

БАРРАСИИ ТАҲҚИҚОТИ ҲИСОБИ РЕЗОНАНС ДАР ШАБАКАҲОИ ЭЛЕКТРИКӢ

З.Ҳ. Ҳабибуллозода

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ

Дар мақола натиҷаҳои баррасии таҳқиқоти оиди эҳтимолияти пайдоиши ҳодисаҳои резонансӣ ҳангоми речаҳои ғайрисинусоидаӣ дар шабакаҳои электрикӣ оварда шудаанд. Муаллифони усулҳои гуногуни ҳисоб ва пешгунии резонансро мавриди омӯзиш қарор дода, ҳулосаҳои зарурӣ бароварданд. Натиҷаҳои таҳлили мақолаҳо нишон доданд, ки ҳодисаи резонанс барои таҷҳизоти электрикӣ зухуроти хатарнок аст, зеро дар ҷараён ва шиддати он таҷҳизоти метавонанд қисман ё пурра осеби техникӣ бинанд. Барои паст кардани таъсири ҳодисаҳои резонанс ба таҷҳизоти электрикӣ истифодаи шунтҳои идорашаванда, батареяҳои конденсатори статикӣ, реакторҳои шунтии идорашаванда ва дигар воситаҳои зарур мебошад. Дар охири мақола дар шакли ҷадвал усулҳои истифодашаванда оиди ҳодисаи резонанс ва ҳулосаи тавсияҳои муаллифони гуногун оварда шудаанд.

Калидвожаҳо: ҳодисаи резонансӣ, борҳои ғайрихаттӣ, шабакаҳои электрикӣ, гармоникаҳои олӣ.

ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАСЧЁТУ РЕЗОНАНСА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

З.Х. Хабибуллозода

В работе приведены обзоры научных работ посвящённой вероятности возникновения резонансных явлений в электрических сетях, обусловленных несинусоидальными режимами. Авторы изучили различные методы расчёта и прогнозирования резонанса и сделали необходимые выводы. Из анализа этих статей следует, что явление резонанса представляет собой опасное явление для электрооборудования, поскольку в процессе его возникновения оборудование может получить частичное или полное техническое повреждение. Для снижения влияния резонансных явлений в электрооборудовании необходимо использование управляемых шунтов, батарей статических конденсаторов, управляемых шунтирующих реакторов и других средств. В конце статьи в форме таблицы приведены используемые методы по явлению резонанса, а также выводы и рекомендации различных авторов.

Ключевые слова: резонансное явление, нелинейные нагрузки, электрические сети, высшие гармоники.

REVIEW OF RESEARCH ON THE CALCULATION OF RESONANCE IN ELECTRICAL NETWORKS

Z.H. Habibullozoda

The paper provides reviews of scientific works dedicated to the probability of resonant phenomena occurring in electrical grids, which are caused by non-sinusoidal operating modes. The authors studied various methods for calculating and predicting resonance and drew necessary conclusions. The analysis of these articles indicates that the phenomenon of resonance poses a danger to electrical equipment, as partial or complete technical damage to the equipment can occur during its onset. To mitigate the influence of resonant phenomena on electrical equipment, it is necessary to use controlled shunts, static capacitor banks, controlled shunt reactors, and other means. At the end of the article, a table summarizes the methods used for the resonance phenomenon, along with the conclusions and recommendations of various authors.

Keywords: resonant phenomenon, nonlinear loads, electric networks, higher harmonics.

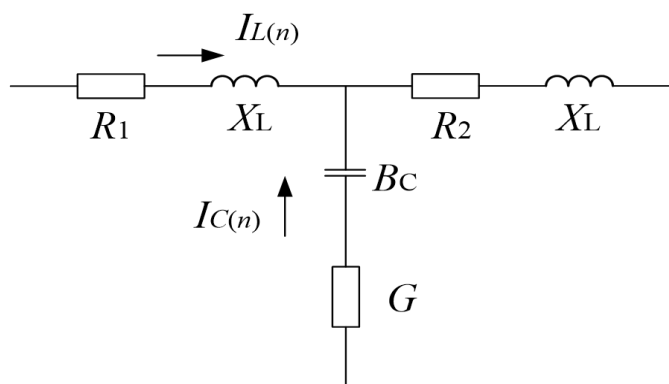
Муқаддима

Резонанс — ин ҳодисаест, ки дар занҷирҳои электрикӣ, ки ҳангоми пайвасти кардани як ва ё якчанд элементи индуктивӣ (L) ва инчунин як ва ё якчанд (C) конденсатор пайвасти будан, ба амал меояд. Ҳангоми мавҷуд будани гармоникаи олӣ дар шабакаҳои электрикӣ резонанс метавонад дар басомадҳои наздик ба басомадҳои як ё якчанд гармоникаи олие, ки дар шабакаҳои электрикӣ мавҷуданд, ба вучуд оянд. Маълум аст, ки элементҳои шабакаҳои электрикӣ ҳам табиати индуктивӣ (печаҳои трансформаторҳо, нокили хати интиқоли барқ, печаҳои генераторҳо ва муҳарриқҳо ва ғайраҳо) ва ғунҷоишӣ (батареяҳои конденсатори статикӣ (БКС), ғунҷоиши хатти интиқоли барқ ва ғайраҳо) доранд ва ҳангоми пайвасти мувозии онҳо эҳтимолияти ба вучуд омадани резонанси ҷараёнҳо ба вуқӯ омадани мумкин аст. Дар шабакаҳои электрикӣ ҳодисаҳои резонанси ҷараён вақте ба вучуд меояд, ки нокилиятҳои индуктивии шабака ва ғунҷоишии БКС ва ё хати интиқоли барқ дар ягон басомад ба ҳам баробар ва ё наздик шаванд:

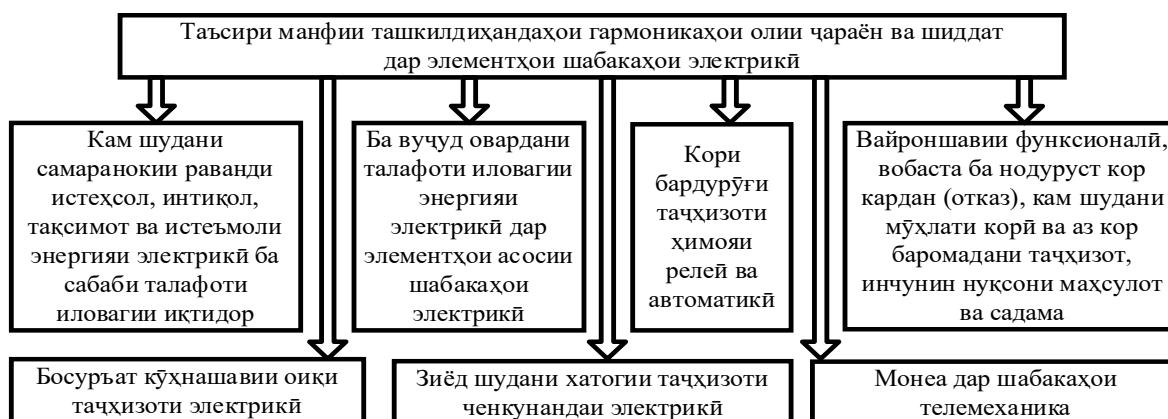
$$b_{L(n)} = b_{C(n)} \quad (1)$$

Нақшаи ба вуқӯ омадани ҳодисаи резонанси ҷараён дар шабакаҳои электрикӣ дар расми 1 оварда шудааст.

Дар речаи ғайрисинусоидалии шабакаҳои электрикӣ дар ҳолати резонанс ҷарён ва ё шиддат метавонанд дорои қимати бузург шаванд ва дар баъзе мавридҳо қимати шиддат ва ҷараёни гармоникаҳои олӣ ба шиддат ва ҷараёни басомади асосӣ баробар шуда метавонанд. Маълум аст, ки шиддат ва ҷарёни гармоникаҳои олӣ ягон қори ғойданок иҷро намекунанд ва ба таҷҳизоти электрикӣ шабакаҳо таъсири манфӣ мерасонанд [1]. Таъсири манфии гармоникаҳои олии шиддат ва ҷараён дар блок-схемаи расми 2 оварда шудаанд.



Расми 1-Нақшаи занҷири электрикӣ ҳангоми пайвасти мувозии элементҳои индуктивӣ ва ғунҷошӣ



Расми 2-Таъсири манфии гармоникаҳои олии шиддат ва ҷараён ба шабакаҳои электрикӣ

Масъалаи омӯзиш ва тадқиқи ҳодисаи резонанс дар шабакаҳои электрикӣ дар асарҳои олимони гуногун мавриди омӯзиш қарор гирифтааст. Дар мақолаи мазкур якчанд мақолаҳоро баррасӣ карда мебароем.

Дар кори илмӣ [2] оид ба таъсири ҳодисаи резонанси басомадӣ ба қимати гармоникаҳои олии шиддат ва ҷараён дар низоми электротаминкунӣ ҳангоми тағйир додани дараҷаи ҷуброн намудани тавоноии ғайрифайол суҳан маравад. Дар мақола роҳҳои ки муайян намудани басомадҳое, ки дар онҳо имконияти ба вучуд омадани резонанс ҳангоми иваз намудани тавоноии ғайрифайоли таҷҳизоти ҷубронкунанда, оварда шудаанд. Ҳодисаҳои резонансӣ низ ба монанди гармоникаҳои олии ҷараён ва шиддат ба кори низоми электротаминкунӣ таъсири манфӣ мерасонад. Маълум аст, ки ҳангоми пайвасти борҳои ғайрихаттӣ ба шабакаҳои электрикӣ боиси пайдоиши гармоникаҳои олии ҷараён мешаванд ва ё ба ибораи дигар “манбаи гармоникаи оӣ” дар шабака ба ҳисоб мераванд. Аз ин рӯ, ба сифати бори электрикӣ ҳаракатоварандаи барқии танзимкунандаи басомад дида шудааст. Барои ҷуброни тавоноии ғайрифайол ва баланд бардоштани зариби тавоноии бор ($\cos\phi$) дар шабакаи электрикӣ, дар тахтасими 0,4 кВ батареяи статикӣ конденсаторӣ насб карда шудааст. Муаллиф дар асоси ҳисобҳо, ҳамаи басомадҳое, ки дар онҳо имконияти ба вучуд омадани резонанси ҷараён вучуд дорад, муайян кардааст. Илова бар ин, муаллиф бо роҳи ҳисобӣ хатоии муайян намудани басомади резонансиро ҳангоми ба назар нагирифтани ташкилдихандаи фаъоли гузаронандаи контур муайян кардааст. Ин хатой камтар аз 0,1 % – ро ташкил додааст. Муайян намудани басомадҳои резонансӣ дар шабака, барои интиҳоби дурусти филтрҳо ва танзими онҳо, ки барои коҳиш додани сатҳи ҷараёнҳои гармоникӣ оӣ (ЧГО) ва инчунин басомадҳое, ки ба басомадҳои резонансӣ наздиканд, зарур аст. Файр аз ин, муайян кардани басомадҳои эҳтимолии резонансӣ барои боҳодиҳии мақсадноки истифодаи филтрҳои гармоникӣ низ муҳим мебошад.

Масъалаи таҳрифи қачхатти шиддат аз синусоидаи идеалӣ дар якчанд хатҳои интиқоли барқӣ (ХИБ) вилояти Иркутск (Федератсияи Россия), ки масъалаи муҳимми ҳалталаб барои таъмини сифати энергияи электрикӣ ва эътимоднокии шабакаҳои электрикӣ мебошад, дар кори илмӣ [3] дида шудааст. Мақсади тадқиқоти мазкур коркарди чорабиниҳои техникӣ – ташкилӣ барои бартараф намудани ҳодисаҳои резонансӣ дар басомадҳои гармоникаҳои оӣ дар шабакаҳои электрикӣ шиддаташ 35 кВ, ки ба зеристгоҳи нақлиётӣ пайваست карда шудааст, мебошад. Обьекти тадқиқоти речаи кори ғайрисинусоидаи ХИБ шиддаташ 35 кВ, ки ба печайи шиддати миёнаи трансформатори нақлиётӣ сепеҷака пайваст будааст. Тадқиқот бо истифода аз

барномаи комплекси “Барномаи ҳисоби речаҳои ғайрисимметрӣ ва ғайрисинусоидалии шабакаҳои электрикӣ” ва бастаи Microsoft Excel гузаронида шудааст. Натиҷаҳои ҳисоб ва таҳлили речаҳои ғайрисимметрӣ ва ғайрисинусоидалии шабакаи электрикии дидашаванда баландшавии шиддатро аз ҳисоби резонанс дар дарозии хат дар басомадҳои тоқи гармоникаҳои олий нишон доданд ва инчунин роҳҳои бартараф намудани ҳодисаҳои резонансро ҳангоми васли реактори чубронкунанда дар аввали хати 35 кВ пешниҳод карда шудаанд. Дар асоси ҳисобҳои гирифташуда, тасвири графикаи қатъаттаҳои ташкилкунандаҳои гармоникаҳои шиддат, аз 3 то 39 сохта шудаанд. Аз ҳисоби натиҷаҳои гирифташуда чорабиниҳои техникӣ, яъне насби реактори чубронкунанда дар ибтидои хат, барои бартараф намудани ҳодисаҳои резонансӣ ва таъмини сифати энергияи электрикӣ кӯмак мерасонанд.

Дар кори илмӣ [4] натиҷаҳои таҳлили гармоникаҳои тавоноии фаъоли дар гиреҳои пайвастагӣ ба шабакаи таъминкунандаи 220 кВ се борҳои ғайрихаттӣ (ба монанди корхонаи истеҳсоли алюминий, комбинати қоғазбарорӣ ва зеристгоҳи роҳи оҳан), ки тавоноии зиёд доранд, нишон дода шудааст. Одатан дастгоҳҳои электрикии ин гуна корхонаҳо манбаи гармоникаҳои олий мебошанд. Таҳлил дар асоси натиҷаҳои ченкунии иҷро карда шудааст. Мувофиқи чараёнҳо ва шиддатҳо чен карда шуда, гармоникаҳои тавоноии фаъол аз 2-юм то 40-ум ҳисоб карда шудаанд. Дар натиҷаи таҳлили гармоникаҳои тавоноии фаъол нишон дода шудааст, ки самти чараёнҳои гармоникаҳои олий на фақат аз бори корхона ба шабакаи электрикӣ ва инчунин аз шабака ба бор равона шуда метавонанд. Самти чараёни гармоникаҳои олий асосан аз муқовимати умумии шабака дар гармоникаҳои муайян вобастагӣ дорад. Барои баҳодиҳии андозаи лапиши энергияи электрикӣ (дар гармоникаҳои олий), ки корхона ба шабака медиҳад ва ё аз шабака мегирад, лозим аст энергияи зарарноки гармоникаҳоро истифода бурд. Аз ин рӯ, қимати бо воситаи ҳисобкунакҳои барқӣ ва ё асбобҳои махсус чен намудан зарур аст.

Дар кори илмӣ [5] усули муҳандисии пешгӯӣ намудани қиматҳои чараёнҳои асосӣ ва гармоникаҳои олиро дар шабакаҳои коммуналӣ – маишӣ дар асоси усулҳои эҳтимолию омории ҳисобкунии бор, оварда шудааст.

Натиҷаҳои ҳисоб имкон медиҳанд, ки ҳангоми интиҳоби буриши ноқилҳо дар шабакаҳои биноҳои истиқоматӣ таркиби гармоникаҳои олии чараён ба назар гирифта шаванд. Айни замон, барои шабакаҳои биноҳои истиқоматӣ ва ҷамъиятӣ чунин ҳисобҳо ягона усули қобили қабул мебошад, зеро дар ин гуна шабакаҳо шумораи зиёди истеъмолкунандагони якфазаи электрикӣ вучуд доранд, ки речаҳои кории онҳо аз бисёр омилҳо вобаста мебошанд. Маълумоти ибтидоии (шумора ва миқдори қабулкунакҳои электрикӣ, зариби истифодабарӣ, талабот ва пайвасткунӣ) дар формулаҳои овардашуда истифодашаванда ба осонӣ тафтиш ва ислоҳ карда мешаванд, ки ин ҳангоми баҳодиҳии эҳтимодноки натиҷаҳои ҳисоб барои як шаҳри муайян, хеле муҳим мебошад.

Дар кори илмӣ [6] модели хатти интиқоли барқи тағйирёбанда барои баҳодиҳии таъсири тоҷи электрикӣ ба сифати энергияи электрикӣ, пешниҳод карда шудааст. Натиҷаҳои таҷриба дар хатти интиқоли 500 кВ, инчунин муқоисаи онҳо бо натиҷаҳои моделсозии математикӣ оварда шудаанд. Нишон дода шудааст, ки таъсири тоҷи электрикӣ дар симҳои хатҳои баландшиддати интиқоли барқ ба сифати энергияи электрикӣ (ЭЭ) вобаста ба ташкилдихандаҳои n -уми гармоникӣ шиддат ночиз аст. Натиҷаҳои таҳлил нишон доданд, ки дар таркиби чараёни тоҷи электрикӣ спектри гармоникаи 5-ум нисбат ба дигар гармоникаҳо зиёд буда, он ҳангоми таъсири безарятшавии тоҷ, ғунҷоиши эквивалентии фазаҳои хатти интиқоли барқи тадқиқшаванда тақрибан 9 % аз ғунҷоиши геометрӣ зиёдтар аст. Модели математикии пешниҳодшудаи хатти интиқоли барқи ҳавоии 220 – 750 кВ имкон медиҳад, ки таъсири безарятшавии тоҷи электрикӣ дар симҳои хатти интиқол ба сифати ЭЭ дар шабакаи электрикӣ баҳо дода шавад. Эҳтимоднокии модели пешниҳодшуда ба наздик будани натиҷаҳои таҷрибавӣ ва моделсозии математикӣ дар гармоникаи 3-юм тасдиқ карда мешавад. Аммо дар гармоникаҳои 5-ум ва 7-ум фарқияти назаррас байни натиҷаҳои моделсозӣ ва маълумоти таҷрибавӣ мушоҳида мешаванд. Дар асоси таҷрибавӣ ба қайд гирифта шудааст, ки таъсири тоҷи электрикӣ ба зарибҳои ташкилдихандаи гармоникӣ n -уми чараёни хатти интиқол ва шиддат дар тахтасимҳои зеристгоҳҳо ночиз аст. Ин равандро инчунин натиҷаҳои ҳисобии модели математикии хатти интиқол тасдиқ мекунад. Гармоникаҳои олии чараён, ки аз ҷониби хатҳои интиқоли барқи баландшиддат дар зери таъсири тоҷи электрикӣ ба вучуд меоянд, ҳатто дар зеристгоҳҳои калони системаи электроэнергетикӣ наметавонанд боиси таҳрифи назарраси шакли қатъаттаи шиддат шаванд.

Дар айни замон дар шабакаҳои электрикӣ ҳам ба резонанси мувозӣ (параллелӣ) ва ҳам ба пайдарпаи дар басомадҳои гармоникаҳои олий диққати махсус дода мешавад. Дар солҳои охир, усули таҳлили модалӣ, ки дар асоси матритсаи муқовимати гиреҳӣ ҳисоб карда мешавад, роҳи умедбахшро барои баҳодиҳии резонанси параллелӣ нишон дод.

Дар мавриди резонанси пайдарпай бошад, дар мақолаи [7] усули нав пешниҳод шудааст, ки таҳлили модалиро бо усули шоҳи сунъӣ муттаҳид мекунад. Дар ин усул барои ҳисоб кардани басомади резонанси пайдарпай ва маълумоти аниқ оид ба шоҳаҳо пешниҳод шудааст. Дар мақолаи мазкур муайян карда шудааст, ки ҳангоми баҳодиҳии масъалаи резонанси пайдарпай, бояд на матритсаи муқовимати гиреҳӣ, ки барои

баҳодиҳии резонанси параллелӣ истифода бурда мешавад, балки матритсаи муқовимати контурӣ истифода шавад. Маълум аст, ки конфигуратсияи шабакаҳои электрикӣ доимо тағйир меёбад (иваз шудани шумораи шохаҳо дар шабакаҳо), аз ин рӯ дар мақола пешниҳод карда шудааст, ки усули шохаи сунъӣ бояд ҳангоми таҳлил дохил карда шавад. Натиҷаҳои санҷиш ва татбиқи амалӣ, дурустӣ ва самаранокии ин усулро нишон медиҳанд. Натиҷаҳои ин мақола метавонанд ҳамчун як усули нав, ки нисбат ба усулҳои маъмулӣ маълумоти бештар дар бораи резонанси гармоникӣ диҳад, хизмат кунанд ва инчунин барои санҷиши басомади резонанси филтрҳо низ истифода шавад.

Дар кори илмӣ [8] пешниҳод карда мешавад, ки таъсири дастгоҳҳои махсус, ки манбаи гармоникаҳои оӣ мебошанд, ба сифати энергияи электрикӣ аз рӯи саҳми нисбии ин дастгоҳҳо дар бад шудани нишондиҳандаҳои сифати энергияи электрикӣ (СЭЭ) ба инобат гирифта шавад. Натиҷаҳои ҷенкунии СЭЭ дар шабакаҳои амалкунандаи фаъоли 220 – 500 кВ ва баҳодиҳӣ таъсири реакторҳои шунтии идорашаванда ва компенсаторҳои статикӣ-тиристорӣ ба СЭ дар нуқтаҳои пайваستшавии онҳо ба шабакаи электрикӣ оварда шудаанд. Усули пешниҳодшуда имкон медиҳад, ки таъсири як манбаи лапиш ба сифати энергияи электрикӣ дар нуқтаи пайвастшавӣ ба шабакаи электрикӣ аз рӯи арзишҳои ҷеншудаи ҷараён ва шиддат дар нуқтаи пайвастшавии манбаъ баҳодиҳӣ карда шавад.

Ҳамаи натиҷаҳои ҳисобкунии шиддат дар басомади асосӣ аз 0,4 % шиддати ҷеншуда дар таҳтасимҳои зеристгоҳ зиёд нест, ки ин имкон медиҳад дақиқии баланди натиҷаҳо дар басомадҳои гармоникаҳои оӣ интизор шавад.

Дастгоҳҳои реакторҳои шунтии идорашаванда (РШИ) ва компенсаторҳои статикӣ-тиристорӣ (КСТ), ки барои кам кардани зарбҳои гармоникӣ тартиби 5-ум ва 7-уми шиддат истифода бурда мешаванд, боиси зиёд намудани гармоникӣ тартиби дигар мешаванд. Баҳодиҳии гармоникаҳои тартиби баландтари шиддат дар мақолаи мазкур баррасӣ нашуданд, зеро онҳо дар спектрҳои шиддат, ки ҳангоми ҷенкунӣ ба даст овардашуда, кам буданд.

Дар кори илмӣ [9] алгоритми пешниҳод шудааст, ки он имконияти таҳлили ҳолатҳои эҳтимолии резонанс дар системаи таъминоти барқ (СТБ) медиҳад. Бо ёрии алгоритм ҳисобкунии параметрҳои гуногуни элементҳои СТБ, ба монанди муқовимати хатҳои интиқоли барқ (ХИБ), трансформаторҳо ва ғайра анҷом дода мешавад. Илова бар ин, ҳисобкунии параметрҳои речаи система, ба монанди ҷараён дар хатҳо, тавоноии бор, талафоти тавоноӣ дар элементҳои СТБ, инчунин муайн намудани басомадҳои резонансӣ ва сохтани тавсифи амплитудавӣ ва басомадии шабака низ иҷро мегардад. Алгоритм имкон медиҳад, ки ҷунин параметрҳо ҳангоми мавҷуд будани борҳои ғайрихаттӣ дар шабака таҳлил карда шаванд, ки онҳо метавонанд сабаби пайдоиши ҳолатҳои резонансӣ дар наздикии басомадҳои гармоникӣ оӣ шабака гарданд. Дар натиҷаи ҳисобкунӣ вобастагҳои графикӣ ноқилияти система (индуктивӣ, ғунҷоишӣ ва умумӣ) аз басомад, инчунин вобастагии муқовимат аз басомад барои ду речаи кори СТБ ба даст оварда шудааст.

Дар кори илмӣ [10] оқибатҳои манфии таъсири гармоникаҳои оӣ ва резонанси ҷараёнҳо дар басомадҳое, ки ба басомадҳои гармоникаҳои оӣ (ГО) наздиканд, дар СТБ баррасӣ шуданд. Илова бар ин, дар мақола СТБ, ки дорои қабулкунакҳои барқӣ хусусияти волт-амперии ғайрихаттӣ дошта, мавриди тадқиқ қарор дода шудааст. Ба сифати борҳои ғайрихаттӣ дар СТБ ҳаракатоварҳои барқӣ идоракунандаи басомад истифода шудааст, ки дорои зарбии пасти тавоноии фаъл ($\cos\phi$) мебошанд. Барои баланд бардоштани $\cos\phi$ дар шабака аз батареяи танзимшавандаи конденсаторҳои статикӣ (БТКС) истифода бурда шуд. Дар кор алгоритми пешниҳод шудааст, ки ҳамаи басомадҳои эҳтимолии резонансиро вобаста ба дараҷаи ҷуброни тавоноии ғайрифактор ($\cos\phi$ ҳангоми иваз кардани зинаҳои БТКС) ҳангоми кори СТБ дар речаи резонанси ҷараёнҳо ҳисоб мекунад. Ҳисоби басомадҳои резонанс дар ду маврид, яъне бо назардошт ва беназардошти муқовимати фаъоли элементҳои СТБ анҷом дода шудааст. Дар асоси ҳисобҳо, ҳамаи басомадҳои имконпазир, ки дар онҳо шарти резонанси ҷараёнҳо иҷро мегардад, муайян карда шуданд. Ҳамчунин, бо роҳи ҳисобкунӣ ҳамаи муайянкунии басомади резонансӣ ҳангоми нодида гирифтани элементҳои фаъоли ноқилияти контур муайян карда шуд, ки он камтар аз 0,1%-ро ташкил дод. Муайян кардани басомадҳои резонансӣ барои интиҳоб ва танзими филтрҳо зарур аст. Ин филтрҳо барои паст кардани сатҳи ҷараёнҳои гармоникаҳои оӣ (ГО) дар шабака пешбинӣ шудаанд. Илова бар ин, муайян кардани басомадҳои эҳтимолии резонансӣ барои баҳодиҳии мақсаднокӣ истифодаи филтрҳои гармоникаҳо зарур аст.

Дар кори илмӣ [11] усули таҳлили гармоникаҳои оӣ дар шабакаҳои электрикӣ сарбастии мураккаби 110 кВ ва аз он боло, барои муайян кардани манбаъҳои асосии таҳриф оварда шудааст. Барои ҳар як гиреҳе, ки дар он ҷенкуниҳои нишондиҳандаҳои СЭЭ гузаронида шудаанд, пешниҳод мегардад, ки ҷараёнҳои эквивалентии гармоникаҳои оӣ ҳисоб карда шаванд. Ин ҷараёнҳо тавсифдиҳандаи манбаъҳои гармоникаҳои оӣ мебошанд, ки мустақиман ба гиреҳҳои додашуда пайваست шуда, шиддатеро ба вуҷуд меоранд, ки ба шиддати воқеии ҷенкардашудаи басомади муайян баробар мебошанд. Бо муқоисаи ҷараёнҳои эквивалентӣ барои гиреҳҳои гуногуни шабака пешниҳод карда мешавад, ки ҷойгиршавии манбаъҳои бузургии гармоникаҳои оӣ муайян карда шаванд. Натиҷаҳои тасдиқи усули пешниҳодшуда дар модели математикӣ ва натиҷаҳои

ченкунии нишондиҳандаҳои СЭЭ дар шабакаҳои 110, 220 ва 500 кВ дар системаи энергетикӣ ҳақиқӣ овада шудаанд. Усули мазкур метавонад мавқеи манбаи гармоникаҳои олии бузургро ба осонӣ муайян намояд.

Дар кори илмӣ [12] имконияти ба вучуд омадани ҳодисаҳои резонанс дар шабакаҳои рӯшноидиҳӣ ҳангоми пайваст намудани чароғҳои светодиоди ва борҳои индуктивии беруна баррасӣ шудааст. Таҳлили кори чароғҳои светодиоди дар як корхонаи саноатӣ нишон дод, ки мавҷудияти бориҳои берунаи фаъолу индуктивӣ дар шабакаи рӯшноӣ ба тез вайрон шудани дастгоҳҳои рӯшноӣ, ҳатто ҳангоми ба меъёрҳои танзимкунандаи СЭЭ мувофиқ будани он, оварда мерасонад. Барои омӯзиши равандохе, ки ҳангоми коммутатсия ба амал меоянд, алгоритми ҳисобкунии реҷаи кори шабакаи рушноидиҳӣ пешниҳод шудааст. Алгоритми мазкур имкон медиҳад, ки реҷаи кори шабакаи рушноидиҳиро пеш аз ва баъд аз пайваст кардани борҳои беруна ҳисоб кунад. Барои чароғҳои светодиоди осциллограммаҳои ҷараён ва шиддат гирифта сешавад ва дар асоси он тавсифи волт-амперии (ТВА) чароғҳои светодиоди ба даст овардан мумкин аст. Бо назардошти ТВА, тағйироти қатъаттаи ҷараёни чароғҳо пеш аз ва баъд аз пайваст кардани бори берунаи индуктивӣ таҳлил карда мешавад. Мавҷудияти қандашавӣ дар қатъаттаи ҷараён ҳангоми коммутатсия нишон дод, ки раванди гузариш метавонад хусусияти резонансӣ дошта бошад ва ба тез вайрон шудани чароғҳо оварда расонад. Дар натиҷаи таҳқиқ имконияти ба вучуд омадани ҳодисаҳои резонансӣ дар шабакаҳои дорои чароғҳои светодиоди ҳулосаҳои зерин бароварда шуданд: таҷрибаи истифодаи чароғҳои светодиоди дар корхонаҳои саноатӣ нишон медиҳад, ки ҳангоми ба таври параллелӣ ба кор андохтани борҳои индуктивии маишӣ бо чароғҳои светодиоди иқтидорашон калон ба мунтазам аз кор баромадани чароғҳо оварда мерасонад. Таҳлили нишондиҳандаҳои СЭЭ дар чунин шабака нишон дод, ки сабаби вайроншавии чароғҳо танҳо ҳодисаҳои резонансӣ дар лаҳзаҳои коммутатсия шуда метавонанд. Барои аз байн бурдани ҳодисаҳои резонансӣ ва пеш аз муҳлат аз кор баромадани чароғҳо, истифодаи схемаи таъминоти мустақил пешниҳод карда мешавад, ки дар он шабакаҳои барқии рӯшноидиҳӣ аз дигар истеъмолкунандагон ҷудо карда мешаванд.

Дар кори илмӣ [13] тадқиқоти гармоникаҳои олии ҷараёнҳои магнитии трансформаторҳои пасткунанда, ки дорои магнитопроводи ғайрисимметрӣ мебошанд, гузаронида шудааст. Усули аналитикӣ ҳисобкунии векторҳои сефазаи гармоникаҳои олии ҷараёнҳои магнитӣ ва ташкилдихандаҳои симметрии онҳо пешниҳод шудааст. Саҳеҳии усул бо маълумоти таҷрибавӣ тасдиқ карда шудааст. Натиҷаҳои тадқиқот метавонанд барои ҳисоб кардани реҷаҳои ғайрисинусоидалии СТБ истифода шаванд.

Дар кори илмӣ [14] алгоритмҳои истифодаи усули тавозуни гармоникӣ барои сохтани барномаи ҳисобкунии реҷаҳои ғайрисинусоидаӣ ва ғайрисимметрӣ дар СТБ бо конфигуратсияи дилхоҳ ва элементҳои маъмултарини бори ғайрихаттӣ (табдилдихандаҳои идорашаванда, шунтҳои магнитнокшудаи трансформаторҳо ва ғайраҳо) баён карда шудаанд. Инчунин масъалаҳои гуногун, ки бо истифода аз барномавии таҳияшуда ба таври самарабахш ҳал карда мешаванд, баррасӣ гардидааст.

Хусусияти системаҳои муосири таъмини барқ дар он аст, ки онҳо миқдори зиёди таҷҳизоти барқӣ доранд, ки ҷараёни ғайрисинусоидӣ истеъмол мекунанд. Намунаҳои ин гуна таҷҳизот инвертерҳои басомад ё росткунакҳои иқтидори калон мебошанд. Азбаски дар СТБ элементҳои индуктивӣ ва ғунҷошӣ мавҷуд ҳастанд, пас дар ин гуна шабакаҳо эҳтимолияти ба вучуд омадани резонанс ҷой дорад. Дар кори илмӣ [15] модели омӯзиши СТБ ҳангоми дар он мавҷуд будани росткунакҳои электрикӣ дар барномаи MATLAB/Simulink таҳия карда шуд. Натиҷаҳои моделсозӣ нишон медиҳанд, ки дар СТБ ҳодисаи резонанс ба амал меояд. Муайян карда шудааст, ки рақами гармоника, ки дар он резонанс ба вучуд меояд, аз дарозии хати барқ вобаста аст. Дар ин ҳолат, нишондиҳандаҳои гармоникаи ҷараён ва шиддат дар аввал ва охири хат қиматҳои гуногун доранд. Ҳангоми резонанс, гармоникаи максималии ҷараён тавассути манбаъ гардиш мекунанд ва дар охири хат, гармоникаи ҷараён қимати минималӣ дорад, аммо шиддат дар ҳамин гармоника қимати калонро соҳиб мешавад.

Таҳлили устувории резонанс дар шабакаи электрикӣ яке аз масъалаҳои мубрами системаҳои электроэнергетикӣ мебошад. Кори [16] маҳз ба ҳамин масъала бахшида шудааст. Бо истифода аз ин усули дар мақолаи мазкур пешниҳодшуда, лаппишҳои мураккаб, ки дар системаи энергетикӣ мавҷуданд, метавонанд бо ёрии назарияи хуб таҳияшудаи математикӣ занҷирҳои хаттӣ таҳлил карда шаванд. Ин мақола ба таҳлили устувории резонансии шабакаи барқ дар асоси матритсаи гузаронандагии гиреҳии $Y(s)$ дар соҳаи s равона шудааст. Барои шабакаи электрикӣ мутобиқати қиматҳои хоси он ва нуқтаҳои сифрии $Y(s)$ аввал тавассути таҳлили назариявӣ ва тасдиқи ҳолати махсус санҷида шудааст. Баъдан, барои таҳлили устувории резонансии шабакаи электрикӣ усули системавӣ пешниҳод карда шуд. Дар ин усул, аввал резонанс дар асоси муодилаи шиддати гиреҳӣ ва матритсаи элементҳои шабакаи электрикӣ муайян карда мешавад. Сипас, ҷузъҳои асосии марбут ба реҷаи резонанс мавриди назар тавассути таҳлили ҳассосияти реҷа муайян карда мешаванд.

Дар мақолаи [17] оиди омилҳои асосии зуҳуроти резонанс дар шабакаҳои электрикӣ сухан рафта, дар он нақшаи 5 - гиреҳи IEEE дар барномаи Eтар амсиласозӣ карда шуда, тавсифи амплитудавӣ-басомадии он дар реҷаҳои гуногун таҳқиқ карда шудааст. Барои дуруст баҳо додани ҳодисаи резонанс дар шабакаҳо вобастагии байни муқовимати гиреҳ дар басомади резонансӣ ва дар басомади асосӣ, ҳамчун зариби ба вучудоии

резонансро дар гармоникаи n - ум қабул шудааст. Дар асоси натиҷаҳои ҳисоб ҷадвали муайян намудани ба вучуд омадани зуҳуроти резонанс дар нақшаи электрикии тадқиқшаванда тартиб дода шудааст.

Натиҷаҳои муқоисаи усулҳои таҳлили ҳодисаи резонанс дар шабакаҳои электрикӣ дар ҷадвали 1 оварда шудаанд.

Ҷадвали 1-Усулҳои муайнкунии ё (таҳлили) ҳодисаҳои резонансӣ

Номи муаллиф	Усули истифодашаванда	Истифодаи барномаҳо	Хулосаи (тавсияи) муаллиф
Коваленко Д.В.	Усули шиддатҳои гиреҳӣ	-	Насби филтрҳои ҷубронкунанда
Тугунцев С.Г.	Усули шиддатҳои гиреҳӣ	“Барномаи ҳисоби речаҳои ғайрисимметрӣ ва ғайрсинусоидаӣ” дар барномаи Microsoft Excel	Насби дастгоҳҳои реактори ҷубронкунанда
Коверникова Л.И.	Усули шиддатҳои гиреҳӣ	-	Ҳисобкунакҳои барқӣ ва асбобҳои ҷенкунанда
Асанов А.К.	-	-	Насби филтрҳо
Шаров Ю.В.	Усули матритсаи муқовимати гиреҳӣ	MATLAB/Simulink -	-
Hui Zhou	Усули шоҳаи сунъӣ	-	Насби филтрҳо
Карташев И.И.,	Усули шиддатҳои гиреҳӣ	-	Реакторҳои шунтии идорашаванда ва компенсаторҳои статикӣ-тиристорӣ
Осипов Д.С.	-	-	Насби филтрҳо
Коваленко Д.В.	-	-	Насби филтрҳои ҷубронкунанда
Валиуллин К.Р.	Усули шиддатҳои гиреҳӣ	MATLAB/Simulink	-
Кучумов Л.А.	-	-	Насби шунтҳои идорашаванда
Svetlana Molot	-	MATLAB/Simulink	-
Zheng Xu	Матритсаи гузаронандагии гиреҳҳо	-	Насби филтрҳо

Хулоса

Натиҷаҳои таҳлили мақолаҳои баррасишудаи олимони, ки барои муайян ва пешгирӣ кардани ҳодисаҳои резонансӣ ва ҳисоби речаҳои ғайрсинусоидаӣ дар шабакаҳои электрикӣ равона карда шудаанд, нишон медиҳанд, ки барои ҳалли ин масъала асосан усулҳои шиддатҳои гиреҳӣ, матритсаи муқовимати гиреҳӣ, шоҳаи сунъӣ ва матритсаи гузаронандагии гиреҳҳо истифода мешаванд. Мувофиқи таҳлили мақолаҳои зикршуда хулоса баровардан мумкин аст, ки ҳангоми резонанс дар шабакаҳои электрикӣ қимати ҷараён ва ё шиддатҳои гармоникаҳои олӣ зиёд мешаванд, ки оқибат ба кори элементҳои алоҳидаи системаи электроэнергетикӣ таъсири манфӣ расонанд, боиси пастшавии СЭЭ дар шабакаҳо гарданд ва ҳатто то вайрон шудани таҷҳизоти электрикӣ оварда мерасонанд. Барои паст намудани сатҳи гармоникаҳои олии шиддат ва ҷараён насби шунтҳои идорашаванда, БСК, реакторҳои шунтии идорашаванда ва ғайраҳо лозим мебошанд.

Бояд қайд намуд, ки дар системаи электроэнергетикӣ пайвасту ҷудо намудани элементҳои мавҷуда ва инчунин пайвасти элементҳои нав пайваста амалӣ карда мешаванд, ки ин ба иваз шудани сохти (конфигуратсияи) система мегардад. Иваз шудани сохти система электроэнергетикӣ ба тағйир ёфтани тавсифи амплитудавӣ-басомадӣ дар нуқтаҳои алоҳидаи он мегардад. Аз ин рӯ, бояд усуле пешниҳод намудан лозим аст, ки вобаста ба тағйирёбии сохти системаи электроэнергетикӣ тавсифи амплитудавӣ-басомадии нуқтаҳои ситемаро дақиқ муайян намояд.

Муқаррир: Қирғизов А.Қ. - н.и.т., дотсенти қабедраи нерӯгоҳҳои электрикӣ ДПЭП ба номи академик М.С.Осимӣ

Адабиёт

1. Masoum M.A.S. Power Quality in Power Systems and Electrical Machines / Fuchs Ewald F., Masoum Mohammad A.S. // 2nd Edition, Kindle Edition, 2015, 1140 p. ISBN-13: 978-0128009888.

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

3. Разработка мероприятий по устранению резонансных явлений на частотах высших гармоник на линии электропередачи 35 кВ.// Тугунцев С.Г., Шафаревич К.В., “Вестник ИГЭУ”, 2023, вып. 5, С.40-50.
4. Активный мощности гармоника в узлах присоединения нелинейный высокого напряжения.// Коверникова Л.И. Электричество, 2017, №3, С.12-20.
5. Прогнозирование тока высших гармоник в городских распределительных сетях 0,38 кВ.// Асанов А.К. КГТУ им. И. Раззакова, Кыргызстан, 720044, г. Бишкек, С.43-46.
6. Исследование влияния короны в электропередачах на качество электроэнергии по n-й гармонической составляющей тока и напряжения.// Шаров Ю.В., Насыров Р.Р., Олексюк Б.В., Симуткин М.Г., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г., «Электричество» №6 /2013, С.8-13.
7. Power system series harmonic resonance assessment based on improved modal analysis // Hui Zhou, Yaowu W.U., Suhua LOU., Xinyin Xiong., Istanbul university journal of Electrical & Electronics Engineering / Year 2007., Volume 7., Number 2, Page 423-430.
8. Исследование влияния источников высших гармоник на качество электроэнергии в электроэнергетических системах 220–500 кВ // Карташев И.И., Насыров Р.Р., Олексюк Б.В., Симуткин М.Г., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г., «Электричество» №1. 2013, С.13-18.
9. Идентификация резонансных режимов при наличии нелинейных нагрузок в системах электроснабжения промышленных предприятий.// Осипов Д.С., Горюнов В.Н., Коваленко Д.В., Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия., С.42-47.
10. Определение резонансной частоты системы электроснабжения при изменении степени компенсации реактивной мощности и наличии высших гармоник // Коваленко Д.В., ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет», Омск., Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований №8., 2017., С.16-21.
11. Метод анализа высших гармоник напряжения в магистральной электрической сети // Салимов А.С., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г., «Электричество» №7 /2014, С.26-13.
12. Исследование резонансных явлений в цепях со светодиодными.// Валиуллин К.Р., Оренбургский государственный университет., промышленная электроника, автоматика и системы управления, [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4\(53\)-56-61](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-56-61).
13. Методика расчета высших гармоник токов намагничивания понижающих трансформатор.// Кучумов Л.А., Кузнецов А.А., Московский энергетический институт., «Электричество» №3 /98, С.15-22.
14. Использование метода гармонического баланса для расчета несинусоидальных и несимметричных режимов в системах электроснабжения.// Кучумов Л.А., Харлов Н.Н., Картасиди Н.Ю., Пахомов А.В., Кузнецов А.А., Московский энергетический институт., «Электричество» №12 /99, С.12-22.
15. Investigation of resonance phenomena in power lines supplying powerful rectifier plants.// Svetlana Molot, Vasilina Kovalenko, Elena Pylskaya, Ivan Artyukhov, and Sergey Stepanov., Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia., E3S Web of Conferences 288, 01053 (2021) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128801053 SUSE-2021>.
16. Study on the Method for Analyzing Electric Network Resonance Stability // Zheng Xu, Shijia Wang, Facai Xing and Huangqing Xiao, *Energies* 2018, 11, 646; doi:10.3390/en11030646 www.mdpi.com/journal/energies, 2 of 13.
17. Таҳқиқи речаи ғайрисинусоидаӣ дар шабакаҳои электрии барои баҳодиҳии ба вучуд омадани ҳодисаи резонанс / Ш.Ҷ. Ҷуразода, З.Ҳ. Ҳабибуллозода, М.К. Чаборов, С.Т. Исмоилов // Паёми политехникӣ. Баҳши: Таҳқиқоти муҳандисӣ. – 2025. – No. 2(70). – P. 47-58. – EDN LQLGHA.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФ-СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ-INFORMATION ABOUT AUTHOR

TJ	RU	EN
Ҳабибуллозода Зикрулло Ҳабибулло	Хабибуллозода Зикрулло Хабибулло	Habibullozoda Zikrullo Habibullo
Докторанти PhD	Докторант PhD	PhD student
ДТТ ба номи академик М.С. Осимӣ	ТТУ имени академика М.С. Осими	TTU named after academician M.S. Osimi
E-mail: szhpei@internet.ru		