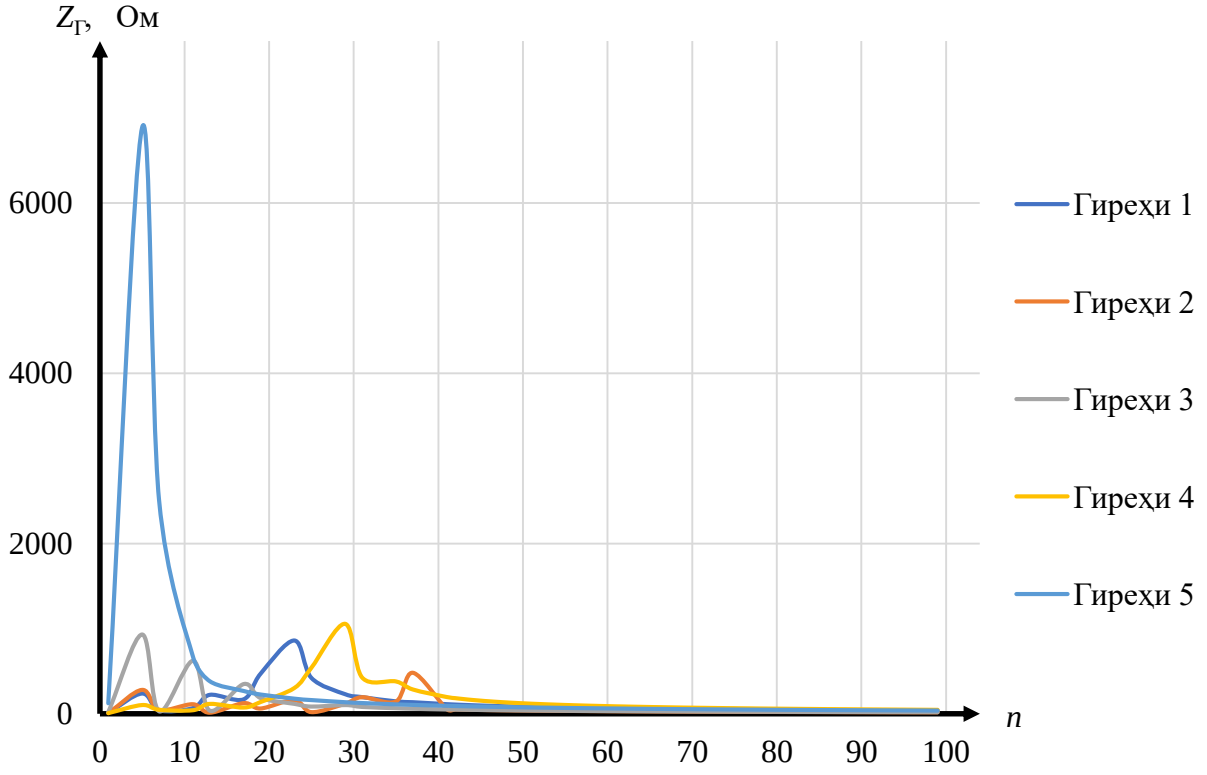
будани ТГОҶ дар ин басомад ё басомади ба он наздик, дар гирехи 5 эҳтимолияти баланди ба амал омадани резонанс мавҷуд аст.

Ҷадвали 2. – Саҳвияти нисбии моделсозӣ дар шабакаҳои электрикии 500 кВ

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



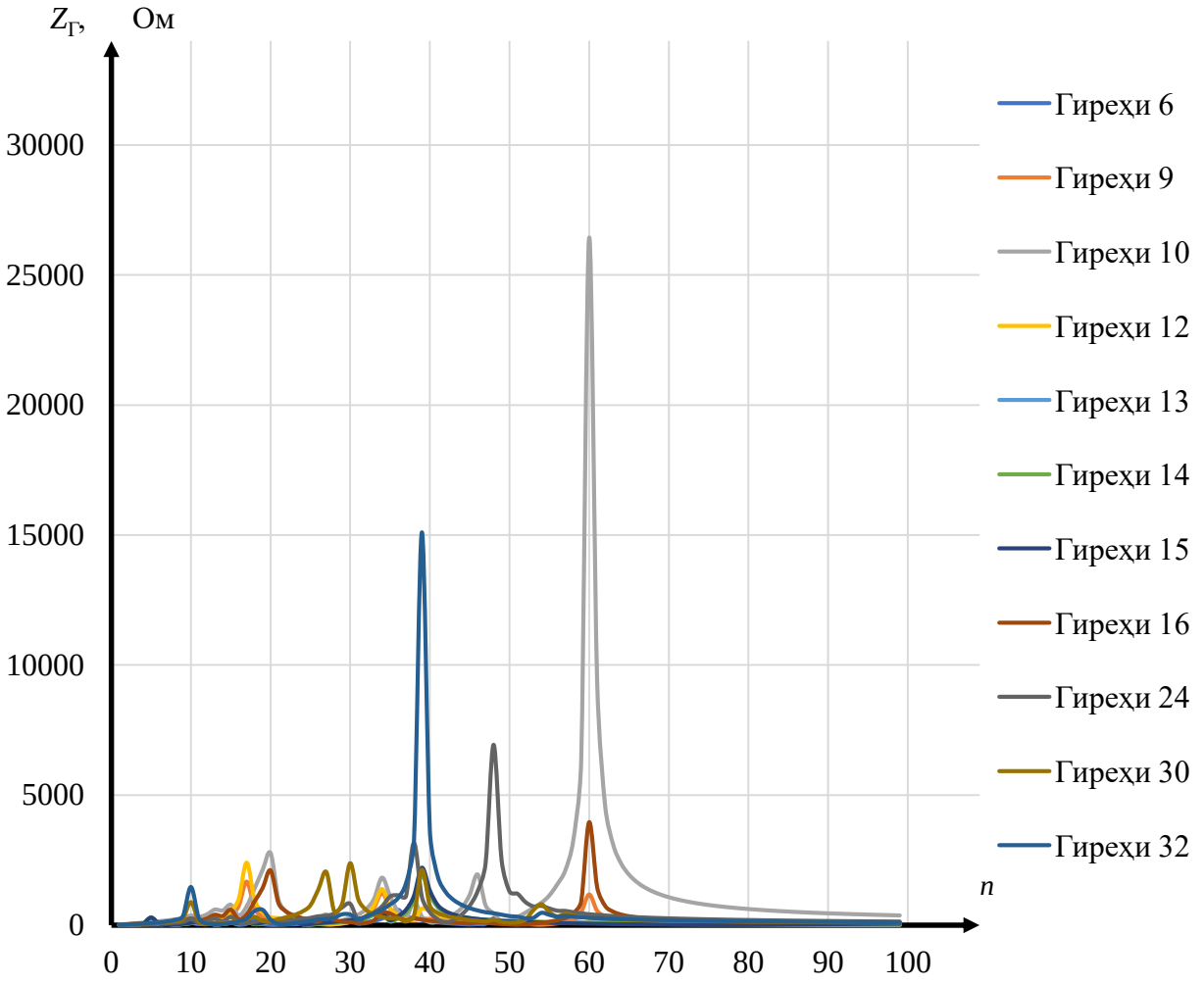
Расми 3. – Графики муқовиматҳои гирехӣ дар гармоникаи асосии дар шабакаҳои электрикии 500 кВ ва 220 кВ



Расми 4. – ТАБ-и гирехҳои 500 кВ-и нақшаи таҳқиқшаванда дар реҷаи муътадил

Муқовимати хусусӣ дар гирехи 10 (зеристгоҳи барқӣ (ЗБ) “Шаҳринав») дар басомади 3000 Ҳс (гармоникаи 60-ум) низ назаррас буда, 26425 Ом-ро ташкил медиҳад. Аммо дар ШЭ ТГОҶ аз тартиби 40-ум боло (2000 Ҳс) амалан мавҷуд нестанд ё қимати ночиз доранд (расми 4). Мувофиқи ҳуҷҷати меъёрии [1], ки дар ҳудуди ҶТ амал мекунад, танҳо гармоникаҳои то тартиби 40-ум меъёрбандӣ карда мешаванд. 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 намешаванд. Аз ин рӯ, барои таҳлили минбаъда танҳо гармоникаҳои тоқ, ки ба се каратӣ нестанд, ба назар гирифта мешаванд.



Расми 5. – ТАБ-и гирехҳои хоси 220 кВ-и нақшаи таҳқиқшаванда дар реҷаи муътадил

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 алюмини тоҷик [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, дида баромада мешаванд.

Бар боби сеюм «*Рушди усулҳои пешгӯии ҳодисаҳои резонансӣ дар гиреҳҳои шабакаҳои электрикӣ*» усулҳои мавҷудбудаи муайян намудан ва таҳлили ҲР дида шудааст. Таҳлили усулҳои мавҷуд будаи пешгӯии ҲР 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 тақҳизот то ҳадди ақал коҳиш дода шаванд ва эътимоднокии таъмини энергияи электрикӣ дар шароити гузариши энергетикӣ баланд бардошта шавад [8-М]. Ҳамчунин, ҳангоми пешгӯии резонанс ба назар гирифтани қиматҳои меъёрии НСЭЭ зарур аст. Дар робита ба ин, интихоб ва такмили усулҳои пешгӯии реҷаҳои резонансӣ дар марҳилаи лоиҳакашӣ ва истифодабарии низоми электротаъминкунӣ (НЭТ) ба вазифаи дорои аҳамияти муҳим табдил меёбад. Конфигуратсияи нақшаи бадалии системаи электрикиро метавон дар шакли граф тасвир кард. Назарияи графҳо муфассал дар кори [22] оварда шудааст. Барои графи дилхоҳи ШЭ 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.

Бо мақсади осон кардани баҳодиҳии ҲР дар ШЭ, таносуби байни муқовимати гиреҳӣ дар басомади резонансӣ ва муқовиматро дар басомади асосӣ, ҳамчун ЗПБР дар гармоникаи тартиби n-ум қабул мекунем.

$$K_{\text{р}(n)} = \frac{Z_{\text{г}(n)}}{Z_{\text{г}(1)}} \tag{7}$$

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:

$$Z_{\text{г}(n)\text{ҷоиз}} = \frac{U_{(n)\text{ҷоиз}}}{I_{(n)\text{ҷоиз}}} \tag{8}$$

дар ин ҷо, $U_{(n)\text{ҷоиз}}$ – қимати меъёрии шиддати гармоникаи n – ум мувофиқи [1]; $I_{(n)\text{ҷоиз}}$ – қимати меъёрии ҷараёни гармоникаи n – ум мувофиқи [20] мебошанд.

Бо назардошти баробарии (7), қимати меъёрии ЗПБР -ро дар басомадҳои олӣ муайян мекунем:

$$K_{\text{р}(n)\text{чоиз}} = \frac{Z_{\text{г}(n)\text{чоиз}}}{Z_{\text{г}(1)}} \tag{9}$$

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

$$I_{(n)\text{чоиз}} = \frac{I_{\text{м}(1)} \cdot K_{I(n)}}{100} = \frac{\text{Р}_{\text{таб}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \cos\varphi_{\text{ном}}} \cdot \frac{K_{I(n)}}{100} \tag{10}$$

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

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

$$K_{\text{р}(n)\text{чоиз}} \le K_{\text{р}(n)} \tag{11}$$

Агар дар шабакаи таҳқиқшаванда манбаъҳои ГО дар басомадҳое мавҷуд бошанд, ки дар онҳо резонанс имконпазир аст, қиматҳои ТГОҶ ва ТГОШ ба нишондиҳандаҳои калон мерасанд, ки ин метавонад боиси аз кор баромадани элементҳои шабака гардад [2].

Дар асоси усули пешниҳодшуда алгортм ва барномаи компютерӣ барои ҳисоб ва таҳқиқи ҲР дар ШЭ коркард карда шудаанд [12-М]. Алгоритм дар расми 6 оварда шудааст, ки дар он пайдарпайии кори он чунин мебошад:

1. Дар шабакаи электрикии дилхоҳ шумораи гиреҳҳо, элементҳо ва конфигуратсияи шабака муайян карда мешавад. Сипас, нақшаи бадалии шабакаи таҳқиқшаванда тартиб дода шуда, параметрҳои нақшаи бадалии барои басомадҳои асосӣ ва олӣ муайян карда мешаванд. Дар асоси нақшаи бадалӣ матритсаҳои $M_{\sum}$ ва N ва инчунин матритсаҳои асосии нақшаи бадалӣ тартиб дода мешаванд. Баъд аз он, дурустии матритсаҳои тартабдодашуда дар асоси шартҳои зерин санҷида мешаванд:

$$M_{\text{б}} = -\, n_t \cdot M \tag{12}$$

$$N \cdot M^T = 0 \tag{13}$$

дар ин ҷо, $M_{\text{б}}$ – матритсаи вобастагӣ барои гиреҳи балансӣ; M – матритсаи вобастагӣ барои нақша бе назардошти гиреҳи балансӣ; n_t – матритсаи воҳидии сатрӣ ва и M^T – матритсаи транспонironидашудаи M мебошанд.

2. Агар шартҳои (12) ва (13) иҷро нашаванд, бояд нақшаи электрикии шабака ислоҳ карда мешавад ва дурустии матритсаҳои тартибдодаи M и N аз нав санҷида мешаванд. Ҳангоми иҷро шудани шартҳои (12) ва (13) барои нақшаи таҳқиқшаванда матритсаҳои асосии нақшаи бадалӣ тартиб дода мешаванд.

3. Графикҳои вобастагии ноқилиятҳо ва муқовиматҳои гиреҳӣ аз басомад тартиб дода мешаванд.

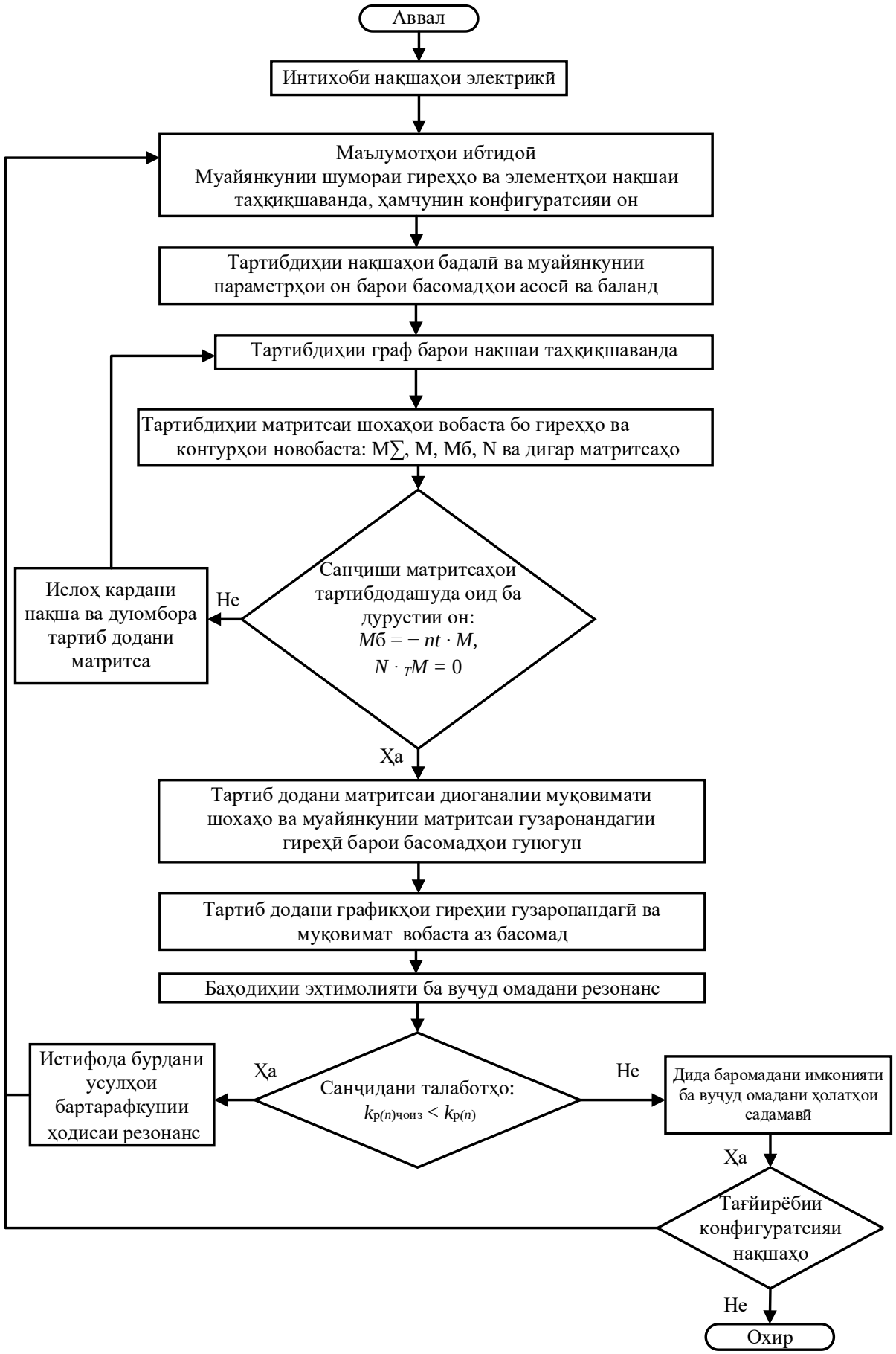
4. Баҳодиҳии эҳтимолияти пайдоиши ҲР дар шабакаи таҳқиқшаванда мувофиқи шарти (11) гузаронида мешавад. Ҳангоми иҷро шудани шарти (11), усулҳои бартараф кардани ҲР дар ШЭ истифода мешаванд ва ҳисобкунии алгоритм аз нав такрор меёбад;

5. Ҳангоми иҷро нашудани шарти (11), эҳтимояти пайдоиши ҳолатҳои садамавӣ дар нақшаи таҳқиқшаванда ва тағйирёбии конфигуратсияи нақша (хомӯшшавӣ ё пайвастшавии элементҳои ШЭ) бинобар ин ҳолатҳо баррасӣ мешаванд. Ҳангоми тағйир ёфтани конфигуратсияи нақша, ҳисобкунӣ тибқи алгоритм аз нав такрор мешавад, дар ҳолати баръакс ҳисобкунӣ ба анҷом мерасад.

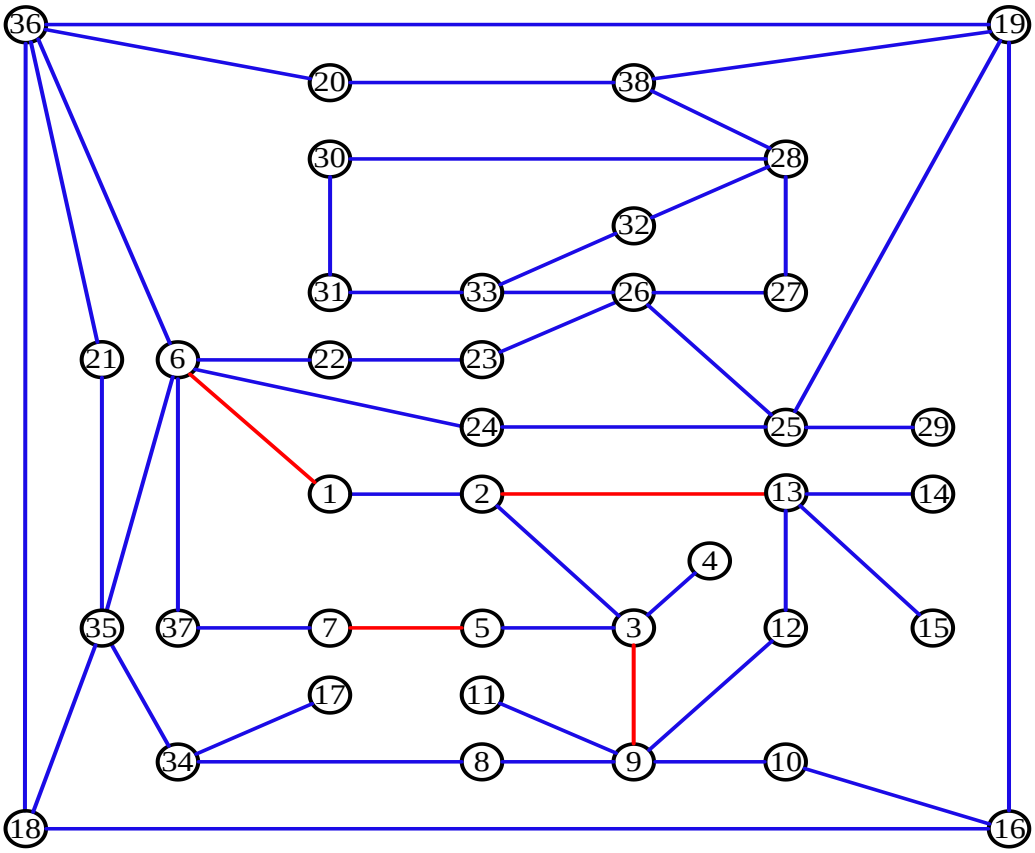
Дар асоси алгоритми пешниҳодшуда, барнома барои мошинаҳои электронии ҳисоббарор (МЭҲ) «Барнома барои таҳлил ва муайян кардани гиреҳҳо дар СЭ, ки дар онҳо ҳодисаҳои резонансӣ имконпазиранд» (рақами бақайдгирии барнома дар “Феҳристи барномаҳо барои МЭҲ № 2025685699, аз 25 сентябри соли 2025) коркард карда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

Ба сифати мисол, натиҷаҳои пешгӯии эҳтимолияти ба вуҷуд омадани ҲР дар қисми ҷанубии СЭ-и ҶТ тибқи барномаи таҳияшуда оварда мешавад. Графи қисми таҳқиқшавандаи СЭ-и ҶТ, дар расми 7 оварда шудааст.

Барои нақшаи таҳқиқшаванда (расми 7) тавсифоти амплитудавии басомадӣ барои гиреҳҳои хоси нақша (расмҳои 8 ва 9) сохта шудаанд.



Расми 6. – Алгоритми муайянкунии эҳтимолияти ба вуҷуд омадани ҳодисаҳои резонанс дар шабакаҳои электрикӣ



Бо хатҳои ранги сурх автотрансформаторҳо ва бо хатҳои ранги кабуд хатҳои интиқоли барқ нишон дода шудаанд.

Расми 7. – Графи қисми таҳқиқшавандаи СЭ ҶТ

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

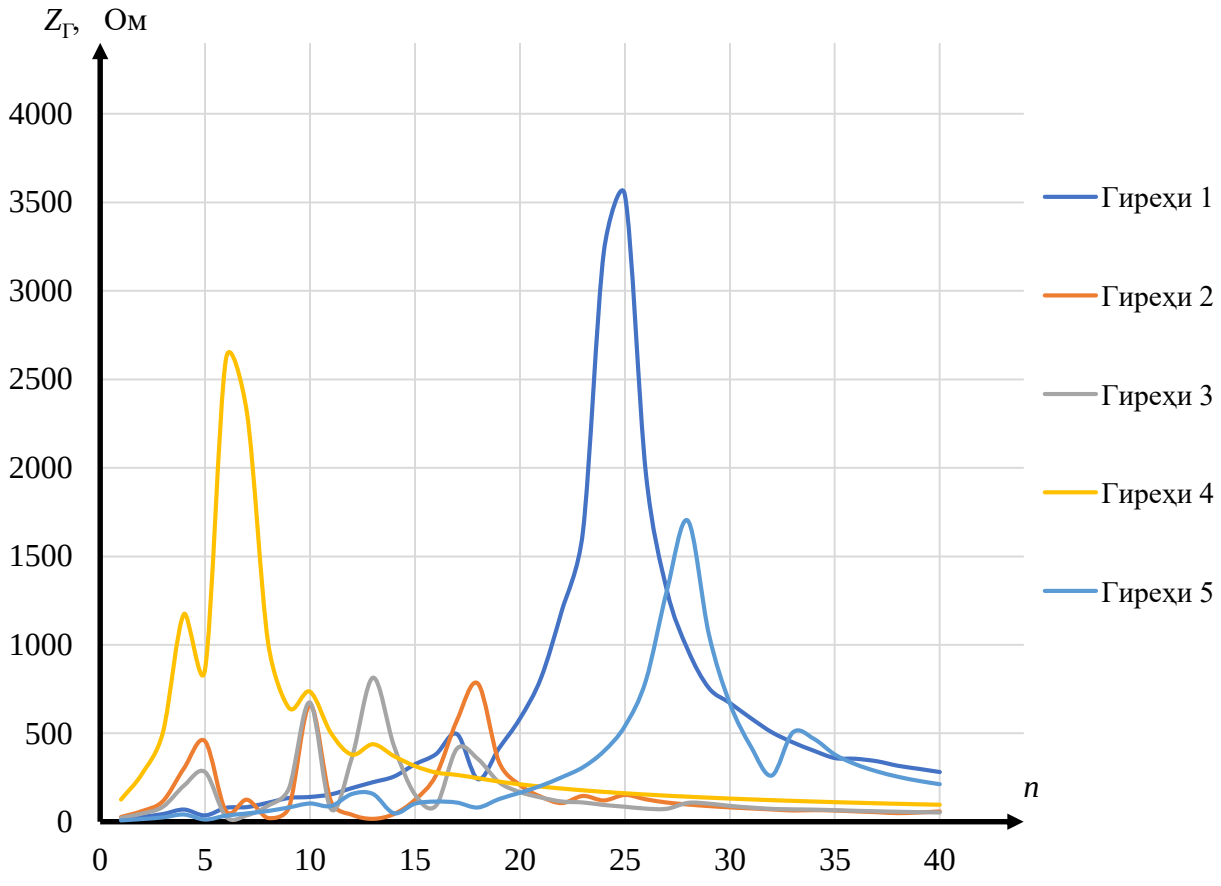
Мувофиқи муодилаҳои (7) – (9) ЗПБР муайян карда шуда, аз рӯи шарти (11) санҷиш гузаронида шуд. Натиҷаҳои ҳисобкуниҳо барои гиреҳҳои 1 – 5 дар ҷадвали 3 оварда шудаанд. Бо ранги хокистарӣ дар ҷадвал қиматҳои ЗПБР дар он гармоникаҳое ҷудо карда шудаанд, ки дар онҳо имконияти ба вуҷуд омадани резонанс мавҷуд аст

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 8 ва 9 оварда шудаанд.

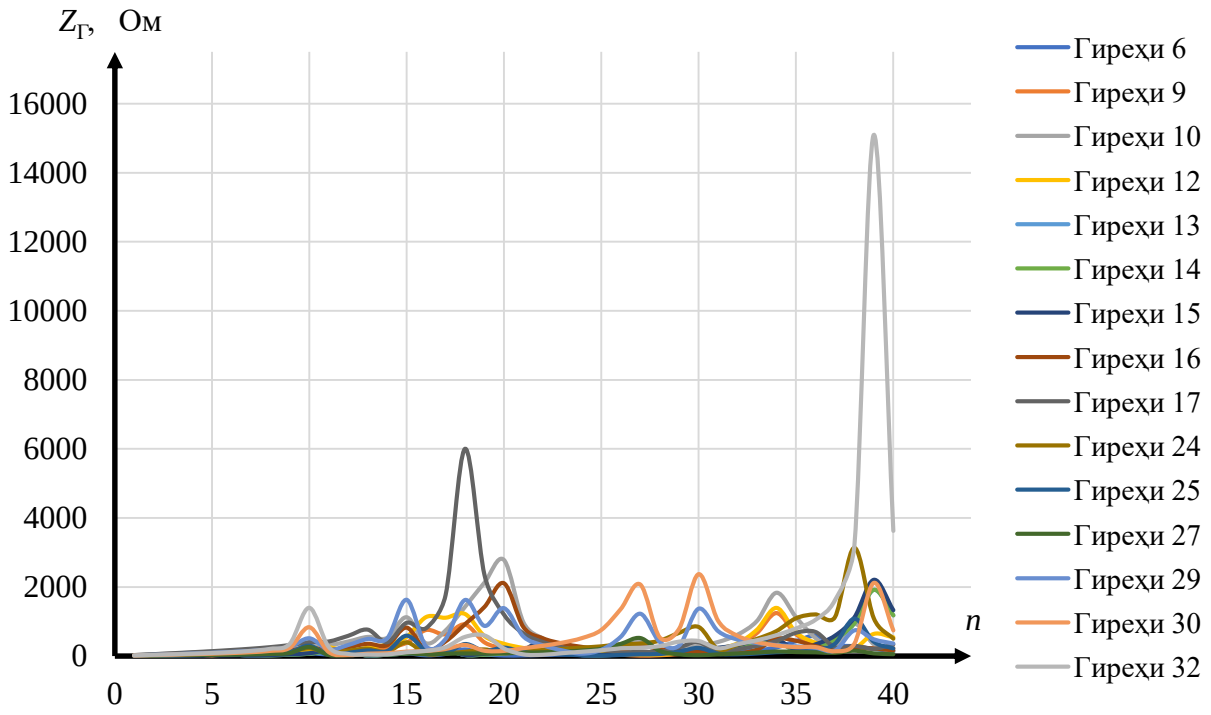
Тавре ки аз графикҳои расмҳои 8 ва 9, инчунин аз ҷадвали 3 бармеояд, ҳангоми ҷудо шудани як занҷири хати 1 – 2 дар нақшаи электрикие, ки графи он дар расми 7 оварда шудааст, гиреҳҳои 4 ва 5 нисбат ба гиреҳҳои дигар ҳассостарин ба шумор мераванд. ЗПБР дар ин реҷа қиматҳои зайлро қабул мекунад: дар гиреҳи 1, барои гармоникаҳои тартиби 19, 25 ва 29 мувофиқан $K_{р(19)} = 37$, $K_{р(25)} = 123$ ва $K_{р(29)} = 265$; дар гиреҳи 2, барои гармоникаҳои тартиби 7 ва 19 мувофиқан $K_{р(7)} = 49$ ва $K_{р(19)} = 62$; дар гиреҳи 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 дидашаванда эҳтимолияти ба вуҷуд омадани резонанс дар гармоникаҳои қайдшуда вуҷуд дорад.

Ҷадвали 3. – 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 $K_{р(n)ҷоизӣ}$, 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 8. – ТАБ-и гиреҳҳои 500 кВ-и нақшаи таҳқиқшаванда дар реҷаи баъдисадамавӣ (ҷудо кардани як занҷири хати 1–2)



Расми 9. – ТАБ-и гирехҳои хоси 220 кВ-и нақшаи таҳқиқшаванда дар реҷаи баъдисадамавӣ (ҷудо кардани як занҷири хати 1–2)

Усули пешниҳодшуда нисбат ба усулҳои маъмули мавҷудбуда дорои бартариҳои зерин мебошад: ҳисоби зариби беандозаи нисбии $K_р = Z_{(n)}/Z_{(1)}$; иҷрои қатъии шарти $K_р > K_{р.чоизӣ}$; баназаргирии тавонои табии ($P_{таб}$) ва бори ҷоизии элементҳои шабака тавассути ҷараёни гармоникаи асосӣ; ҳисоби санҷишии автоматикунонидашуда аз рӯйи меъёри аниқ (ҷоиз ва ё ноҷоиз).

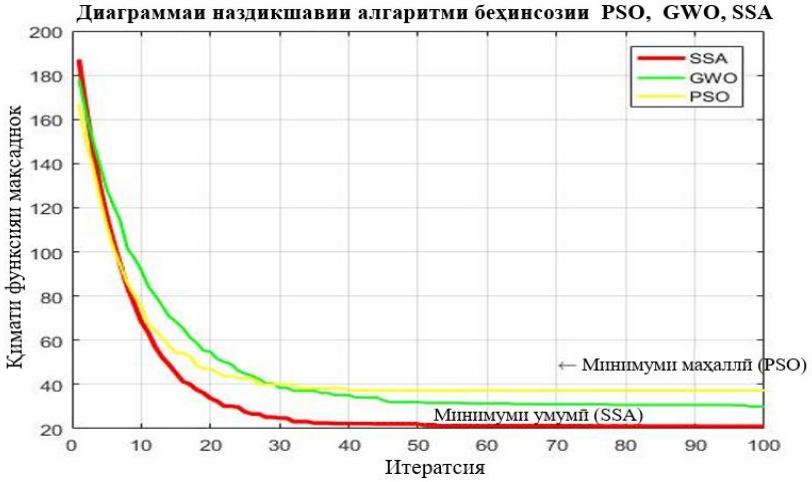
Муаллиф пешниҳод менамояд, ки ҳангоми лоиҳакашӣ ва истифодабарии ШЭ барои меъёрбандии СЭЭ эҳтимолияти бавуҷудои ҲР ба назар гирифта шавад. Барои баҳодиҳии эҳтимолияти бавуҷудоии резонанс дар ШЭ, бо назардошти тамоми вариантҳои имконпазири реҷаҳои кори онҳо, усули пешниҳодшуда имкон медиҳад, ки ҳалли зарурӣ ба даст оварда шавад.

Дар боби чорум «*Ҳодисаи резонансӣ ва пешгирии хавфҳои он ҳангоми беҳинсозии бисёрмеъёрии ҷойгиркунии дастгоҳҳои ҷубронкунанда бо истифода аз алгоритмҳои метаэвристикӣ*» усули беҳинсозӣ барои ҷобаҷогузории дастгоҳҳои ҷубронкунанда (ДҶ) дар ШЭ бо назардошти эҳтимолияти бавуҷудоии резонанс пешниҳод шудааст. 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. Барои ҳалли масъалаҳои беҳинсозӣ дар СЭ айни замон усулҳои метаэвристикӣ васеъ истифода бурда мешаванд [23]. Бартариятҳои асосии усулҳои метаэвристикӣ назар ба усулҳои классикӣ дар он аст, ки онҳо дорои механизмҳои баромадан аз экстремумҳои локалӣ мебошанд (ҷустуҷӯи стохастикӣ); бо маълумотҳои дискретӣ (рақамҳои гирехҳо) ва бутун ба осонӣ кор мекунанд; оғози (инитсиализатсияи) тасодуфии популятсия фарогирии васеи фазои ҷустуҷӯро таъмин мекунад ва ғайраҳо, мебошанд. Ҳамин тариқ, хулоса баровардан мумкин аст, ки алгоритмҳои метаэвристикӣ, ба монанди УТЗ (PSO), УГХ (GWO), УТС (SSA) ғайраҳо дорои як қатор бартариҳо нисбат ба усулҳои анъанавӣ мебошанд.

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 (11) дар нуқтаи интихобшудаи насби ДҶ кафолат медиҳад.

Барои санҷиш, фарқияти байни алгоритмҳои УТЗ, УГХ ва УТС-ро 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. 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 ва дар айни замон гиреҳҳои потенсиалҳои беҳтарини 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 [5-М]. Аз ин рӯ, хулоса кардан мумкин аст, ки УТЗ аксар вақт ҷавобҳои ғайриқобили қабулро 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 мавқеҳо дар минтақаи бехатар боқӣ мемонанд, ки ин ба алгоритм имкон медиҳад гиреҳҳои ҳамсояи шабакаро самаранок таҳқиқ намояд. Дар идома диаграммаи наздикшавии алгоритмҳои беҳинсозии УТЗ, УГХ ва УТГ-ро дида мебароем (расми 10).

Мувофиқи диаграммаи наздикшавии алгоритмҳои беҳинсозӣ (расми 10) 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 10. – Диаграммаи наздикшавии алгоритмҳои беҳинсозии УТЗ, УГХ ва УТС барои кам кардани таъсири реҷаҳои резонансӣ

Алгоритми усули тӯдаи салпҳо (АУТС) яке аз алгоритми муосири метаэвристикии беҳинсозӣ мебошад, ки 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, алоқаманди 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:

$$X_i = rand\left(0,1\right)\cdot\left(ub - lb\right) + lb. \qquad (14)$$
$$X_i = \left[x_{i1},\ \ x_{i2},\ldots,\ \ x_{id}\right].$$

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:

$$x_j^1 = \begin{cases} F_j + c_1\left(\left(ub_j - lb_j\right)\cdot c_2 + lb_j\right), & \text{если} \quad c_3 \geq 0,5, \\ F_j - c_1\left(\left(ub_j - lb_j\right)\cdot c_2 + lb_j\right), & \text{если} \quad c_3 < 0,5. \end{cases} \qquad (15)$$

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:

$$c_1 = 2\cdot e^{-\left(\frac{\Delta t}{T}\right)^2}, \qquad (16)$$

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:

$$x_j^i = \frac{1}{2}\cdot\left(x_j^i + x_j^{i-1}\right), \qquad i \geq 2. \qquad (17)$$

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 11 оварда шудааст. Пайдарпайии алгоритм чунин аст:

1. Ворид намудани параметрҳои шабакаи таҳқиқшаванда, ба монанди матритсаҳои пайвастшавии M ва N мувофиқи (12) ва (13), инчунин параметрҳои элементҳои шабакаи таҳқиқшаванда. Ҳисоби реҷаи баркароршудаи 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 (11).

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

4. Санҷиши сатҳҳои шиддат дар гиреҳҳо мувофиқи меъёри зерин:

$$0{,}9 \cdot U_{\text{ном}} \le U_i \le 1{,}1 \cdot U_{\text{ном}}, \quad i \text{ –рақами гиреҳ.} \qquad (18)$$

5. Ҳисоб ва санҷиши талафоти тавоноӣ фаъол ΔP;

6. Санҷиши эҳтимолияти пайдоиши резонанс мувофиқи шарти (11).

7. Барои муайян намудани қадами ҳалкунанда бояд шартҳои зерин бояд иҷро шаванд:

7.1. 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.

7.2. Азнавсозии ҳалли беҳтарин (F). Интихоби салпҳои дорои камтарин талафот ва иҷрошавии шарти (18), дар байни онҳое, ки хатари резонанс надоранд (ҳангоми иҷро нагардидани шарти (11)).

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

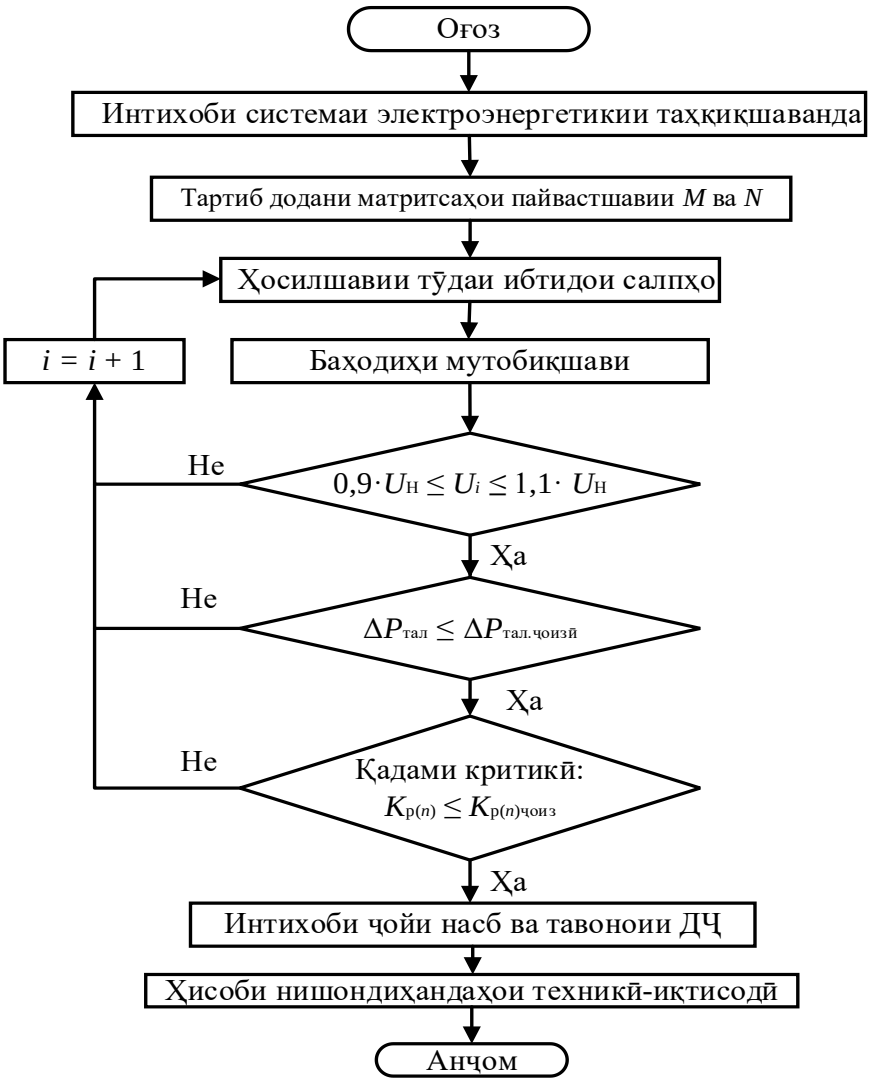
Ҳамчун намуна қисми ҷанубии СЭ ҶТ-ро ки графи он дар расми 7 оварда шудааст, баррасӣ менамоем. Барои таъмини СЭЭ (аз рӯи сатҳи зарибҳои ғайрисинусоидали шиддат (K_U ва $K_{U(n)}$) дар нақшаи баррасишаванда, бо назардошти эҳтимолияти пайдоиши ҲР, аз АУТС истифода мебарем. Маълумоти ибтидоӣ чунин мебошанд: ченаки масъала d = 38 гиреҳ (ҷустуҷӯи гиреҳи оптималӣ барои насби ДҶ); шумораи салпҳо N = 30; шумораи максималии итератсияҳо T = 100 ва функсияи мақсаднок – муътадилгардонии сатҳи шиддат дар гиреҳҳо ва зарибҳои K_U ва $K_{U(n)}$, камкунии талафот. Натиҷаҳои раванди итератсионӣ дар ҷадвали 4 оварда шудаанд. 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 5 оварда шудааст.

Ҷадвали 4. – Натиҷаҳои раванди итератсионии алгоритми АТС

Итератсия	Пешвои тӯда (X^1)	Санҷиш аз рӯи шарти (11)	Натиҷа
1	Гиреҳ 10, $Q_{КУ}$ = 50 МВАр	Иҷро нагардидани шарт дар гиреҳи 5	Пешво ба мавқеи навбатӣ ҳаракат мекунад
25	Гиреҳ 4, $Q_{КУ}$ = 25 МВАр	Иҷро гардидани шартҳо дар ҳамаи гиреҳҳо	Салпҳо ба гиреҳи 4 наздик шуда, соҳаи ҷустуҷӯро дар атрофи он маҳдуд месозанд
100	Гиреҳ 4, $Q_{КУ}$ = 25 МВАр	Иҷро гардидани шартҳо дар ҳамаи гиреҳҳо	Зариби c_1 ба нол майл намуда, мавқеи тӯдаро дар оптимуми умумӣ муайян мекунад

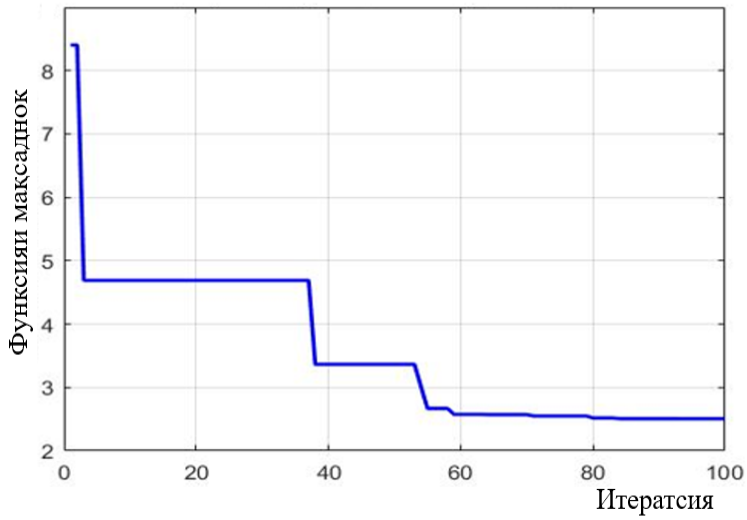
Ҷадвали 5. – Муқоисаи натиҷаҳои ҳисоб дар ҳолати аввала ва пас аз оптимизатсия

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



Расми 11. – Блок-нақшаи алгоритми усули тӯдаи салпҳо барои интихоби ҷойи насби ДҶ

Графики тағйирёбии зариби K_U дар раванди беҳинсозӣ дар расми 12 оварда шудааст.



Расми 12. – 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, 5 ва графики расми 12 бармеоянд, ки дар қадами 56-уми

раванди итератсионӣ тамоми шартҳо иҷро гардида, алгоритм натиҷаи лозимаро ба даст меоварад.

ХУЛОСАҲО ВА ТАВСИЯҲО

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:

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 ($K_{\text{рез}} \geq K_{\text{рез.ҷоизӣ}}$), 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 нусхабардори карда шаванд. Барноманомаи 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 хатогии 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 серборӣ 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 гиреҳи 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 када шудааст [5 - М].

Тавсияҳо барои истифодаи амалӣ

Усулҳо, моделҳои математикӣ ва барномаи компютерии сохташудаи «Барнома барои таҳлил ва муайян кардани гирехҳои 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 гирехҳои осебпазир ва ҳассоси ШЭ ҳангоми тағйирёбии сохтор ва реҷаҳои кори онҳо истифода карда шаванд.

Усули таҳияшудаи беҳинсозии бисёрмеъёрии ҷои насб ва тавоноии дастгоҳҳои ҷуброкунанда (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 канорачӯӣ 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. М.: Стандартинформ, 2014, 16 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.

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

18. Иноятов Б.Д. Разработка методики оценки состояния электрооборудования распределительных электрических сетей по результатам контроля качества электроэнергии: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2019, 121 с.

19. Камолова М.М. Разработка методики расчёта и прогнозирования показателей качества электроэнергии в сетях коммунально-бытового назначения: доктора философии (PhD) по специальности 6D071800 – Электроэнергетика, Душанбе, 2021, 158 с.

20. IEEE Std 519-1992. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. 1993, 100 p.

21. ГОСТ Р 8.622–2006. Показатели качества электрической энергии. Методика выполнения измерений при проведении контроля качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2006.– 73 с.

22. Джуразода Ш.Дж. Математические задачи электроэнергетики / Ш.Дж. Джуразода, Х.Б. Назиров, З.С. Ганиев, Р.С. Ишан-Ходжаев / учебно-методическое пособие. – М.: Вологда: Инфра-Инженерия, 2026. – 140 с.: ил., табл.

23. Алехин Р.А. Методика прогнозирования резонансных явлений в электроэнергетических системах с нелинейными нагрузками/ Р.А. Алехин, Ю.П. Кубарьков, Д.В. Замаков, Д.В. Умяров / Вестник СГТУ. Серия: Технические науки. – 2019. – №3(63). – с. 6-19.

РӮЙХАТИ ИНТИШОРОТИ ИЛМИИ ДОВТАЛАБИ ДАРАҶАИ ИЛМӢ:

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 Z.H.** Valuation of Potential of Resonance Phenomena in Electric Power Systems Containing Nonlinear Loads / Jurazoda Shohin (Dzhuraev Shokhin); Zikrullo Habibullozoda; Khurshed Nazirov; Zokirjon Ganiev; Saidjon Ismoilov; Rustam Karimov // 2026 ElCon Conference of Young Researchers in Power, Energy & Industry Applications (ElCon-PEIA). 03-05 February 2026, Saint Petersburg, Russian Federation. – 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 зернерӯгоҳи «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]. **Хабибуллозода З.Х.** 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 федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «НИУ «МЭИ». – EDN OTHGQR.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН

ТАДЖИКСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА М.С. ОСИМИ

УДК: 621.311;

На правах рукописи



ХАБИБУЛЛОЗОДА ЗИКРУЛЛО ХАБИБУЛЛО

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени доктора философии (PhD) - доктора по специальности 6D071800 – Электроэнергетика (6D071801 – Электрические станции и электроэнергетические системы)

Душанбе – 2026

Диссертация выполнена на кафедре «Электрические станции» Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими.

Научный руководитель: **Джуразода Шохин Джура**
кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», филиал в городе Душанбе

Официальные оппоненты: **Мадвалиев Умархон Мадвалиевич**
доктор физико-математических наук, член-корреспондент Национальной академии наук Таджикистана (НАНТ), главный научный сотрудник Физико-технического института имени С. У. Умарова

Сайфиддинзода Одил Сайфиддин
доктор PhD по специальности 6D071800 – Электроэнергетика (6D071804 – Энергетические системы и комплексы), заместитель начальника «Отдела релейной защиты, автоматики и метрологии» ОАО «Барқи Тоҷик»

Ведущая организация: **Таджикский аграрный университет имени Шириншох Шотемур**

Защита диссертации состоится «24» ноября 2026 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 6D.KOA-083 по защите кандидатских диссертаций на базе Института энергетики Таджикистана по адресу: 735162, Республика Таджикистан, Хатлонская область, район Кушониён, посёлка городского типа Бохтариён, улица Н. Хусрава, 73. E-mail: messi.ilhom@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института энергетики Таджикистана и на сайте организации https://tpei.tj/shuroi–dissertatsioni/

Автореферат разослан «____»_____2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент Бурхонзода И.Б.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Электрическая энергия (ЭЭ) как товар должна иметь необходимые качества. В соответствии с требованиями пункта 4.2 стандарта 32144-2013: «показатели качества электрической энергии в точках общего присоединения к электрическим сетям должны соответствовать требованиям настоящего стандарта» [1]. Основные показатели качества электрической энергии (КЭЭ) в соответствии ГОСТ-32144-2013 разделяются на 11 видов, а согласно книге Карташева И.И. – на три группы: «к первой группе относятся отклонения частоты (Δf) и медленные изменения (отклонения) напряжения ($\delta U_{(-)}$) и ($\delta U_{(+)}$); ко второй группе относятся ПКЭ, характеризующие несинусоидальность формы кривой напряжения (коэффициент n-ой гармонической составляющей напряжения ($K_{U(n)}$), суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (K_U), несимметрию напряжений в трехфазной сети и колебания напряжения (фликер); третью группу составляют ПКЭ, характеризующие случайные электромагнитные явления и электромагнитные процессы в системе электроснабжения» [2]. Одним из основных свойств ЭЭ является форма кривой напряжения (показателями, характеризующими форму кривой напряжения, являются K_U и $K_{U(n)}$). Показатели K_U и $K_{U(n)}$ зависят, как от источников ЭЭ, так и от потребителей ЭЭ. Форма кривой напряжения на шинах электрических станций относительно близка к идеальной синусоиде, однако, при передаче и распределении ЭЭ в узлах электрических сетей (ЭС), содержащих электроприёмники (ЭП) с нелинейными вольт-амперными характеристиками (ВАХ), которые являются источниками высших гармонических составляющих тока (ВГСТ), форма кривой напряжения искажается. Поэтому качество электроэнергии на шинах электрических станций, не гарантирует её качества на зажимах электроприёмников.

В последние годы в составе потребителей ЭЭ наблюдается существенное увеличение количества и мощности ЭП с нелинейной ВАХ (далее «нелинейная нагрузка»). В ЭС соединяются элементы силовой преобразовательной техники, цифровых систем управления и энергосберегающих технологий. В соответствии с исследованиями Карташева И.И.: «массовое применение регулируемых электроприводов, мощных выпрямительных установок, источников бесперебойного питания, и в том числе систем возобновляемой энергетики приводит к существенному увеличению доли нелинейных нагрузок в ЭС» [2]. Этот процесс в конечном итоге приводит к появлению ВГСТ в сетях и искажению формы кривой напряжения.

Одним из наиболее опасных последствий искажения формы кривых напряжения и тока являются резонансные явления (РЯ) на частотах высших гармоник (ВГ). Возникновение резонанса (как параллельный, так и последовательный) приводит к резкому увеличению действующих значений токов или напряжений, увеличению коэффициентов, характеризующих форму кривой напряжения по сравнению с нормативным значением. Этот процесс приводят к ускоренному старению изоляции, выходу из строя электрооборудования (ЭО), увеличению потерь ЭЭ и другим негативным последствиям.

Одной из основных проблем, при несинусоидальных режимах работы (НРР) электроэнергетических систем (ЭЭС), является распространение ВГ, создаваемых источниками тока. Это процесс в основном зависит от схемы конфигурации ЭЭС, её параметров и конструктивных особенностей элементов. Данная проблема в основном исследуется для разработки способов снижения уровня ВГ с применением расчетно-измерительных методов, математических моделей и анализа негативного влияния ВГ. В большинстве случаев, независимо из-за наличия ВГСТ в ЭС, значения коэффициентов K_U и $K_{U(n)}$ не превышают нормативных значений, а при работе сети в резонансном или близко к резонансным режимам, данные коэффициенты превышают нормативно-допустимые значения. Поэтому, необходимо найти границу значений ВГСТ и узловых сопротивлений исследуемой схемы для того, чтобы величина значения коэффициентов K_U и $K_{U(n)}$ не превышали нормативные значения. Следует отметить, что существующие методики оценки резонансных режимов (РР) зачастую опираются на упрощенные модели и не всегда

учитывают динамический характер изменения параметров сети. В связи с этим, совершенствование методик прогнозирования РЯ, позволяющих с высокой точностью определять риски возникновения аварийных режимов на стадии проектирования и эксплуатации, является актуальной научно-технической задачей.

Степень изученности научной темы. Исследования в области обеспечения КЭЭ, а именно НРР и РЯ в ЭС, представлены на международных конференциях, таких как CIRED (международная конференция по системам распределения электроэнергии), международными научными организациями: CIGRE (международный совет по большим электрическим системам), IEEE (институт инженеров по электротехнике и радиоэлектронике, подкомитет качества электроэнергии). Огромный вклад в развитие методов исследования, теории и практических подходов к решению данных вопросов внесли зарубежные ученые, как Арриллага Дж. [3], Эммануил А.Е. [4], Вилкош К. [5], Фукс Э. [6], В. Сюй [7] и др. В русскоязычной литературе решением данной проблемы занимались Жежеленко И.В. [8], Железко Ю.С. [9], Карташев И.И. [2], Смирнов С.С. [10], Коверникова Л.И. [11], Курбатский В.Г. [12], Тульский В.Н. [13], Осипов Д.С. [14]. и др. В Таджикистане данным вопросом занимались Назиров Х.Б. [15], Джуразода Ш.Дж [16] и другие. Однако в перечисленных работах не уделено должного внимания проблемме нормирования показателей КЭЭ при РЯ в произвольной схеме электрической сети при различных режимах её работы.

Связь исследования с программами (проектами) и научной тематикой. Научные исследования, проведенные в рамках диссертационной работы, непосредственно связаны с реализацией государственных приоритетов Республики Таджикистан в области энергетики, цифровизации и устойчивого развития, такие как Национальная стратегия развития Республики Таджикистан на период до 2030 года (№ 392 от 01.10.2016 г.), Закон РТ «Об энергетике» (№ 1909 от 19.07.2022 г.), Постановление Правительства РТ № 427 от 30 июля 2020 года (в рамках «Двадцатилетия изучения и развития естественных, точных и математических наук», 2020–2040 гг.).

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель исследования. Совершенствование методики прогнозирования резонансных явлений в электрических сетях с нелинейной нагрузкой.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели следует решить нижеследующие задачи:

1. Провести анализ существующих методов оценки НРР и выявить основные причины недостатков при прогнозировании резонанса на высоких частотах.
2. Разработать математическую модель электрическую сеть, содержащей нелинейную нагрузку (на примере ЭС Республики Таджикистан (РТ)) с учётом изменения её конфигурации для полноценной оценки условия возникновения резонансных явлений. Верифицировать разработанную модель. На основе разработанной модели проанализировать распространения высших гармоник в электрических сетях при НРР. Оценить распространение ВГСТ в ЭС РТ.
3. Разработать алгоритм прогнозирования РЯ в узлах ЭС при НРР и определить допустимые значения узловых сопротивлений, с учётом нормативных значений высших гармонических составляющих напряжения (ВГСН) и ВГСТ.
4. Усовершенствовать методику прогнозирования РЯ в узлах ЭС при НРР и разработать алгоритм и программу для прогноза и определения РЯ в ЭС.
5. Создать алгоритм автоматизированного поиска повышенных значений коэффициентов K_U и $K_{U(n)}$ из-за РЯ в ЭС с применением методами метаэвристической оптимизации для определения наиболее опасных режимов и оценить результаты применения разработанных алгоритмов в ЭС РТ для выявления и прогнозирования РЯ.

Объект исследования. Электрические сети, содержащие значительную долю нелинейных нагрузок.

Предмет исследования. Процессы возникновения и распространения высших гармоник, а также условия формирования частотных резонансов в электрических сетях при различных режимах работы нелинейной нагрузки и конфигураций сетей.

Теоретические основы исследования. Теоретическую и методологическую базу диссертационной работы составляют фундаментальные положения теоретической электротехники, теории электрических цепей и теории несинусоидальных режимов с использованием гармонического анализа (метод разложения в ряд Фурье). В математическом описании режимов работы сложных электрических сетей использованы методы теории графов, для составления матриц соединений узлов и ветвей, а также матриц узловых проводимостей и сопротивлений. Для прогнозирования вероятности возникновения резонансных явлений в электрических сетях с нелинейной нагрузкой и решения задачи многокритериальной оптимизации мест размещения компенсирующих устройств, применены современные методы искусственного интеллекта, в том числе метаэвристические алгоритмы (метод роя сальп (МРС)).

Научная новизна. По итогам проведенного исследования впервые получены следующие результаты:

1. Разработан метод прогнозирования резонансных явлений в ЭЭС, базирующийся на анализе амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) узлов. В отличие от существующих подходов, метод использует авторский прогнозируемый коэффициент возникновения резонанса (ПКВР), выраженный через отношение собственного сопротивления узла на высшей гармонике к сопротивлению на основной частоте. Это позволяет формализовать оценку чувствительности узла к гармоническим искажениям.

2. Обосновано пороговое условие существования опасного резонанса, связывающее расчетный коэффициент ПКВР с нормативными показателями качества электроэнергии – $K_{U(n)}$ и $K_{I(n)}$. Предложенный математический критерий: $K_{\text{рез}} \geq K_{\text{рез.доп.}}$, позволяет перейти от качественного частотного анализа к количественной оценке соответствия режима требованиям электромагнитной совместимости (ЭМС).

3. Установлена аналитическая зависимость нормативного значения ПКВР от класса напряжения сети и натуральной мощности ($P_{\text{нат}}$) линии электропередачи (ЛЭП). Это обеспечивает адаптивность метода к различным конфигурациям ЭЭС и учитывает физические ограничения пропускной способности сети при прогнозировании резонансных рисков.

4. Создан алгоритм автоматизированного поиска повышенных значений коэффициентов K_U и $K_{U(n)}$ из-за РЯ в ЭС с применением методов метаэвристической оптимизации (метода серых волков (МСВ), роя частиц (МРЧ) и роя сальп (МРС)) для определения наиболее опасных режимов в электрических сетях.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработаны и обоснованы метод, алгоритм и компьютерная программа для прогнозирования резонансных явлений в электрических сетях с нелинейной нагрузкой. Данный метод базируется на анализе АЧХ и расчёте ПКВР, что позволяет с высокой точностью определять чувствительные узлы сети и достоверно оценивать риски возникновения резонанса.

2. Определены допустимые и расчетные значения ПКВР в нормальных и послеаварийных режимах для узлов электрических сетей, содержащих нелинейную нагрузку (на примере электрических сетей Республики Таджикистан), позволяющие выявлять резонансно-опасные зоны при изменении топологии и режимов работы сети.

3. Разработаны и усовершенствованы метод и алгоритм многокритериальной оптимизации выбора мест установки и мощности статических конденсаторных батарей (компенсирующих устройств) на основе метаэвристического алгоритма роя сальп, в котором условия возникновения частотного резонанса введены в итерационный процесс поиска в качестве штрафной функции в соответствии с критерием ПКВР, что обеспечивает гарантированный обход резонансных зон и снижение потерь активной мощности.

Теоретическая и практическая значимость исследования:

Теоретическая значимость исследования заключается в развитии метода прогнозирования резонансных явлений в электрических сетях с нелинейной нагрузкой и обосновывается предложенным ПКВР и его математическим условием, установлением аналитической зависимости от класса напряжения и натуральной мощности ЛЭП, а также совершенствованием метаэвристического метода оптимизации места установки и мощности компенсирующих устройств КУ с учетом вероятности возникновения резонансных явлений в рамках требований нормативной электромагнитной совместимости.

Практическая значимость подтверждается внедрением:

1. Разработанные метод, алгоритм и компьютерная программа могут использоваться проектными институтами и электроснабжающими организациями для выявления чувствительных и уязвимых узлов электрических сетей при изменении структуры сети и подключении новых источников высших гармоник (нелинейных нагрузок).

2. Предложенный метод многокритериальной оптимизации места установки и мощности статических конденсаторных батарей позволяет диспетчерским службам и проектным институтам обоснованно выбирать точки подключения компенсирующих устройств для гарантированного обхода резонансных зон, нормализации уровня напряжения и снижения потерь активной мощности в электрических сетя.

3. Результаты диссертации применяются при подготовке бакалавров по специальностям «Электрические станции» и «Электроснабжение» при изучении дисциплин «Математические задачи электроэнергетики» и «Электромагнитная совместимость» Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими, институт энергетики Таджикистана, Филиала НИУ «МЭИ» в г. Душанбе.

Степень достоверности результатов диссертации: Сформулированные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации обоснованы корректным применением фундаментальных законов теоретической электротехники, численных методов расчета и математического аппарата матричной алгебры. Достоверность подтверждается высокой степенью совпадения результатов аналитических расчетов с данными, полученными при математическом моделировании в современном верифицированном программном комплексе ETAP 19.0.1 (относительная погрешность расчёта узловых сопротивлений для сетей 500 кВ не превышает 4,54 %). Кроме того, адекватность моделей базируется на использовании реальных параметров элементов сети и данных о гармоническом составе токов действующего промышленного предприятия (ГУП «ТАЛКО»). Успешная сходимость результатов метаэвристической оптимизации (в 25-ом итерационном процессе АРС) дополнительно доказывает работоспособность и устойчивость предложенных алгоритмов.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности:

Диссертация выполнена в соответствии со следующими разделами Паспорта номенклатуры специальностей научных работников: - **по специальности 6D071801 – Электрические станции и электроэнергетические системы,** в частности:

пункту-2 «Разработка научных основ (подходов) исследования...» относится к разработанной методике прогнозирования вероятности возникновения резонансных явлений в электрических сетях, содержащих нелинейные нагрузки.

пункту-3 «Разработка методов расчета, прогнозирования, оптимизации…» в работе разработан метод прогнозирования вероятности возникновения резонансных явлений в электрических сетях с учётом конфигурация сетей и нормативных документов качества электрической энергии.

пункту-6 «Разработка методов математического и физического…» в работе создана математическая модель для расчёта несинусоидальных режимов работы южной части ЭЭС Республика Таджикистан для определения частотной характеристики узлов системы.

пункту-12 – «Разработка методов контроля и анализа…» в диссертационной работе разработан алгоритм для оптимального места установки и мощности

фильтрокомпенсирующих устройств, для нормализации уровня напряжения на зажимах электроприёмников и снижения потери мощности с учётом вероятности возникновения резонанса.

Личный вклад соискателя учёной степени в подготовке диссертации заключается в формулировании целей и задач исследования, формировании методологической и информационной базы, непосредственном проведении теоретических изысканий, а также в создании математических методик, алгоритмов и специализированного программного комплекса.

Апробация и внедрение. Основные положения диссертации, отдельные её части, а также результаты исследования докладывались и обсуждались на: международной научно – практической конференции: «Энергетика – ключевая отрасль развития национальной экономики» Институт энергетики Таджикистана – Кушониён, 25 декабря 2023 года; международной научно – практической конференции: «Энергетика – ключевая отрасль развития национальной экономики» Институт энергетики Таджикистана – Кушониён, 20 апреля 2024 года; международной научно – практической конференции на тему: «Цифровая промышленность и развитие энергетики с точки зрения ученых и исследователей» – Душанбе, 20 декабря 2024 года; международной научно – практической конференции на тему: «Цифровая индустрия и развитие энергетики глазами ученых и исследователей» посвящённая празднованию Дня таджикской науки, а также объявленной на 2020 – 2040 годы – «Двадцатилетием изучения и развития естественных, точных и математических дисциплин в области науки и образования» – Кушониён, 25 апреля 2025 года; международной научной конференции молодых исследователей в области электротехники, автоматизации и систем управления ElCon 2026 (IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, IEEE Russia North West Section) – Санкт-Петербург, 3 – 5 февраля 2026 года (видеоконференция); научных семинарах кафедры «Электрические станции» Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими.

Публикации по теме диссертации. Основные положения и результаты диссертационного исследования нашли отражение в 12 печатных работах, из них: 5 научных статей – в изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК РТ и РФ, 1 статья – в издании, индексируемом в международных базах данных Scopus и IEEE, 5 публикаций – в материалах международных конференций, а также 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 180 страницах, состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложений. Текст исследования иллюстрирован 19 рисунками и содержит 13 таблиц. Библиографический список насчитывает 117 наименований. В диссертационную работу включено 5 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении приведены обоснование актуальности темы работы, цель и задачи исследования. Раскрыты научная новизна, используемая методология, теоретическая и практическая значимость, а также достоверность полученных результатов. Перечислены основные положения, выносимые на защиту, и отражена структура работы.

В первой главе «***Распространение высших гармоник тока и напряжений при несинусоидальных режимах***» проведены основные влияния ВГСТ и ВГСН на режимы работы ЭО и ЭП. Показано, что присутствие ВГСТ и ВГСН в ЭС отрицательно влияют на режимы работы ЭО и ЭП. Проблема заключается в том, что ЭО рассчитаны для работы на основной частоте (50 Гц), а ВГСТ и ВГСН имеют более высокие частоты, кратные основной (например, 150, 250, 350 Гц и т. д.). Данные токи приводят к дополнительной потере активной мощности в элементах сети, что способствуют увеличению температуры в

элементах сети и в конечном итоге приводят к снижению сроков службы элементов сети [2]. По мнению Карташева И.И. ВГСТ и ВГСН приводят к следующим негативным последствиям: «снижение эффективности процессов производства, при передаче, распределении и потреблении электрической энергии из-за дополнительных потерь мощности; ложная работа устройств релейной защиты и автоматики; функциональные нарушения, связанные с отказами, сокращением срока службы, выходом из строя электрооборудования, браком продукции и авариями; ускоренное старение изоляции электрооборудования; увеличение погрешности электроизмерительных приборов и помехи в сетях телемеханики» [2, 1 - А, 11- А].

Одной из негативных причин наличия ВГ в ЭЭС является вероятность возникновения резонанса на частотах ВГ. Как пишет Бессонов Л.А. в своей книге: «резонанс – это электромагнитные переходные процессы, появление которых влияет на показатели КЭЭ» [17]. Общие сведения о РЯ в ЭС и переменном токе приведены в [9-А, 10-А].

В ЭЭС резонанс используется для подавления ВГСТ с помощью пассивных фильтров. С другой стороны, данное явление может быть весьма разрушительным в энергосистемах, поэтому при проектировании и эксплуатации электрических сетей требуется особая осторожность, чтобы избежать возникновения резонанса на промышленной частоте (50 Гц). Следует отметить, что резонанс также может возникать на других частотах, если в сети существуют источники тока или напряжения высших гармоник. Возникновение резонанса приведет к перенапряжениям, которые могут вызвать перегрузку и повреждение электрооборудования. Электрический резонанс возникает в цепи, когда ёмкостное и индуктивное сопротивления (проводимости) равны друг-другу на определённой частоте. Бессонов Л.А. также отмечает, что «эта частота, которую также называют собственной частотой или резонансной частотой, определяется следующим выражением:

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

В зависимости от схемы соединения *RLC* – элементов существует два типа резонанса: последовательный и параллельный» [17]. В резонансных режимах значения ВГСТ или ВГСН имеют максимальное значения, превышающие нормативные значения в соответствии [1].

В качестве объекта исследования была выбрана южная часть ЭЭС РТ. Основной нагрузкой в ЭЭС РТ являются городские и сельские потребители, насосные станции (в основном в летний период), а также мощная нелинейная нагрузка на примере таджикской алюминиевой компании. Если раньше в составе коммунально-бытовой нагрузки в республике в основном существовали ЭП с линейной ВАХ, то сейчас состав нагрузки кардинально изменялся и в составе ЭП коммунально-бытового сектора активно внедрялись ЭП с нелинейными ВАХ. Понятно, что такие ЭП являются источниками ВГСТ, которые распространяясь в электрических сетях ухудшают КЭЭ по форме кривой напряжения.

До настоящего времени проблемами обеспечения КЭЭ в ЭС РТ занимались Назиров Х.Б. [15], Джуразода Ш.Дж. [16], Иноятов Б.Дж. [17], Камолов М.М. [18] и Амирханов А.С., Основные результаты работы перечисленных учёных в основном направлены на оценку КЭЭ, в частности несинусоидальности на элементах электрических сетей, анализа электромагнитной обстановки в ЭЭС РТ, оценки возможностей регулирования напряжения в узлах, обоснования методики выбора и размещения конденсаторных батарей на отдельных подстанциях (ПС) центральной части ЭЭС РТ, а также разработки мероприятий по обеспечению качества электроэнергии. Однако, при анализе НРР ЭЭС и выборе места и мощности компенсирующих устройств не учтена возможность возникновения резонанса. Результаты измерения и моделирования по

несинусоидальности формы кривой напряжения и сравнением с нормативным документом [1] приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Результаты измерения ПКЭЭ в ЭЭС РТ в разные годы

$U_{ном}$, кВ	ПКЭЭ, характеризующие не синусоидальности напряжения					
	K_U			$K_{U(n)}$		
	2011 [15]	2015 [16,17]	2022 [18]	2011 [15]	2015 [16,17]	2022 [18]
500 кВ	+	+		+	+	
220 кВ	+	+		+	–	
110 кВ	+	–	–	+	–	–
10 кВ	–	–	–	+	–	–
15,75 кВ	–	+		+	+	
380 В	–	–	–	+	–	–
220 В	–	–	–	+	–	–

+/ - Соответствует и не соответствует нормам ГОСТ 32144-2013.

Результаты таблицы показывают, что за исключением сети 500 кВ практически во всех классах напряжения наблюдается нарушение коэффициентов, характеризующих несинусоидальности формы кривой напряжении. При этом следует отметить, что вовремя измерений таджикская алюминиевая компания не работала на полную мощность (примерно 30 % – ов от полной мощности) [16] и вдобавок при реализации проекта CASA – 1000, в котором передача электроэнергии происходит на постоянном токе, уровень несинусоидальности может также возрасти в сетях напряжением 500 кВ. Поэтому должное внимание необходимо обратить внимание на распространение ВГСТ в ЭС различного класса напряжения. Учитывая сильный рост нелинейной нагрузки, в составе потребителей электрической энергии, и возможности возникновения резонанса в сети из-за наличия ВГСТ вопрос изучения НРР сети является актуальным [1-А, 6-А].

Нормы ВГ в ЭС в соответствии нормативным документом ГОСТ 32144-2013 определяются: «с помощью значений коэффициентов, характеризующих формы кривой напряжения K_U и $K_{U(n)}$. Коэффициенты, характеризующие формы кривой тока K_I и $K_{I(n)}$ в РТ не нормируются» [1], а в соответствии европейского стандарта [20] нормируются. Таким образом, значение коэффициента $K_{U(n)}$ показывает наличие помех в сети, значение коэффициента $K_{I(n)}$ – величины помех, генерируемый источников ВГ в сеть [10]. В соответствии с результатами измерений Смирнова С.С., проведенных в 1994 – 2004 г. в сетях Восточной Сибири [10] и в ЭС РТ в разные годы можно установить следующие свойства режимов ВГ: «значение $K_{U(n)}$ сильно изменяются в течение суток и её значения в фазах ЭС высокого напряжения (ВН) существенно отличаются между собой; во время коммутаций в ЭС значение $K_{U(n)}$ могут изменяться на широких диапазонах и при этом существенное увеличения значения $K_{U(n)}$ могут возникать в удалённых узлах сети от места коммутации; рост коэффициента $K_{U(n)}$ из-за подключения новой нелинейной нагрузкой зависит от места узла в сети; в сетях ВН проявляются волновые свойства протяженных ЛЭП, приводящие к значительному увеличению значений $K_{U(n)}$ в большом числе узлов сетей» [15–18, 2-А, 7-А].

Для расчёта и анализа режимов работы ЭС в основном используются активная, реактивная и полная мощности. При НРР ЭС наблюдается сложный процесс передачи мощности [4, 10]. На основе теории Смирнова С.С. «при несинусоидальных режимах полную мощность S можно выразить в комплексной форме:

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

где, $P_{(n)}$, $Q_{(n)}$ – соответственно активная и реактивная мощность гармоники порядка n; $D_{I(n)}$ и $D_{U(n)}$ – соответственно мощности искажений, обусловленные взаимодействием тока гармоники порядка n с напряжением основной гармоники и тока основной гармоники с напряжением гармоники порядка n; $D_{(i,j)}$ – мощность искажения, обусловленная взаимодействием тока гармоники порядка i с напряжением гармоники порядка j.

Из всех перечисленных слагающих для определения мощности искажений при несинусоидальных режимах, обусловленной взаимодействием тока основной гармоники с напряжением гармоники порядка n ($D_{U(n)}$) и взаимодействием тока гармоники порядка i с напряжением гармоники порядка j ($D_{(i,j)}$), также активная ($P_{(n)}$) и реактивная мощность ($Q_{(n)}$) гармоники порядка n (за исключением основной гармоники) имеют маленькие значения, так как в основном источники ВГ в ЭС генерируют ВГСТ, поэтому для оценки несинусоидальных режимов целесообразно применять только мощность искажения $D_{I(n)}$, возникающую в результате взаимодействия первой гармоники напряжения с n – й гармоникой тока» [10].

Таким образом, упрощённая формула мощностей при наличии ВГСТ в ЭС определяется следующем:

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

Векторная диаграмма мощностей при НРР ЭС приведена на рисунке 1.

В РТ ПКЭЭ в настоящее время регламентирует ГОСТ 3144 – 2013 [1].

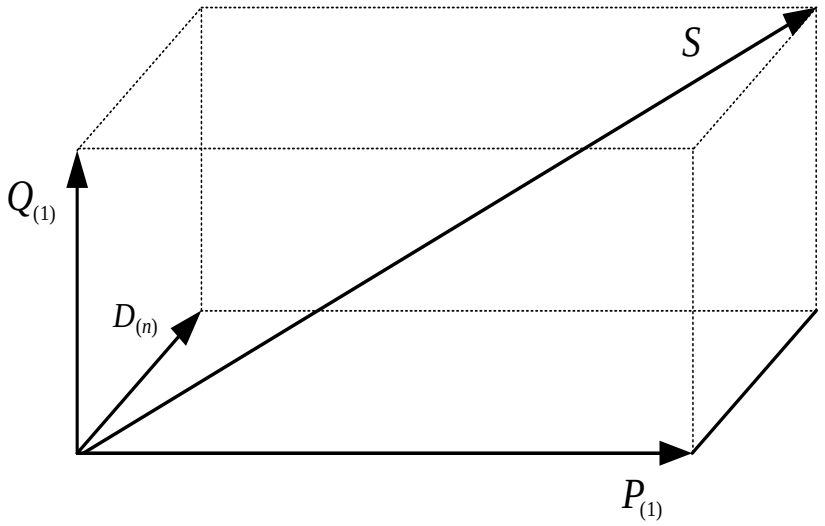


Рисунок 1. – Векторная диаграмма мощностей при НРР ЭС

В методиках проведения и анализа измерений ПКЭЭ определен порядок проведения измерений и их последующего анализа [21]. В ПКЭЭ входят коэффициенты K_U и $K_{U(n)}$. Для этих величин нормируются нормально допустимые и предельно допустимые значения в соответствии [1].

Для комплексной оценки НРР ЭС традиционные методы расчета активной и реактивной мощности недостаточны, поэтому целесообразно использовать мощности искажения, что позволяет корректно сопоставлять процессы в ЭС с разными номинальными напряжениями. Такой подход не изменяется при трансформации через идеальный трансформатор, что упрощает задачу нормирования помех от источников ВГ. Существующие математические подходы к выявлению РЯ в ЭС большой размерности остаются весьма трудоемкими. Требуется совершенствование алгоритмов и критериев

оценки распространения ВГСТ, с учетом фактора генерации мощности искажения, для точного прогнозирования резонансов во всем диапазоне частот.

Во второй главе «*Разработка математической модели электрических сетей Республики Таджикистан для расчета несинусоидальных режимов*» проведены основные методы расчета несинусоидальных режимов и обзор существующих методик. Понятно, что несинусоидальные режимы возникают только при наличии нелинейной нагрузки в ЭС. Нелинейные нагрузки при расчётах НРР ЭЭС, особенно при РР моделируются в следующих видах: «в виде источника тока n-ой гармоники J_n с внутренней проводимостью $Y_{внn}$, который параллельно подключен к проводимости контура коммутации $Y_{кn}$ в виде источника ЭДС E_n с внутренним сопротивлением $Z_{внn}$, который последовательно подключен к сопротивлению контура коммутации $Z_{кn}$» [6].

По результатам анализа статистических данных проведенное в начале 2000 – х доля нелинейных нагрузок составляла около 62,6 %, однако в связи с массовым внедрением светодиодного освещения, электромобильного транспорта и другие нелинейные нагрузки, этот показатель в развитых ЭЭС превысил 80 %, что требует пересмотра методов прогнозирования РЯ [4]. Результаты сравнения методы анализа РЯ в ЭС приведены на [3 - А].

Основные методы, которые используются в современной практике и исследовательских работах для расчёта НРР являются: метод гармонического баланса; динамическое моделирование во временной области; метод частотных характеристик; вейвлет-преобразование; методы на основе искусственного интеллекта и машинного обучения [1-А].

В соответствии [10] коэффициент $K_{U(n)}$ равен:

$$K_{U(n)} = \frac{100 \cdot U_{i(n)}}{U_{i(1)}} = \frac{\left|\dot{I}_{Gi(n)}\right|}{0,01 \cdot U_{i(1)} \cdot \left|\dot{Y}_{i(n)}\right|} \cdot \frac{U_{i(1)}}{U_{i(1)}} = \frac{\left|\dot{D}_{Gi(n)}\right|}{\left|\dot{D}_{Y(n)}\right|}, \qquad (3)$$

Формула (3) является зависимость коэффициента n-ой гармонического составляющая напряжения от мощностей искажения.

Формула (3) является зависимостью коэффициента n-ой гармонической составляющей напряжения от мощностей искажения.

Для расчёта и анализа НРР ЭЭС в настоящее время существуют множество программных обеспечений, такие как MATLAB/Simulink, ETAP (Electrical Transient Analyzer Program), DIgSILENT Power Factory, PSCAD/EMTDC, NEPLAN и другие программы. Наиболее часто используемые программы для анализа данного режима MATLAB/Simulink, ETAP и DIgSILENT. Из перечисленных программных обеспечений для расчёта и анализа НСР ЭЭС используем программы ETAP 19.0.1, так как данная программа имеют широкую библиотеку типовых спектров для различных типов нелинейных нагрузок и доступна для использования.

Для определения возможности возникновения резонансных явлений в электрический сетях, содержащих нелинейную нагрузку рассматриваем южная часть ЭЭС РТ, которая смоделирована в программном комплексе Etap [1-А]. Результаты моделирования сравниваются с расчётными данными, полученные с помощью следующей формулы:

$$\dot{Y}_{i(n)} = \sum_{j=1}^{m} \dot{Y}_{ij(n)}, \qquad (4)$$

где, $Y_{ij(n)}$ – проводимость ветви между узлами i и j.

Алгоритм сравнения результатов моделирования с расчетными данными приведен на рисунке 2. Если погрешность результатов моделирования с результатами модели не

превышает допустимого значения, тогда выполняется анализ полученных результатов. Относительная погрешность результатов моделирования для произвольного узла *i* определяется в соответствии со следующей формулой:

$$\delta_{\%} = \frac{Z_{\text{уз.расч.}} - Z_{\text{уз.модель}}}{Z_{\text{уз.расч.}}} \cdot 100\% \le 5\% \qquad (5)$$

где, $Z_{\text{уз.расч.}}$ – расчётное значение узлового сопротивления; $Z_{\text{уз.расч.}}$ – значение узлового сопротивления, полученное с модели.

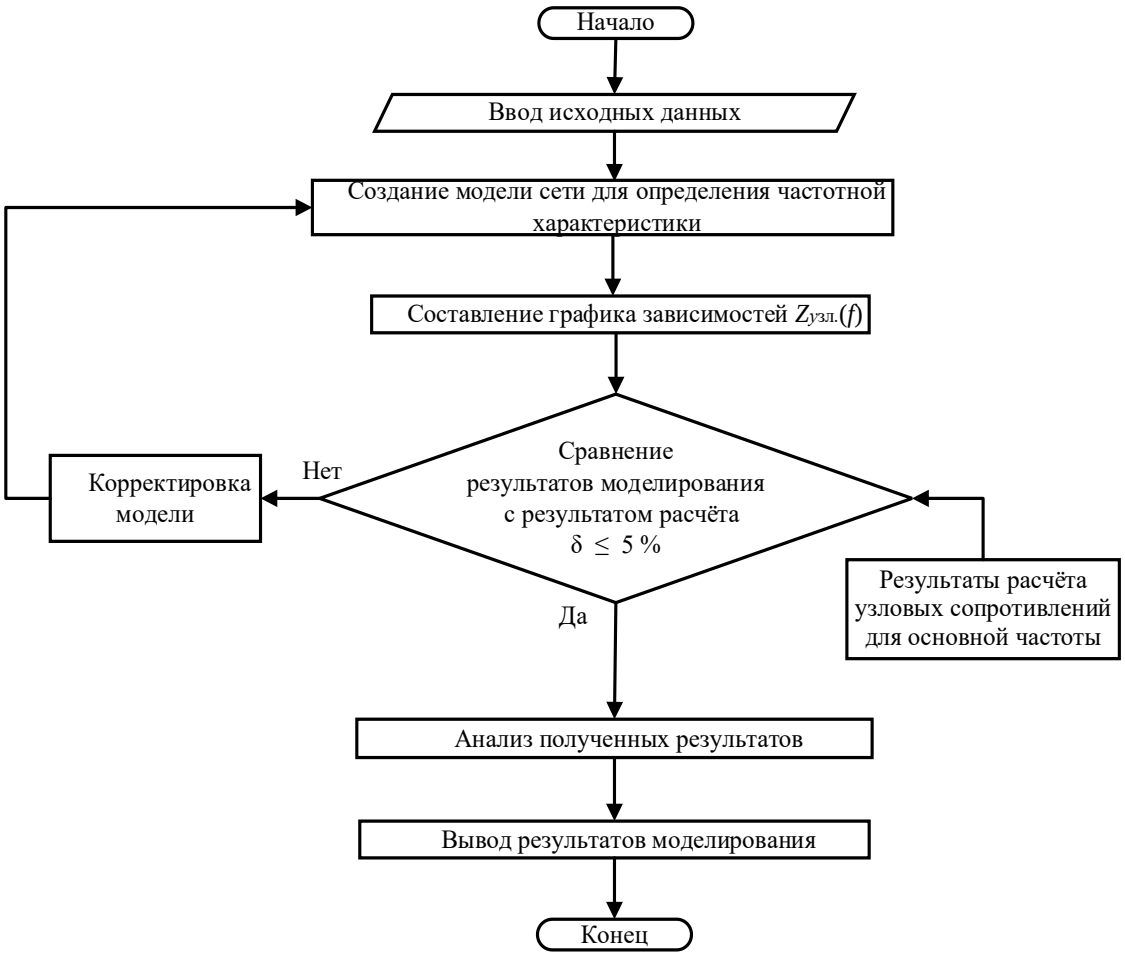


Рисунок 2. – Алгоритм сравнения результатов моделирования с расчётными данными

Узловое сопротивление определяется по следующему выражению:

$$Z_{i(n)} = \frac{1}{Y_{i(n)}}. \qquad (6)$$

Верификация результатов моделирования подтверждает подобие математической модели и адекватность определения узлового сопротивления. Результаты расчёта погрешности в узлах 500 кВ исследуемой сети приведены в таблице 2, а на рисунке 3 изображен график узловых сопротивлений на первой гармонике в сетях 500 кВ и 220 кВ.

Для исследуемой схемы построены АЧХ для характерных узлов схемы (рисунок 4 и 5).

Результаты расчётов и АЧХ показывают, что в нормальном режиме исследуемой схемы, узловое сопротивление в узле 5 на частоте 250 Гц (5-я гармоника) имеет существенное значение (6885 Ом). Это означает, что при наличии ВГСТ на этой или близкой

к ней частоте в узле 5 существует высокая вероятность возникновения резонанса (рисунок 4).

Таблица 2. – Относительная погрешность моделирования в ЭС 500 кВ

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



Рисунок 3. – График узловых сопротивлений на первой гармонике в ЭС напряжением 500 кВ и 220 кВ

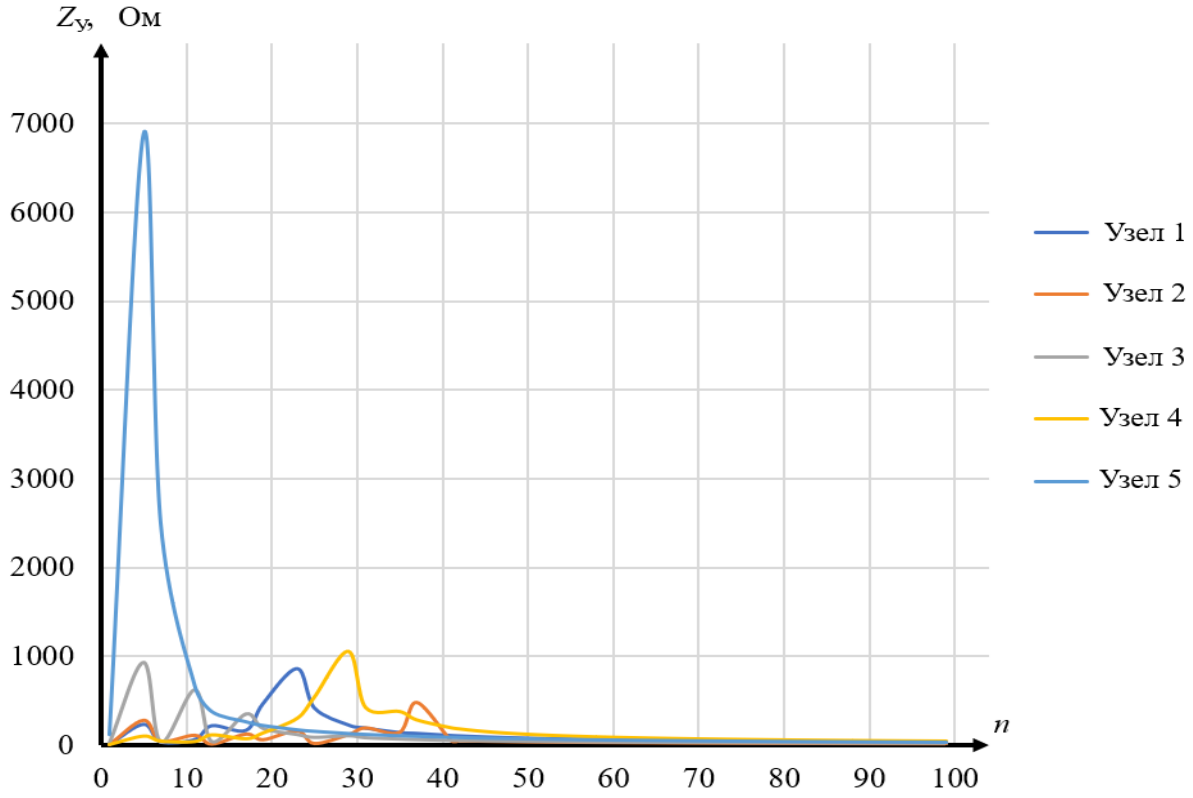


Рисунок 4. – АЧХ узлов 500 кВ исследуемой схемы в нормальном режиме

Собственное сопротивление в узле 10 (ПС »Шахринав») на частоте 3000 Гц (60-я гармоника) также существенно и составляет 26425 Ом. Однако в ЭС ВГСТ выше 40-го порядка (2000 Гц) практически отсутствуют или имеют незначительное значение (рисунок 5). В соответствии с нормативным документом [1], действующим на территории РТ, нормируются гармоники только до 40-го порядка. Поэтому для дальнейших исследований учитываются частоты лишь до 2000 Гц.

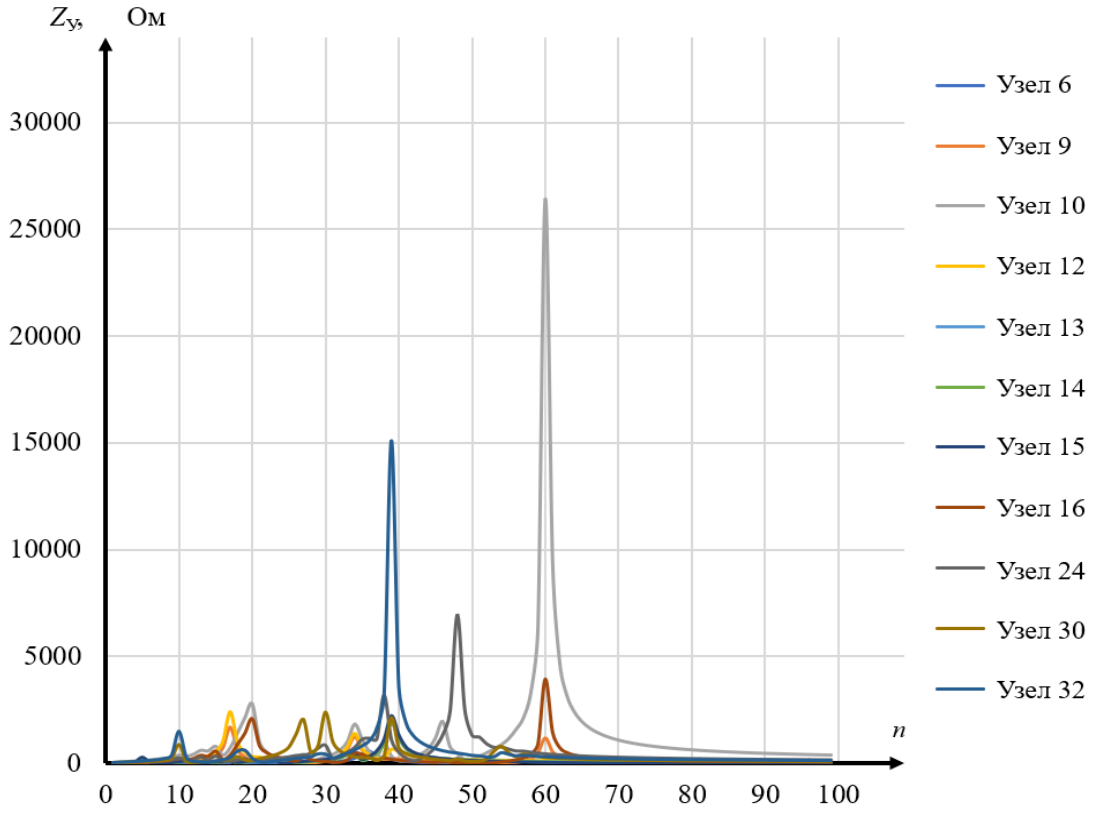


Рисунок 5. – АЧХ характерных узлов 220 кВ исследуемой схемы в нормальном режиме

Необходимо отметить, что в ЭС основными источниками ВГСТ являются потребители, генерирующие нечётные гармоники тока большой величины, в то время как чётные гармоники пренебрежимо малы. Также в высоковольтных сетях гармоники, кратные трём, имеют низкие значения: они в основном генерируются в сетях 0,4 кВ и не трансформируются выше при схеме соединения обмоток трансформаторов «звезда/треугольник». Следовательно, для дальнейшего анализа учитываются только нечётные гармоники, не кратные трём.

Собственное сопротивление в узле 32 (ПС »Камолот») на частоте 1950 Гц (39-я гармоника) составляет 15099 Ом (рисунок 5). Это указывает на то, что при наличии ВГСТ данной частоты падение напряжения будет значительным. Как было отмечено ранее, мощным источником высших гармоник в ЭЭС РТ является Таджикская алюминиевая компания [16], которая генерирует гармоники порядка $(6 \cdot n \pm 1)$. Исходя из этого, для дальнейшего исследования рассматривали только гармоники порядка 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35 и 37, характерные для такого типа нагрузки.

В третьей главе «*Развитие методики прогнозирования резонансных явлений в узлах электрических сетей*» рассмотрены существующие методы определения и анализа РЯ. Анализ существующих методов прогнозирования РЯ показывает, что ни один из подходов не является универсальным. Дальнейшее развитие методов прогнозирования

связано с интеграцией аналитических расчетов и технологий больших данных, что позволит минимизировать риски повреждения оборудования и повысить надежность электроснабжения в условиях энергетического перехода [8-А]. Также при прогнозировании резонанса необходимо учитывать нормативные значения ПКЭЭ. В связи с этим, критически важной задачей становится выбор и совершенствование методов прогнозирования РР на этапе проектирования и эксплуатации систем электроснабжения (СЭС). Конфигурацию схемы замещения электрической системы можно отобразить в виде графа. Подробно теория графов приведена в [22]. Для произвольного графа электрической сети возможно определить матрицу соединения ветвей в узлах (M_Σ) и матрицу соединений ветвей в независимых контурах (N), служащие для обобщенного аналитического представления граф.

С целью облегчения оценки явления резонанса в ЭС, примем отношение между узловым сопротивлением на резонансной частоте и сопротивлением на основной частоте, в качестве ПКВР на гармонике порядке n:

$$K_{\text{р}(n)} = \frac{Z_{\text{У}(n)}}{Z_{\text{У}(1)}} \tag{7}$$

здесь, $Z_{\text{У}(1)}$ – узловое сопротивление основной гармоники и $Z_{\text{У}(n)}$ – узловое сопротивление n – ой гармоники в нормальном режиме.

Для сравнения результатов расчёта ПКВР, необходимо определить его нормативное значение. Для этого, сначала требуется определить нормативные значения для каждой гармоники:

$$Z_{\text{У}(n)\text{доп}} = \frac{U_{(n)\text{доп}}}{I_{(n)\text{доп}}}. \tag{8}$$

здесь, $U_{(n)\text{доп}}$ – нормативное значение напряжения n – ой гармоники в соответствии [1]; $I_{(n)\text{доп}}$ – нормативное значение тока n – ой гармоники в соответствии [20].

С учётом равенства (7) определяем нормативное значение ПКВР на высших частотах:

$$K_{\text{р}(n)\text{доп}} = \frac{Z_{\text{У}(n)\text{доп}}}{Z_{\text{У}(1)}} \tag{9}$$

Нормативное значение n – ой гармонической составляющей тока в ЭС определяем в зависимости от максимальной передаваемой мощности и класса напряжения:

$$I_{(n)\text{доп}} = \frac{I_{\text{макс}(1)} \cdot K_{I(n)}}{100} = \frac{P_{\text{нат}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \cos\varphi_{\text{ном}}} \cdot \frac{K_{I(n)}}{100} \tag{10}$$

здесь, $I_{\text{макс}(1)}$ – максимальное значение тока первой гармоники линии электропередачи, которое определяется в зависимости от натуральной передаваемой мощности ЛЭП ($P_{\text{нат}}$) или номинальной мощности ЭО ($P_{\text{ном}}$); $K_{I(n)}$ – допустимое значение коэффициентов n – ой гармонической составляющей тока в ЭС; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение сети.

В соответствии с предложенным подходом, резонанс возникает, при наличии ВГСТ, если выполняется следующее условие:

$$K_{\text{р}(n)\text{доп}} < K_{\text{р}(n)} \tag{11}$$

Если в исследуемой сети имеется источники ВГ на частотах, при которых возможен резонанс, величины ВГСТ и ВГСН достигают больших значений, что может привести выходу из строя элементов сети [2].

На основе предложенной методики разработаны алгоритм и программа для расчёта и анализа резонансных явлений в электрических сетях [12-А]. Алгоритм приводятся на рисунке 6, где следующая последовательность работ:

1. В произвольной электрической сети определяется количество узлов, элементов и конфигурация сети. Далее составляется схема замещения исследуемой сети и определяются параметры схемы замещения для основной и высших частот. На основе схемы замещения составляются матрицы M_Σ и N, а также основные матрицы схем замещения. После чего составленные матрицы проверяются на правильность по следующими условиями:

$$M_б = -n_t \cdot M \tag{12}$$

$$N \cdot M^T = 0 \tag{13}$$

здесь, $M_б$ – матрица соединений для балансирующего узла; M – матрица соединений для схемы без балансирующего узла, n_t – строковая единичная матрица и M^T – транспонированная матрица M).

2. Если условия (12) и (13) не выполняются, необходимо скорректировать электрическую схему сети и заново проверяется правильность составленных матриц M и N. При выполнении условий (12) и (13) для исследуемой схемы составляются основные матрицы схем замещения.

3. Составляется графики зависимостей узловых проводимостей и сопротивлений от частоты.

4. Производится оценка возможности возникновения резонансных явлений в исследуемой сети в соответствии условии (11). При выполнении условия (11) применяются способы устранения резонансных явлений в электрических сетях и расчёт алгоритма заново повторяется.

5. При невыполнении условия (11) рассматриваются возможности возникновения аварийных случаев в исследуемой схеме и изменении конфигурации схемы (отключение или включение элементов электрической сети) из-за этого. При изменении конфигурации схемы, расчёт по алгоритму заново повторяется, а в противном случае расчёт заканчивается.

На основе предложенного алгоритма была разработана программа для ЭВМ «Программа для анализа и определения узлов в ЭЭС, где возможны резонансные явления» (регистрационный номер программы для ЭВМ в «Реестре программ для ЭВМ» №2025685699, 25 сентября 2025 г.), которая определяет вероятности возникновения резонанса в электрических сетях [12 - А].

В качестве примера приводим результаты прогнозирования возможности возникновения резонанса в южной части ЭЭС РТ по разработанной программе. Граф исследуемой части ЭЭС РТ приведён на рисунке 7.

Для рассматриваемой схемы (рисунок 7.) построены АЧХ для характерных узлов схемы (рисунки 8 и 9).

В соответствии с таблицей 3, в нормальном режиме наблюдается следующая картина: в узле 1 вероятность возникновения резонанса существует на гармонике порядка 19, так как значения ПКВР превышает допустимое значение (составляет 35 при норме 29); в узле 2 вероятность возникновения резонанса не обнаружена; в узле 3 вероятность возникновения резонанса выявлена для ВГ порядка 5; в узле 4 – для гармоник 5, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35 и 37; и наконец в узле 5 для гармоник 5, 7, 11 и 13.

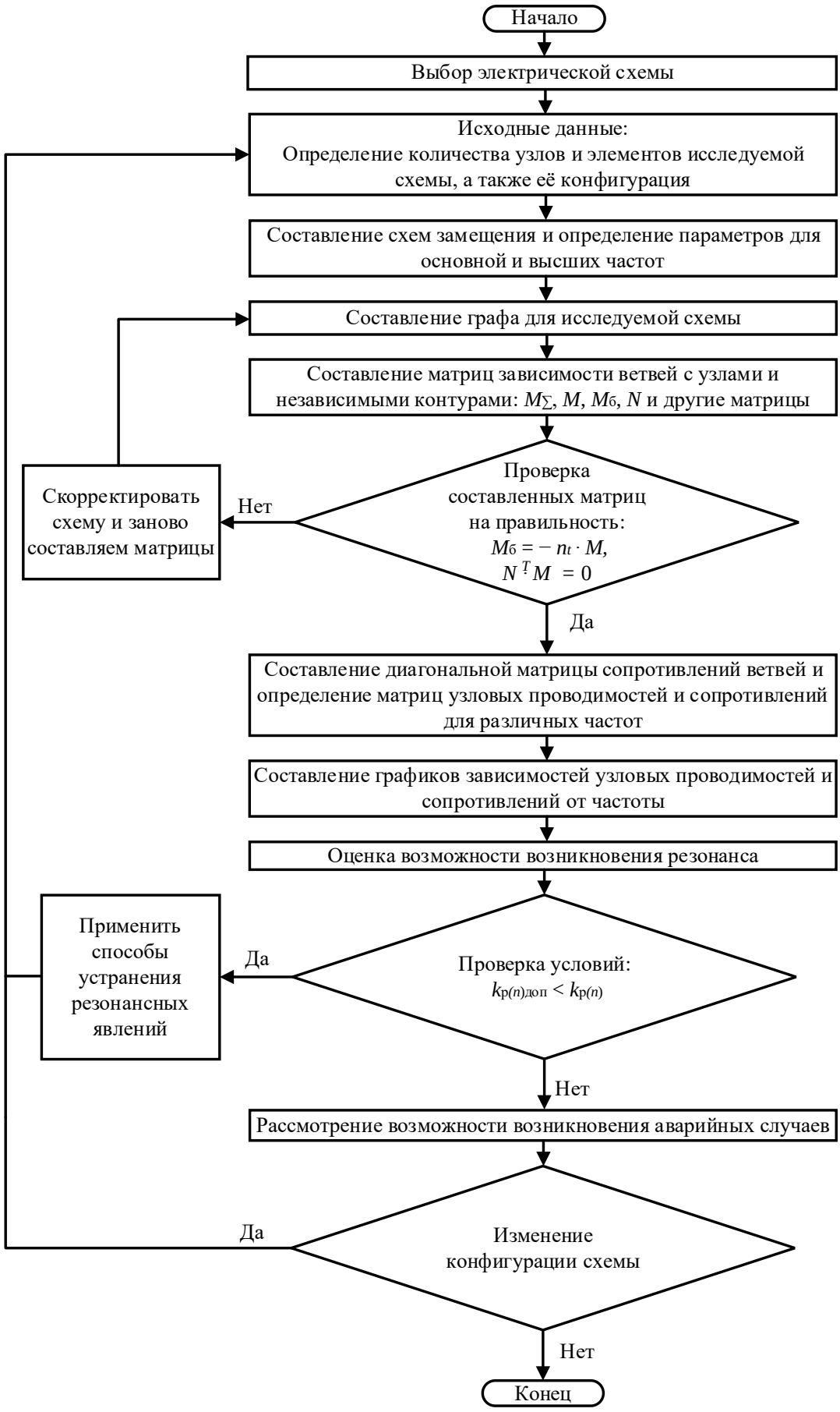
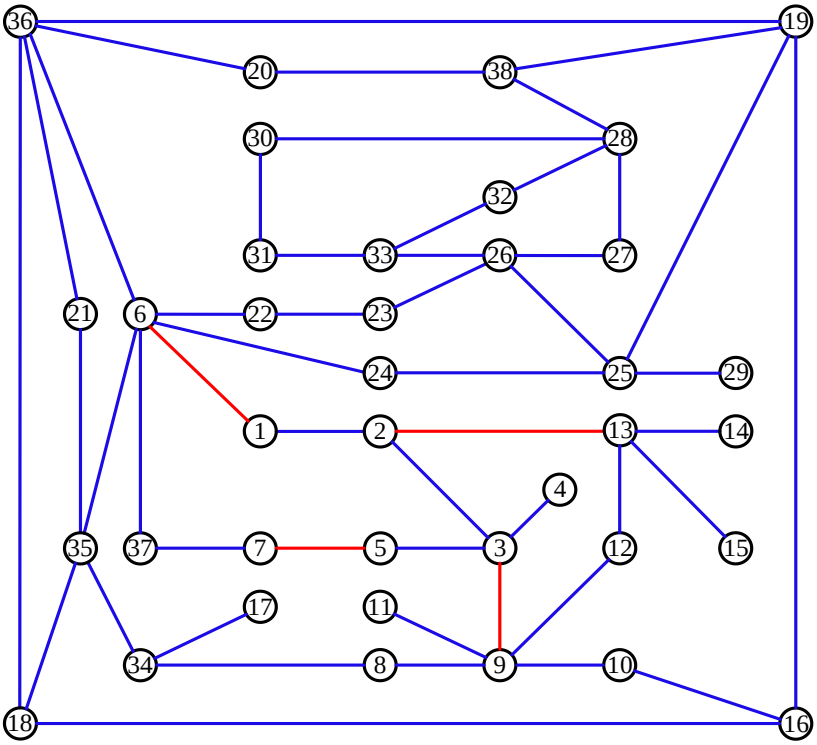


Рисунок 6. – Алгоритм определения возможности возникновения резонансных явлений в электрических сетях



Линиями красного цвета показаны автотрансформаторы, а линиями синего цвета – линии электропередачи

Рисунок 7. – Граф исследуемой части ЭЭС РТ

Таблица 3. – Допустимые и расчетные значения ПКВР в нормальном и послеаварийном (отключение одной цепи линии 1-2) режимах для узлов 1 – 5

Режимы работы	Узлы	Гармоники											
		5	7	11	13	17	19	23	25	29	31	35	37
Нормальный режим	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
Отключение одной цепи линии 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
Допустимое значение ПКВР $K_{р(n)доп}$, о.е.	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

В соответствии с уравнениями (7) – (9) определены ПКВР и проведена проверка по условию (11). Рузультаты расчётов для узлов 1 – 5 приведены в таблице 3. Серым цветом в таблице выделены значения ПКВР на тех гармониках, где существует возможность возникновения резонанса (превышение допустимого значения согласно условию (11)). Для остальных узлов значения ПКВР определяются аналогично в соответствии с предложенным алгоритмом.

Для полноценной оценки рассматриваются также послеаварийные режимы работы исследуемой схемы, возникающие при изменении конфигурации (отключении одной из

цепей линии электропередачи 1 – 2). Графики для послеаварийного (ПАВ) режима приведены на рисунках 8 и 9.

Как видно из графиков рисунках 8 и 9, а также из таблицы 3, при отключении одной цепи линии 1 – 2 в исследуемой электрической схеме, граф, которого приведён на рисунке 7, узлы 4 и 5 являются наиболее чувствительными по сравнению с другими узлами. ПКВР в этом режиме принимают следующие значения: в узле 1, для гармоник порядка 19, 25 и 29 соответственно $K_{р(19)} = 37$, $K_{р(25)} = 123$ и $K_{р(29)} = 265$; в узле 2, для гармоник порядка 7 и 19 соответственно $K_{р(7)} = 49$ и $K_{р(19)} = 62$; в узле 3 для гармоник порядка 17 и 19 соответственно $K_{р(17)} = 42$ и $K_{р(19)} = 21$, также в данном режиме значения ПКВР превышают допустимые пределы в узле 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 $K_{р(37)} = 52$) и в узле 5 ($K_{р(5)} = 1$; $K_{р(7)} = 7$; $K_{р(11)} = 19$; $K_{р(13)} = 4$ и $K_{р(17)} = 4$). Перечисленные факторы означают, что в рассматриваемых узлах существует вероятность возникновения резонанса на указанных гармониках.

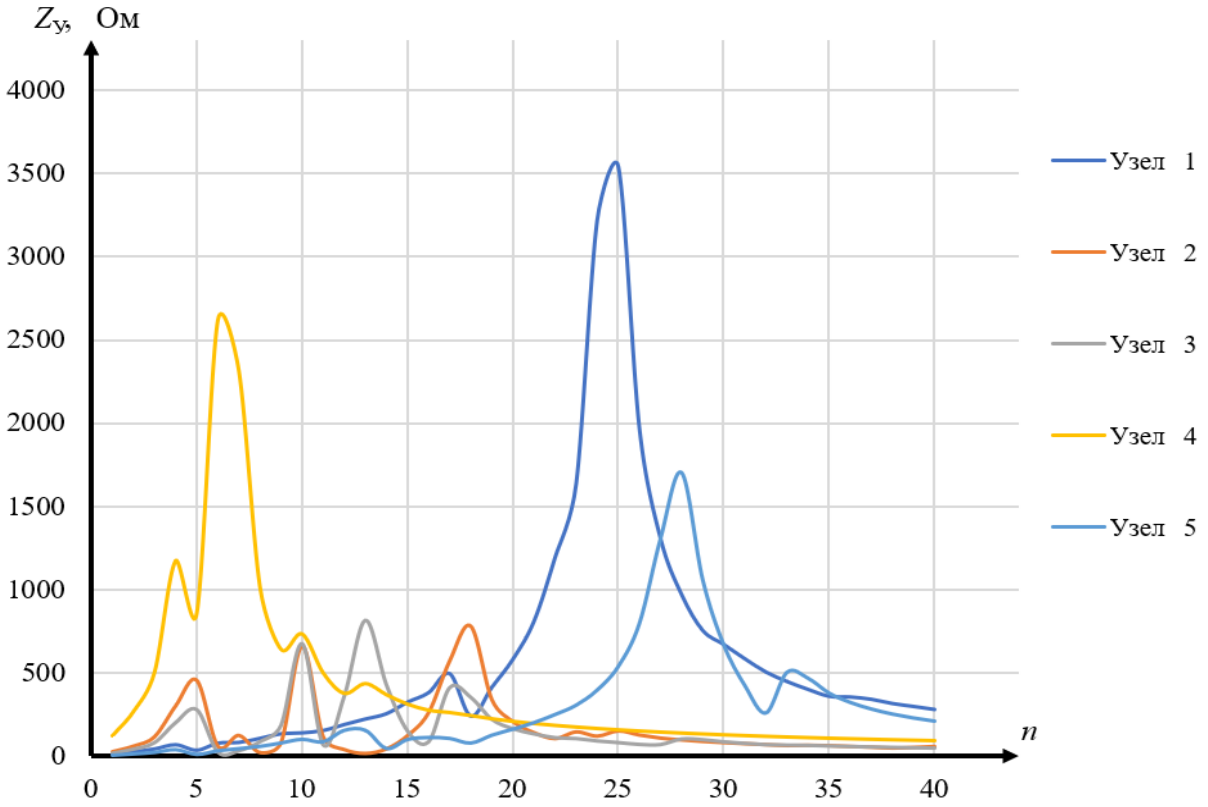


Рисунок 8. – АЧХ узлов 500 кВ исследуемой схемы в послеаварийном режиме (отключение одной цепи линии 1 – 2)

Предлагаемый метод имеет следующие приемущества по сравнению с традиционными существующими методами: расчет относительного безразмерного коэффициента $K_р = Z_{(n)}/Z_{(1)}$; строгое выполнение условия $K_р > K_{р.доп.}$; учет натуральной мощности ($P_{нат}$) и допустимой загрузки элементов сети с помощью тока основной гармоники; автоматизированный проверочный расчет по четкому критерию (допустимый/не допустимый).

Автор предлагает при проектировании и эксплуатации электрических сетей учитывать возможность возникновения РЯ для нормализации КЭЭ. Для оценки вероятности возникновения резонанса в ЭС, с учётом всех возможных вариантов режимов их работы, предложенный подход позволяет получить необходимые решения.

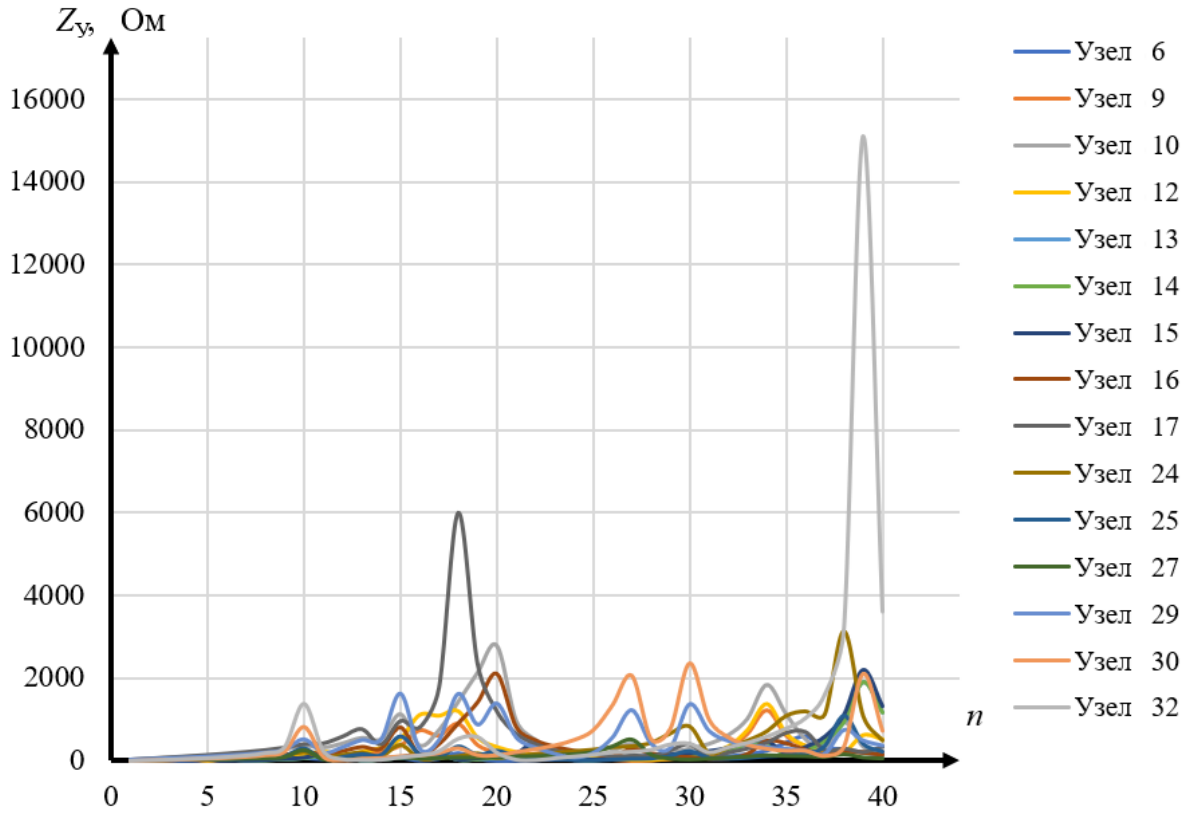


Рисунок 9. – АЧХ характерных узлов 220 кВ исследуемой схемы в послеаварийном режиме (отключение одной цепи линии 1 – 2)

В четвертой главе «*Резонансное явление и предотвращение его рисков при многокритериальной оптимизации размещения компенсирующих устройств с использованием метаэвристических алгоритмов*» предложен метод оптимизации для размещения компенсирующих устройств (КУ) в ЭС с учётом возможности возникновения резонанса. Выбор метода оптимизации для размещения КУ определяется с учётом математической сложностью данной задачи. В условиях современных ЭЭС данная задача является нелинейной, многокритериальной и имеет дискретно-непрерывный характер. Традиционные методы оптимизации размещения КУ обычно используются для минимизации потерь активной мощности и поддержании уровней напряжения. Если при оптимизации учитываем резонанс как фактор ограничений, то структура целевой функции сильно меняется. В таком случае традиционные методы не всегда даёт желаемые результаты. Для оптимизационных задач в ЭЭС сейчас широко используют метаэвристическиех методы [23]. Основные преимущества метаэвристических методов по сравнению с классическими методами является в том, что они обладают механизмами выхода из локальных экстремумов (стохастический поиск), легко работают с дискретными (номера узлов) и целочисленными данными, случайная инициализация популяции обеспечивает широкое покрытие пространства поиска и другие. Сравнение метаэвристических методов с традиционными методами приведены на [5-А]. Таким образом, можно сделать вывод, что метаэвристические алгоритмы, такие как МРЧ (PSO), МСВ (GWO), МРС (SSA) и др. обладают рядом достоинств по сравнению с традиционными методами.

Основное отличие предлагаемого метода, по сравнению существующими методами, заключается в том, что значение ПКВР, методика расчета которого подробно описана в третьей главе диссертации и в [4-А], интегрируется непосредственно в итерационный процесс метаэвристического поиска. При этом в классических методах установка КУ рассматривается только для компенсации реактивной мощности на основной частоте, а

метаэвристические алгоритмы позволяют проводить «частотное сканирование» каждого потенциального решения и гарантирует что выбранная точка установки КУ не приведет к условиям возникновения резонанса (11).

Для проверки рассмотрим отличие между алгоритмами МРЧ, МСВ и МРС. Алгоритм МРЧ имитирует движение стаи птиц. Основным недостатком является высокая инерционность, из-за которой частицы часто «пролетают» мимо узких зон безопасности между резонансными пиками. Алгоритм МСВ имитирует иерархию охоты волков. Данный алгоритм лучше МРЧ, однако из-за сильного влияния трех лидеров (альфа (α), бета (β), дельта (δ)) может преждевременно сходиться, при этом игнорируя потенциально лучшие узлы сети. Алгоритм МРС является наиболее эффективным по следующим причинам: даёт высокую точность с учётом ограничений по ПКВР, наименьшая настройки параметров при расчёте и стабильная сходимость результата [5-А]. Поэтому можно сделать вывод, что МРЧ часто предлагает недопустимые решения, так как его вектор скорости не учитывает резкую границу резонанса, МСВ сужает поиск вокруг лидеров, и если α -волк оказался в локально удачном, но близком к резонансу месте, весь стая застревает там, МРС имитируя цепочку, сохраняет гибкость, даже если лидер приблизился к границе резонанса, последователи за счет усреднения позиций остаются в безопасной зоне, позволяя алгоритму исследовать соседние узлы. Далее рассмотрим диаграмма сходимости алгоритмов оптимизации МРЧ, МСВ и МРС.

В соответствии с диаграммой сходимости алгоритмов оптимизации (рисунок 10) видно, что самым лучшим алгоритмом по сходимости является алгоритм МРС, поэтому в дальнейшем используем данный алгоритм.

Алгоритм метода роя сальп (АМРС) является современный метаэвристический оптимизационный алгоритм, который имитирует социальное поведение сальп (морских беспозвоночных) во-время поиска пищи в океане. Биологическое обоснование данного алгоритма заключается в том, что сальпы образуют длинные цепи, в которой цепочке выделяют две группы особей: лидер (первая сальпа, которая направляет рой к источнику пищи) и последователи (все остальные сальпы, которые следуют друг за другом, поддерживая связность цепи). Целью данного алгоритма является нахождение глобального оптимума (источник пищи) в многомерном пространстве поиска.

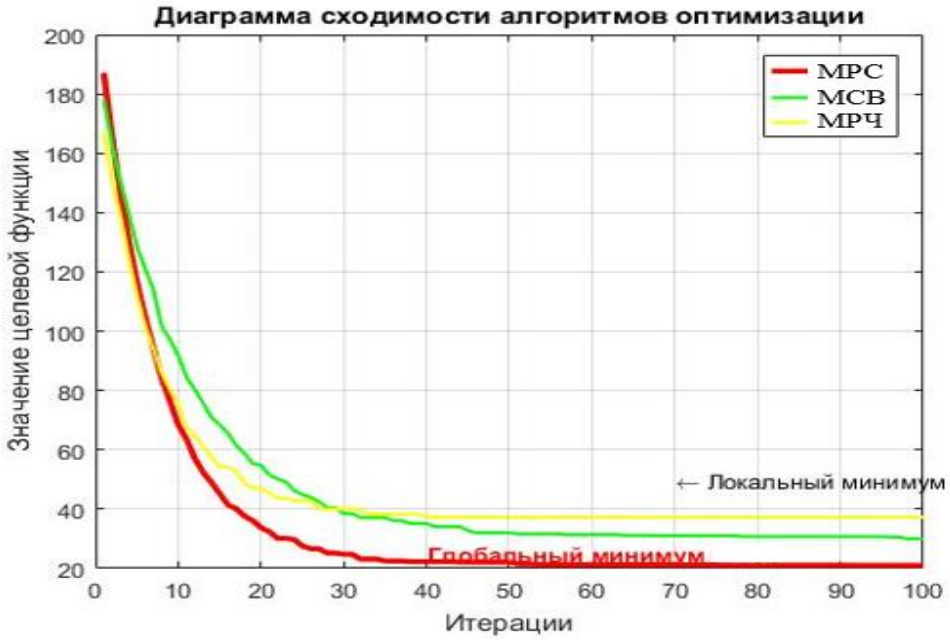


Рисунок 10. – Диаграмма сходимости алгоритмов оптимизации МРЧ, МСВ и МРС

Математической моделью данного алгоритма является следующее: на первом шаге задаются начальные значения, то есть количество агентов (сальп) (*N*), количество итераций

(T), границы поиска (lb, ub) и целевая функция $f(x)$; на втором шаге создается начальная популяция, то есть задаётся координаты сальп случайным образом в заданном пространстве:

$$X_i = rand\left(0,1\right)\cdot\left(ub - lb\right) + lb. \tag{14}$$

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

где, d – размерность задачи (количество узлов схемы).

Далее на третьем шаге для каждой сальпы вычисляется значение целевой функции, после чего сальпа с наилучшим результатом назначается лидером «источника пищи» (F). На четвёртом шаге обновляется позиция лидера, которая определяется по следующим выражениям:

$$x_j^1 = \begin{cases} F_j + c_1\left(\left(ub_j - lb_j\right)\cdot c_2 + lb_j\right), & \text{если}\ \ c_3 \geq 0,5, \\ F_j - c_1\left(\left(ub_j - lb_j\right)\cdot c_2 + lb_j\right), & \text{если}\ \ c_3 < 0,5. \end{cases} \tag{15}$$

где, x_j^1 – координата лидера по j – му измерению;

F_j – — координата источника пищи;

c_2, c_3 – случайные числа, которые колеблются в пределах от 0 до 1;

c_1 – параметр, который уменьшается с итерациями для перехода от глобального поиска к локальному:

$$c_1 = 2\cdot e^{-\left(\frac{\Delta t}{T}\right)^2}, \tag{16}$$

где, t – текущая итерация, T – максимум итераций.

Далее на пятом шаге итераций обновляется позиция последователей по формуле:

$$x_j^i = \frac{1}{2}\cdot\left(x_j^i + x_j^{i-1}\right), \qquad i \geq 2. \tag{17}$$

Рассмотрим применение АРС в задачах электроэнергетики, именно для оптимизации места установки компенсирующих устройств (КУ) с учётом вероятности возникновения резонанса в электрических сетях. Блок-схема алгоритма приведена на рисунке 11. Последовательность алгоритма следующая:

1. Ввод параметров исследуемой сети, такие как матрицы соединений M и N в соответствии (12) и (13), также параметры элементов исследуемой сети. Расчет установившегося режима исследуемой сети и определение уровня напряжения и потери мощности без учёта КУ;

2. Целевые функции: минимизация потерь в электрических сетях; нормализации уровня напряжения в узлах схемы, также учёт резонансных ограничений в виде штрафной функции по условию (11);

3. Генерация начального роя сальп: случайное распределение КУ по узлам;

4. Проверка уровня напряжения в узлах по критерию:

$$0,9\cdot U_{\text{ном}} \leq U_i \leq 1,1\cdot U_{\text{ном}}, \quad i\text{ –номер узла.} \tag{18}$$

5. Расчёт и проверка потерь активной мощности ΔP;

6. Проверка на возможности возникновения резонанса в соответствии условии (11);

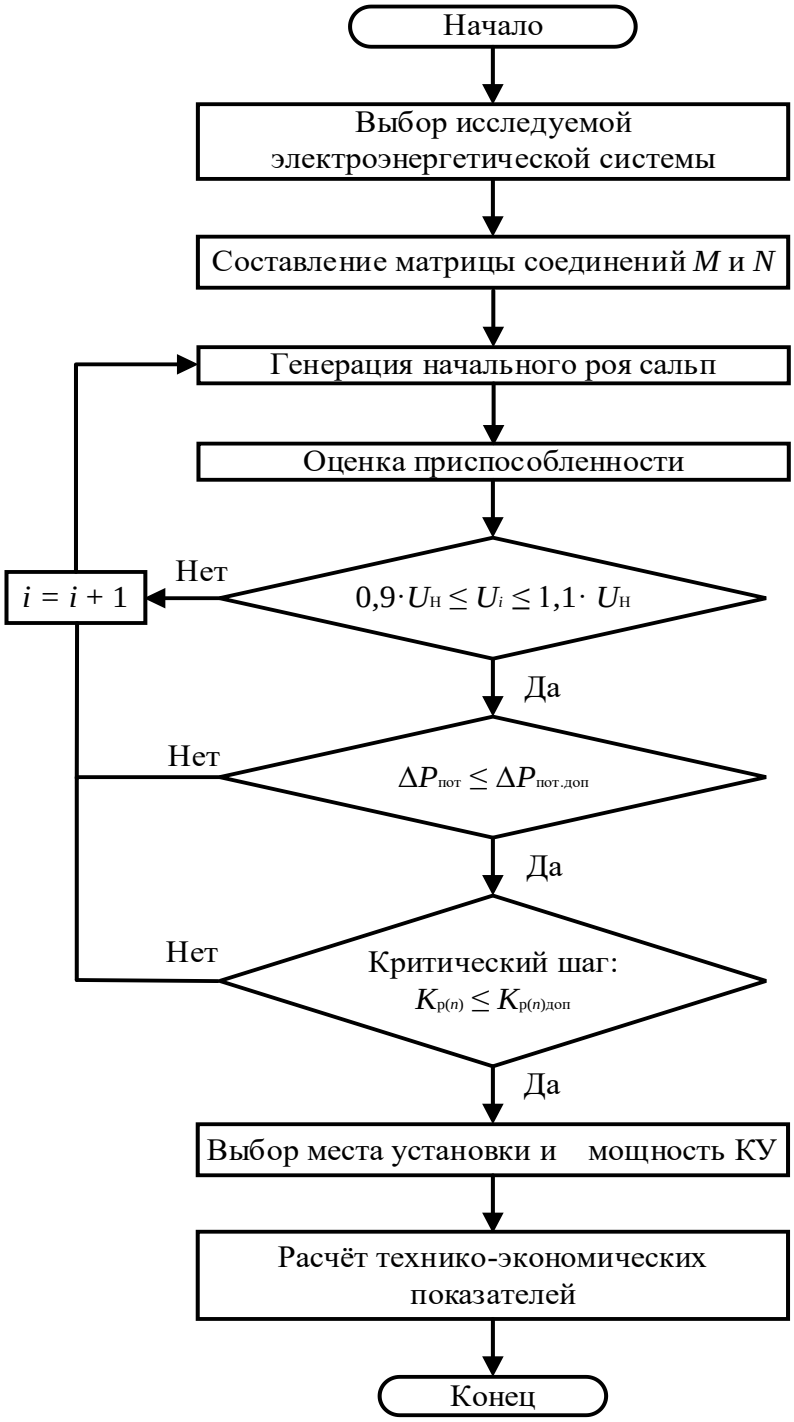


Рисунок 11. – Блок-схема алгоритма МРС для выбора места установки КУ

7. Для определения критического шага необходимо выполнить:

7.1. Построение АЧХ на основе предложенного метода и определение значения ПКВР для каждой гармоники порядка $6 \cdot n \pm 1$, генерируемых нелинейной нагрузкой;

7.2. Обновление лучшего решения (F). Выбор сальпы с минимальными потерями и выполнении условия (18) среди тех, у которых нет риска резонанса, при невыполнении условии (11);

8. Обновление позиций, то есть корректировка положений лидера и всей цепочки сальп ($i = i + 1$) и конец алгоритма.

Рассмотрим в качестве примера южную часть ЭЭС РТ, граф, которой приведен на рисунке 7. Для обеспечения КЭЭ по уровню коэффициентов несинусоидальности по напряжения (K_U и $K_{U(n)}$) в рассматриваемой схемы с учётом возможности возникновения

резонанса используем алгоритма МРС. Исходные данные следующие: размерность задачи d = 38 узлов (поиск оптимального узла для установки КУ); количества сальп N = 30; максимальное число итерации T = 100 и целевая функция – нормализация уровня напряжения в узлах, коэффициентов: K_U и $K_{U(n)}$ и минимизация потерь.

Результаты итерационного процесса представлены в таблице 4. Результаты расчётов показывают, что на 25-й итерации сальпы находят оптимальное место установки и мощность КУ, при этом все условии выполняются. Сравнение результатов расчёта в исходном состояние и после оптимизации представлены на таблице 5.

Таблица 4. – Результаты итерационного процесса алгоритма МРС

Итерация	Лидер роя (X^1)	Проверка по условии (11)	Результат
1	Узел 10, $Q_{КУ}$ = 50 МВАр	Невыполнение условии в узле 5	Лидер перемещается к следующему положению
25	Узел 4, $Q_{КУ}$ = 25 МВАр	Выполнение условии во всех узлах	Сальпы подтягиваются к узлу 4, сужая область поиска в его окрестности
100	Узел 4, $Q_{КУ}$ = 25 МВАр	Выполнение условии во всех узлах	Коэффициент c_1 стремится к нулю, фиксируя положения роя в глобальном оптимуме

Таблица 5. – Сравнение результатов расчёта в исходном состояние и после оптимизации

Параметр	Исходное состояние (без КУ)	После оптимизации МРС (с КУ)
Оптимальный узел установки	–	Узел 4
Мощность КУ ($Q_{КУ}$), МВАр	0	25
Потери мощности (ΔP), МВт	14,2	11,8
Максимальное значение $K_{p(n)}$ (узел 5)	0,88	0,76
Напряжение в критическом узле, о.е.	0,945	0,991

График изменения коэффициента K_U при оптимизационном процессе представлен на рисунке 12.

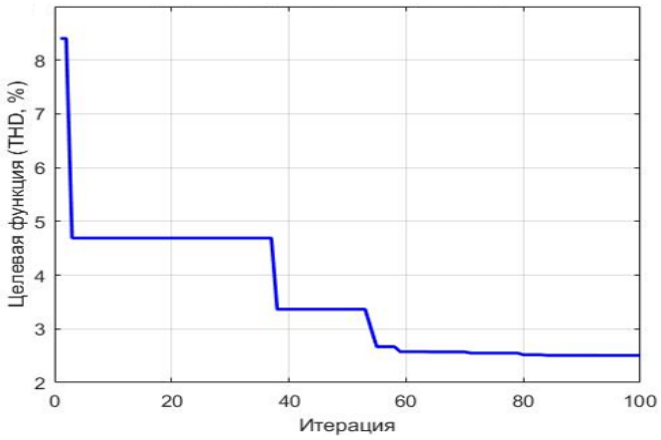


Рисунок 12. – Изменение значения коэффициента K_U при использовании МРС

Результаты расчётов подтверждают эффективность алгоритма использования МРС для многокритериальной оптимизации размещения компенсирующих устройств с учетом рисков возникновения резонанса и даёт положительный результат. По таблицам 4, 5 и графика рисунка 12 видно, что на 56 шаге итерационного процесса, все условии выполняются и алгоритм даёт желаемый результат.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

В диссертационной работе получено решение актуальной научно-технической задачи – усовершенствована методика прогнозирования и предотвращения резонансных явлений в сложных электрических сетях, содержащих мощные источники высших гармоник, что имеет существенное значение для повышения надежности, экономичности и качества функционирования электроэнергетических систем.

Общие выводы:

1. Теоретически обоснован и разработан ПКВР. Переход от качественного (визуального) анализа графиков АЧХ к строгой количественной оценке позволил формализовать риск резонанса через отношение собственного сопротивления узла на частоте *n* – й гармоники к сопротивлению на основной частоте. Сформулировано строгое математическое условие существования опасного резонанса ($K_р \geq K_{р.доп.}$), увязанное с нормативными требованиями к качеству электроэнергии [1-А, 3-А, 4-А, 6-А, 7-А, 9-А].

2. Создан алгоритм автоматизированного выявления резонансных зон. Разработанный алгоритм позволяет на основе матриц узловых проводимостей автоматически сканировать частотные характеристики сети произвольной топологии. Разработанное программное обеспечение (Свидетельство о гос. регистрации №2025685699) позволяет эффективно выявлять критические узлы, наиболее склонные к параллельному резонансу при изменении схемы или состава нелинейных нагрузок [4-А, 6-А, 12-А].

3. Проведен комплексный анализ несинусоидальных режимов магистральной сети Южной ЭЭС Республики Таджикистан. На базе верифицированных моделей в ПК ETAP 19.0.1 и с использованием реальных параметров сети 220–500 кВ, а также спектра гармоник электролизного производства ГУП «ТАЛКО», построены АЧХ для критических узлов. Выявлено, что наибольшую опасность представляют гармоники с 5-й по 37-ю, а относительная погрешность численного моделирования по сравнению с аналитическими расчетами не превысила 4,54 %, что подтверждает высокую адекватность моделей [1-А, 3 - А, 12-А].

4. Разработан метод многокритериальной оптимизации КУ с обходом резонансных зон. Доказано, что традиционные методы размещения компенсирующих устройств без учета АЧХ сети могут смещать частоту системы в область резонанса с гармониками нагрузки. Предложен метод, в котором коэффициент ПКВР внедрен в итерационный поиск в качестве динамической штрафной функции. Это гарантирует, что оптимизированный режим будет находиться вне зон частотного резонанса [5-А, 6-А, 12-А].

5. Обоснована высокая эффективность алгоритма роя сальп (АРС). В ходе сравнительного анализа современных метаэвристических методов (метод роя частиц, метод серых волков, метод роя сальп) установлено, что АРС обладает наилучшей скоростью сходимости (фиксация глобального оптимума достигнута на 25-й итерации), высокой устойчивостью к попаданию в локальные экстремумы и требует минимального числа настраиваемых параметров при решении задач многокритериальной оптимизации в электрических сетях [5-А, 12-А].

6. Подтвержден значительный технико-экономический эффект от внедрения разработанной методики. Апробация предложенного метода АРС на модели Южной энергосистемы Таджикистана показала, что оптимальная установка КУ мощностью 25 МВАр в узле 4 обеспечивает комплексный эффект: снижение потерь активной мощности в сети с 14,2 МВт до 11,8 МВт (на 16,9%), стабилизацию напряжения в критической точке с 0,945 о.е. до нормативных 0,991 о.е., и одновременное снижение максимального индекса риска резонанса в уязвимом узле 5 с опасного уровня 0,88 до безопасного значения 0,76 [5 - А].

Рекомендации по практическому использованию

Разработанные в ходе исследования методики, математические модели и программное обеспечение «Программа для анализа и определения узлов в электроэнергетической системе, где возможны резонансные явления» [12-А],

предназначенные для прогнозирования резонансных явлений в электрических сетях с нелинейной нагрузкой, могут быть использованы проектными организациями при разработке мероприятий по обеспечению качества электрической энергии, а также для выявления уязвимых и чувствительных узлов электрических сетей при изменении их структуры и режимов работы.

Разработанный метод многокритериальной оптимизации места установки и мощности компенсирующих устройств (БСК) с использованием алгоритма роя сальп [5-А], в котором значение ПКВР интегрировано в итерационный процесс поиска в качестве штрафной функции [4-А], позволяет диспетчерским службам и проектным организациям обоснованно выбирать точки подключения БСК для гарантированного обхода резонансных зон, нормализации уровня напряжения и снижения потерь активной мощности в ЭС.

Полученные результаты по оптимизации и прогнозированию резонансных режимов, разработанные математические модели и алгоритмы [4-А, 5-А, 12-А] могут быть использованы в ОАО «Барки Точик» и энергосетях при управлении режимами работы ЭС, содержащих нелинейные нагрузки, для предотвращения аварийных ситуаций, связанных с ростом ВГСН, а также при дальнейшем развитии энергосистемы Республики Таджикистан.

Разработанные в результате проведенного исследования математические модели, алгоритмы и программное обеспечение [12-А] внедрены в учебный процесс Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими, Института энергетики Таджикистана и Филиала НИУ «МЭИ» в г. Душанбе и используются при изучении дисциплин «Математические задачи в электроэнергетике» и «Электромагнитная совместимость», а также при выполнении научных работ магистрантов и докторантов PhD.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014, 16 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.

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

18. Иноятов Б.Д. Разработка методики оценки состояния электрооборудования распределительных электрических сетей по результатам контроля качества электроэнергии: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2019, 121 с.

19. Камолова М.М. Разработка методики расчёта и прогнозирования показателей качества электроэнергии в сетях коммунально-бытового назначения: доктора философии (PhD) по специальности 6D071800 – Электроэнергетика, Душанбе, 2021, 158 с.

20. IEEE Std 519-1992. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. 1993, 100 p.

21. ГОСТ Р 8.622–2006. Показатели качества электрической энергии. Методика выполнения измерений при проведении контроля качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2006.– 73 с.

22. Джуразода Ш.Дж. Математические задачи электроэнергетики / Ш.Дж. Джуразода, Х.Б. Назиров, З.С. Ганиев, Р.С. Ишан-Ходжаев / учебно-методическое пособие. – М.: Вологда: Инфра-Инженерия, 2026. – 140 с.: ил., табл.

23. Алехин Р.А. Методика прогнозирования резонансных явлений в электроэнергетических системах с нелинейными нагрузками/ Р.А. Алехин, Ю.П. Кубарьков, Д.В. Замаков, Д.В. Умяров / Вестник СГТУ. Серия: Технические науки. – 2019. – №3(63). – с. 6-19.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Публикации в рецензируемых научных изданиях по перечню ВАК при Президенте Республики Таджикистан:

[1-А] 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-А] 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-А] 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-А] 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-А] 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.

Публикации входящие в базу данных SCOPUS и IEEE

[6-А]. **Habibullozoda Z.H.** Valuation of Potential of Resonance Phenomena in Electric Power Systems Containing Nonlinear Loads / Jurazoda Shohin (Dzhuraev Shokhin); Zikrullo Habibullozoda; Khurshed Nazirov; Zokirjon Ganiev; Saidjon Ismoilov; Rustam Karimov // 2026 ElCon Conference of Young Researchers in Power, Energy & Industry Applications (ElCon-PEIA). 03-05 February 2026, Saint Petersburg, Russian Federation. – doi: 10.1109/ElCon-PEIA69858.2026.11452017.

Публикации в научных изданиях, материалы региональных и международных конференций:

[7-А] 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-А] Саидбеков, З. Ҳ. Баҳодиҳии сифати энергияи электрикӣ дар зернерӯгоҳи «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-А] 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-А] 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-А] 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.

Авторские свидетельства и патенты

[12-А]. **Хабибуллозода З.Х.** 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 федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «НИУ «МЭИ». – EDN OTHGQR.

АННОТАТСИЯ

ба автореферати диссертатсияи Ҳабибуллозода Зикрулло Ҳабибулло дар мавзуи “Такмили усули пешгӯии ҳодисаҳои резонансӣ дар шабакаҳои электрикии дорои бори ғайрихаттӣ», барои дарёфти дараҷаи илмии доктори фалсафа (PhD) - доктор аз рӯи ихтисоси 6D071800 – Энергетикаи электрикӣ (6D071801 – Неругоҳҳои барқӣ ва системаҳои электроэнергетикӣ)

Калимаҳои калидӣ: ҳодисаҳои резонансӣ, шабакаҳои электрикӣ, бори ғайрихаттӣ, реҷаҳои ғайрисинусоидалӣ, усули пешгӯӣ, гармоникаҳои олӣ, оптимизатсия, усулҳои метаэвристикӣ, зариби пешгӯишавандаи бавуҷудоии резонансро.

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

Объекти таҳқиқот – шабакаҳои электрикие, ки дорои ҳиссаи назарраси борҳои ғайрихаттӣ мебошанд.

Навгонии илмии таҳқиқот:

1. Усули пешгӯии ҳодисаҳои резонансӣ дар СЭ коркард карда шудааст, ки ба таҳлили тавсифи амплитудавии басомадии (ТАБ) гирехҳо асос ёфтааст. Ба фарқ аз усулҳои мавҷудабуда, ин усул зариби пешгӯишавандаи бавуҷудоии резонансро (ЗПБР) истифода мебарад, ки аз тарафи муаллиф ва тавассути нисбати муқовимати хусуси гирех дар гармоникаи олӣ ба муқовимати хусуси гирех дар басомади асосии гирех ифода меёбад. Ин имкон медиҳад, ки баҳодиҳии ҳассосияти гирех 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 пешниҳодшуда ($K_{\text{рез}} \geq K_{\text{рез.ҷоизӣ}}$) 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 табии хати интиқоли барқ (ХИБ) ($P_{\text{таб}}$) муқаррар карда шудааст. Ин мутобиқшавии усулро ба конфигуратсияҳои гуногуни СЭ таъмин намуда, маҳдудиятҳои физикии тавони 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.

Соҳаи татбиқ:

1. Барномаи коркардкардашудаи пешгӯии ҳодисаҳои резонансиро, ки ба баҳодиҳии миқдории тавсифҳои амплитудавии басомадии гирехҳо бо истифода аз зариби пешгӯишавандаи бавуҷудоии резонансро коркардшуда асос ёфта, тавассути нисбати муқовимати хусуси гирех дар гармоникаи олӣ ба муқовимати хусусии гирех дар басомади асосӣ ифода меёбад, барои муайян намудани ҳодисаҳои резонансӣ дар шабакаҳои электрикӣ истифода бурда шавад.

2. Усули беҳинсозии бисёрмеъёрии ҷойҳои насб ва тавоноии дастгоҳҳои ҷубронкунанда бо истифода аз алгоритми тӯдаи салпҳо, ки дар он қимати зариби пешгӯишавандаи бавуҷудоии резонансӣ бевосита ба раванди итератсионии ҷустуҷӯ ҳамчун функсияи ҷаримавӣ барои бехатар намудани минтақаҳои резонансӣ ворид карда шудааст, метавонад барои интихоби ҷои дурусти дастгоҳҳои ҷубронкунанда бо назардошти ҳодисаи резонанс истифода бурда шавад.

3. Натиҷаҳои кори диссертатсионӣ ҳангоми омода намудани донишҷӯён ва магистрон аз рӯи ихтисосҳои «Нерӯгоҳҳои электрикӣ» ва «Электротаъминкунӣ» ҳангоми омӯзиши фанҳои «Масъалаҳои математикӣ дар электроэнергетика» ва «Мутобиқати электромагнитӣ» дар Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, Донишкадаи энергетикии Тоҷикистон, Филиали Донишкадаи миллии таҳқиқотии «Донишкадаи энергетикии Москва» дар шаҳри Душанбе истифода бурда мешаванд.

АННОТАЦИЯ

к автореферату диссертации Хабибуллозода Зикрулло Хабибулло на тему «Совершенствование методики прогнозирования резонансных явлений в электрических сетях с нелинейной нагрузкой» на соискание учёной степени доктора философии (PhD)-доктора по специальности 6D071800 – Электроэнергетика (6D071801 – Электрические станции и электроэнергетические системы).

Ключевые слова: резонансные явления, электрические сети, нелинейная нагрузка, несинусоидальные режимы, метод прогнозирования, высшие гармоники, оптимизация, метаэвристические методы, прогнозируемый коэффициент возникновения резонанса.

Цель исследования – совершенствование методики прогнозирования резонансных явлений в электрических сетях с нелинейной нагрузкой.

Объектом исследования диссертационной работы являются электрические сети, содержащие значительную долю нелинейных нагрузок.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Разработан метод прогнозирования резонансных явлений в ЭЭС, базирующийся на анализе амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) узлов. В отличие от существующих подходов, метод использует авторский прогнозируемый коэффициент возникновения резонанса (ПКВР), выраженный через отношение собственного сопротивления узла на высшей гармонике к сопротивлению на основной частоте. Это позволяет формализовать оценку чувствительности узла к гармоническим искажениям.

2. Обосновано пороговое условие существования опасного резонанса, связывающее расчетный коэффициент ПКВР с нормативными показателями качества электроэнергии – $K_{U(n)}$ и $K_{I(n)}$. Предложенный математический критерий: $K_{\text{рез}} \geq K_{\text{рез.доп.}}$, позволяет перейти от качественного частотного анализа к количественной оценке соответствия режима требованиям электромагнитной совместимости (ЭМС).

3. Установлена аналитическая зависимость нормативного значения ПКВР от класса напряжения сети и натуральной мощности ($P_{\text{нат}}$) линии электропередачи (ЛЭП). Это обеспечивает адаптивность метода к различным конфигурациям ЭЭС и учитывает физические ограничения пропускной способности сети при прогнозировании резонансных рисков.

4. Создан алгоритм автоматизированного поиска повышенных значений коэффициентов K_U и $K_{U(n)}$ из-за РЯ в ЭС с применением методов метаэвристической оптимизации (метода серых волков (МСВ), роя частиц (МРЧ) и роя сальп (МРС)) для определения наиболее опасных режимов в электрических сетях.

Область применения:

1. Разработанный алгоритм и программное обеспечение «Программа для анализа и определения узлов в ЭЭС, где возможны резонансные явления» (Свидетельство о гос. регистрации №2025685699) могут применяться проектными и эксплуатирующими организациями для выявления уязвимых узлов сети, при изменении её топологии.

2. Предложенный оптимизационный подход, на базе алгоритма роя сальп, позволяет диспетчерским службам обоснованно выбирать точки подключения фильтрокомпенсирующих устройств.

3. Результаты диссертации применяются при подготовке бакалавров по специальностей «Электрические станции» и «Электроснабжение» при изучении дисциплин «Математические задачи электроэнергетики» и «Электромагнитная совместимость» Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими, институт энергетики Таджикистана, Филиала НИУ «МЭИ» в г. Душанбе.

ANNOTATION

to the abstract of the dissertation of Habibullozoda Zikrullo Habibullo on the topic « Improving the methodology for predicting resonance phenomena in electrical networks with non-linear loads» for the degree of Doctor of Philosophy (PhD)-doctor in the specialty 6D071800 – Electrical Power Engineering (6D071801 – Power Plants and Electrical Power Systems).

Keywords: resonance phenomena, electrical networks, non-linear load, non-sinusoidal conditions, prediction method, higher harmonics, optimization, metaheuristic methods, predicted resonance occurrence coefficient.

The aim of the research is to improve the methodology for predicting resonance phenomena in electrical networks with non-linear loads.

The object of the dissertation research is electrical networks containing a significant proportion of non-linear loads.

Scientific novelty of the research:

1. A method for predicting resonance phenomena in electric power systems (EPS) based on the analysis of nodal magnitude-frequency characteristics has been developed. Unlike existing approaches, the method utilizes the author's predicted resonance occurrence coefficient (PROC), expressed as the ratio of the node's driving-point impedance at a higher harmonic to its impedance at the fundamental frequency. This allows for formalizing the assessment of node sensitivity to harmonic distortion.

2. A threshold condition for the existence of dangerous resonance has been substantiated, linking the calculated PROC with standard power quality indicators ($K_{U(n)}$, $K_{I(n)}$). The proposed mathematical criterion ($K_{res} \geq K_{res.perm}$) enables a transition from qualitative frequency analysis to a quantitative assessment of operating mode compliance with electromagnetic compatibility requirements.

3. An analytical relationship between the standard value of PROC, the grid voltage class, and the surge impedance loading (natural power, P_{nat}) of the transmission line has been established. This ensures the adaptability of the method to various EPS configurations and accounts for physical limitations of network transmission capacity when predicting resonance risks.

4. An algorithm for the automated search of elevated values of K_U and $K_{U(n)}$ coefficients resulting from resonance phenomena in electrical power systems has been created. It utilizes metaheuristic optimization methods (Grey Wolf Optimizer, Particle Swarm Optimization, and Salp Swarm Algorithm) to determine the most dangerous operating modes in electrical networks.

Field of application:

1. The developed method for predicting resonance phenomena, based on the quantitative assessment of nodal magnitude-frequency characteristics using the developed predicted resonance occurrence coefficient (PROC) – expressed as the ratio of the node's driving-point impedance at a higher harmonic to its impedance at the fundamental frequency – can be used to identify resonance phenomena in electrical grids.

2. A comprehensive method for multi-objective optimization of the location and capacity of compensating devices, which utilizes the Salp Swarm Algorithm and integrates the PROC value directly into the iterative search process as a penalty function for safely bypassing resonance zones, can be used to properly select the installation sites and sizing of compensating devices while taking resonance phenomena into account.

3. The results of the dissertation research are utilized in the educational process for undergraduate and Master's degree students majoring in «Power Plants» and «Power Supply» during the study of the courses «Mathematical Problems in Electrical Power Engineering» and «Electromagnetic Compatibility» at the Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, the Energy Institute of Tajikistan, and the Dushanbe Branch of National Research University «MPEI».

Подписано к печати 26.09.2026 Формат 60х84 1/16.
Бумага офсетная. Тираж 100 экз.
Отпечатано в типографии Института энергетики Таджикистана.
733036, Республика Таджикистан, Хатлонская область, Кушониёнский район.

Ба чоп 26.09.2026 имзо шуд. Андоза 60х84 1/16.
Қоғази офсетӣ. Адади нашр 100 нусха.
Нашриёти Донишкадаи энергетикии Тоҷикистон.
733036, Ҷумҳурии Тоҷикистон, вилояти Хатлон, ноҳияи Кушониён.