

**O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASI FANLAR AKADEMIYASI
ENERGETIKA MUAMMOLARI INSTITUTI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
DSc.05/2025.28.11.T.02.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

O‘zR FA ENERGETIKA MUAMMOLARI INSTITUTI

MURTAZOV SHERZOD ISAKBAYEVICH

**ELEKTR TA‘MINOTI TIZIMLARINING ISHONCHLILIGINI
KOMPENSATSIYALOVCHI QURILMALARNI QO‘LLASH ORQALI
OSHIRISH**

05.05.01 – Energetika tizimlari va majmualari

**TEXNIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Toshkent – 2026

**Texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD)
dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi**

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

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

Murtazov Sherzod Isakbayevich

Elektr ta'minoti tizimlarining ishonchligini kompensatsiyalovchi qurilmalarni
qo'llash orqali oshirish.....3

Муртазов Шерзод Исакбаевич

Повышение надежности систем электроснабжения за счет применения
компенсирующих устройств.....23

Murtazov Sherzod Isakbaevich

Improving the reliability of power supply systems through the use of
compensating devices45

E'lon qilingan ishlar ro'yxati

Список опубликованных работ

List of published works.....49

**O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASI FANLAR AKADEMIYASI
ENERGETIKA MUAMMOLARI INSTITUTI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
DSc.05/2025.28.11.T.02.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

O‘zR FA ENERGETIKA MUAMMOLARI INSTITUTI

MURTAZOV SHERZOD ISAKBAYEVICH

**ELEKTR TA‘MINOTI TIZIMLARINING ISHONCHLILIGINI
KOMPENSATSIYALOVCHI QURILMALARNI QO‘LLASH ORQALI
OSHIRISH**

05.05.01 – Energetika tizimlari va majmualari

**TEXNIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

Toshkent – 2026

Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasining mavzusi O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi huzuridagi Oliy attestasiya komissiyasida B2025.4.PhD/T6206 raqami bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Energetika muammolari institutida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengashning veb-sahifasi (www.energetika.uz) hamda "ZiyoNet" axborot-ta'lim portaliga (www.ziynet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:

Tolipov Jamshid Nurbekovich

texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori,
katta ilmiy xodim

Rasmiy opponentlar:

Xamidov Shuxrat Vaxidovich

texnika fanlari doktori, professor

Xalikhazarov Urolboy Abduraxmanovich

texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori, dotsent

Yetakchi tashkilot:

Buxoro davlat texnika universiteti

Dissertatsiya himoyasi O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Energetika muammolari instituti huzuridagi DSc.05/2025.28.11.T.02.01 raqamli Ilmiy kengashning 2026-yil "14" avgust soat 10⁰⁰ dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 100125, Toshkent shahri, Do'rmon yo'li ko'chasi, 40. Tel.: (99855) 520-01-52; e-mail: energetika_in@umail.uz).

Dissertatsiya bilan O'zR FA Energetika muammolari institutining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (5 raqam bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 100125, Toshkent shahri, Do'rmon yo'li ko'chasi, 40. Tel.: (99855) 520-01-52)

Dissertatsiya avtoreferati 2026 yil "18" iyul kuni tarqatildi.

(2026 yil "21" iyul dagi 5 raqamli reyestr bayonnomasi)



X.M. Muratov

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash raisi,
texnika fanlari doktori, professor

K.Sh. Kadirov

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash ilmiy
kotibi v.b., texnika fanlari doktori, katta ilmiy
xodim

O.X. Ishnazarov

Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash qoshidagi
ilmiy seminar raisi, texnika fanlari doktori,
professor

KIRISH (Falsafa doktori (PhD) dissertatsiya annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda elektr energiyasi sifat ko'rsatkichlarini yaxshilash, reaktiv quvvatni kompensatsiya qilish va tok garmonikalarini filtr uskunalari yordamida bostirish uchun energiya va resurs tejamkor texnologiyalar va zamonaviy texnika vositalarini qo'llash masalalariga alohida ahamiyat berilmoqda. "Dunyo miqyosida 30121729 GVt·soat dan ortiq elektr energiyasi ishlab chiqarilishi"¹ va ishlab chiqarilgan elektr energiyasini iste'molchilarga uzluksiz yetkazib berishda elektr ta'minoti tizimlarining ishonchliligi muhim hisoblanib, yetkazib berilgan elektr energiyasi sifatini oshirish, 0,4 kV tarmoqlarda reaktiv quvvatni kompensatsiya qilish va filtr-kompensatsiya qurilmalarini amaliyotga joriy etishni taqozo etadi. Shu jihatdan nochiziqli yuklamalarning elektr energiyasi sifat ko'rsatkichlarini me'yoriy qiymatlarga keltirish, reaktiv quvvatni kompensatsiya qilish uchun passiv o'zgartirgichlar va avtomatik rostlanadigan filtr-kompensatsiya qurilmalaridan keng foydalanish jarayonlariga katta e'tibor qaratilmoqda.

Jahonda sanoat korxonalarining elektr ta'minoti tizimlarining ishonchliligini elektr energiyasi sifat ko'rsatkichlarni yaxshilash va reaktiv quvvatni kompensatsiya qilish orqali oshirish hamda energiya isroflarini kamaytirishga qaratilgan zamonaviy texnologiyalarni ishlab chiqish, elektr tarmoqlarida rezonans hodisalarni aniqlash va oldini olish usullarini takomillashtirish, shuningdek filtr va kondensator qurilmalarining tarmoq bilan o'zaro ta'sirini tadqiq qilish, shuningdek garmonik buzilishlarga olib keluvchi vositalarni aniqlashga yo'naltirilgan ilmiy-tadqiqot ishlari olib borilmoqda. Ushbu yo'nalishda, jumladan, iste'molchilarning elektr energiyasi sifat ko'rsatkichlariga salbiy ta'sir etuvchi omillarni aniqlash va ularni kamaytirish hamda reaktiv quvvatni kompensatsiya qilish orqali elektr ta'minoti ishonchliligini oshiruvchi passiv o'zgartirgichni hisoblash va tanlash usullarini takomillashtirish, korxonalar elektr ta'minoti tizimida yuqori tartibli garmonikalarni bostirish uchun filtr-kompensatsiya qurilmalar va imitatsion modellarini ishlab chiqish dolzarb masalalardan biri hisoblanadi.

Respublikamizda sanoat korxonalarining elektr ta'minoti tizimlarida energiya samaradorligini oshirish, elektr energiyasi sifatini yaxshilash va isroflarni kamaytirish imkonini beradigan resurstejamkor texnika va texnologiyalarni yaratish yuzasidan keng qamrovli chora-tadbirlar amalga oshirilib, muayyan natijalarga erishilmoqda. 2022-2026 yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasida, jumladan "Iqtisodiyotni elektr energiyasi bilan uzluksiz ta'minlash hamda "Yashil iqtisodiyot" texnologiyalarini barcha sohalarga faol joriy etish, iqtisodiyotning energiya samaradorligini 20 foizga oshirish"² vazifalari belgilangan. Mazkur vazifalarini amalga oshirishda, jumladan, filtr-kompensatsiya qurilmalari va aktiv o'zgartirgichlarga asoslangan zamonaviy elektrotexnik majmualarni ishlab chiqish, ularni ishlab chiqarish tarmoqlariga tatbiq etish hamda elektr energiyasi sifat

¹ <https://objectstorage.ap-dcc-gazipur-1.oraclecloud15.com/>

² O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 28.01.2022 yildagi PF-60-son "2022 - 2026 yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida"gi Farmoni

ko'rsatkichlarini avtomatlashtirilgan tarzda nazorat qilish va korreksiyalash imkonini beruvchi yechimlarni yaratish muhim masalalardan biri hisoblanadi.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-son "2022 - 2026 yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida"gi Farmoni va 2023-yil 13-fevraldagi PQ-54-son "Yoqilg'i-energiya resurslaridan foydalanish sohasida davlat nazorati samaradorligini oshirish chora-tadbirlari to'g'risida", 2025-yil 1-apreldagi PQ-133-son "Yoqilg'i-energiya resurslaridan noqonuniy foydalanish va behuda sarflanishining oldini olish hamda energiya samaradorligini oshirish bo'yicha chora-tadbirlarni takomillashtirish to'g'risida" gi qarorlari, 2025-yil 27-martdagi PF-63-son "Energiya samaradorligini oshirish sohasida davlat boshqaruvini takomillashtirish va energiya servis kompaniyalari xizmatlari bozorini rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi Farmoni, Vazirlar Mahkamasining 2025-yil 24-oktabrdagi 673-son "Energiya servis xizmatlari bozorini shakllantirish hamda aholi uy-joylarining energiya samaradorligi oshirilishini rag'batlantirish chora-tadbirlari to'g'risida", 2024-yil 31-maydagi 319-son "Elektr energiyasi va tabiiy gazdan foydalanish qoidalarini tasdiqlash to'g'risida"gi qarorlari hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya ishi muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi. Mazkur dissertatsiya ilmiy ishi bo'yicha tadqiqotlar respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining 2 "Energetika, energiya tejamkorlik va muqobil energiya manbalari" ustuvor yo'nalishiga mos keladi.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Elektr tarmoqlarida nosinusoidal rejimlarni nazariy tahlil qilish hamda tok va kuchlanish garmonikalarining paydo bo'lish qonuniyatlarini aniqlash hamda tok va kuchlanish garmonik tarkibini Furye tahlili asosida baholash usullarini va garmonik buzilish koeffitsiyentlarini aniqlash metodlarini takomillashtirish kabi masalalarni hal qilishda bir qator taniqli xorijiy olimlar katta hissa qo'shganlar, jumladan Abramovich B.N., Gamazin S.I., Zhelezko Yu.S., Smolovik S.V., Dovgun V.P., Budeanu C., Shidlovskiy A.K., Agunov M.V., Tonkal V.Ye. va boshqalar.

Reaktiv quvvatni kompensatsiya qilish usullarini rivojlantirish hamda kondensator batareyalari va filtr-kompensatsiya qurilmalarining optimal parametrlarini aniqlashga O'zbekistonning taniqli olimlarini ilmiy ishlari bag'ishlangan. Bulardan: Fozilov X.F., Nasirov T.X., Allayev Q.R., Kamalov T.S., Muratov X.M., Xoshimov F.A., Xamidov Sh.V., Siddiqov I.H., Pirmatov N.B., Ishnazarov O.X., Toirov O.Z. Olib borilgan ilmiy tadqiqotlar natijasida nochiziqli yuklamalarning elektr tarmog'iga ta'sirini o'rganish va ularning garmonik buzilishlarga olib keluvchi mexanizmlarini aniqlash, elektr tarmoqlarida rezonans hodisalarini aniqlash va oldini olish usullarini ishlab chiqish, shuningdek filtr va kondensator qurilmalarining tarmoq bilan o'zaro ta'sirini tahlil qilish, elektr energiyasi sifati ko'rsatkichlarini monitoring qilish va diagnostika qilish usullarini ishlab chiqish masalalarini yechishda salmoqli natijalarga erishildi.

Shu bilan birga, sanoat korxonalarining elektr ta'minoti tizimlarida nochiziqli yuklamalar ta'sirida yuzaga keladigan garmonik buzilishlarni kamaytirish, reaktiv

quvvatni samarali kompensatsiya qilish hamda elektr energiyasi sifati ko'rsatkichlarini yaxshilash masalalari to'liq darajada o'rganilmagan. Xususan, passiv filtr-kompensatsiya qurilmalarining elektr tarmog'i bilan o'zaro ta'siri, garmonik toklarning tarmoq elementlariga ta'siri, filtr parametrlarini optimal tanlash hamda rezonans hodisalarini oldini olishga qaratilgan kompleks matematik modellar yetarli darajada ishlab chiqilmagan. Shuningdek, sanoat korxonalarida qo'llanilayotgan chastota o'zgartkichlar va boshqa noxiziq yuklamalar mavjud sharoitda passiv filtr va kondensator batareyalarini birgalikda qo'llash orqali elektr energiyasi sifati ko'rsatkichlarini oshirish masalalari ham yetarli darajada tadqiq etilmagan.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya ishi 2022-2025-yillarga mo'ljallangan O'zR FA Energetika muammolari institutining "Elektrotexnologiyalar va energetik uskunarlar ekspluatatsiyasi" ilmiy- tadqiqot laboratoriyasining "Taqsimlangan generatsiyalar asosidagi zamonaviy elektr tarmoqlari ekspluatatsiya sharoitlarini shakllantirish muammolari va yechimlari" mavzusidagi dastur doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi elektr ta'minoti tizimlarida kompensatsiyalovchi qurilmalarni qo'llash orqali ishonchlilikni oshirish bo'yicha ilmiy yechimlarni ishlab chiqishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

iste'molchilarning elektr energiyasi sifat ko'rsatkichlariga salbiy ta'sirini kamaytirish va reaktiv quvvatni kompensatsiya qilish orqali elektr ta'minoti ishonchliligini oshiruvchi passiv o'zgartkichni hisoblash va tanlash usulini takomillashtirish;

korxonalar elektr ta'minoti tizimida yuqori tartibli 5- va 7- garmonikalarni bostiruvchi va reaktiv quvvatni kompensatsiya qiluvchi filtr-kompensatsiya qurilmasini takomillashtirish;

korxonalar elektr ta'minoti tizimlari uchun yuqori tartibli 5- va 7- garmonikalarni bostirish jarayonlarini amalga oshiruvchi passiv filtrlashning imitatsion modelini ishlab chiqish;

filtr-kompensatsiya qurilmasi yordamida elektr energiyasi sifatini oshirish, garmonik buzilishlarni kamaytirish va reaktiv quvvatni dinamik boshqarish jarayonlarini tavsiflovchi matematik modelni ishlab chiqish.

Tadqiqotning obyekti- elektr energiyasi sifat ko'rsatkichlarini yaxshilash va reaktiv quvvatni kompensatsiyalash jarayoni va uni amalga oshiradigan filtr-kompensatsiya qurilmasi.

Tadqiqotning predmeti elektr energiyasi sifatini yaxshilash va reaktiv quvvatni kompensatsiyalash uchun filtr-kompensatsiya qurilma tuzilmalari, parametrlari, xususiyatlari, boshqaruv tizimlari va ish rejimlari hisoblanadi.

Tadqiqotning usullari. Tadqiqot jarayonida matematik hisoblash qoidalari, nazariy elektrotexnika qonuniyatlari, statistik tahlil usullari, elektr tarmoqlari elementlaridagi quvvat isroflarini hisoblash uchun analitik modellar, eksperimentlarni matematik rejalashtirish va kompyuter imitatsion modelashtirish usullari hamda mavjud me'yoriy hujjatlarda belgilangan usullardan foydalanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

iste'molchilarning elektr energiyasi sifat ko'rsatkichlariga salbiy ta'sirini kamaytirish va reaktiv quvvatni kompensatsiya qilish orqali elektr ta'minoti ishonchliligini oshiruvchi passiv o'zgartkichni hisoblash va tanlash usuli 5- va 7-garmonikalar rezonans chastotalarini aniqlash, filtrning induktiv hamda sig'im parametrlarini moslashtirish va yuklama quvvat koeffitsiyentini oshirish hisobiga takomillashtirilgan.

korxonalar elektr ta'minoti tizimida yuqori tartibli 5- va 7- garmonikalarni bostirish va reaktiv quvvatni kompensatsiya qilish imkonini beruvchi filtr-kompensatsiya qurilmasi konstruktsiyasiga o'zgartirish kiritish hisobiga takomillashtirilgan;

korxonalar elektr ta'minoti tizimlari uchun yuqori tartibli 5- va 7- garmonikalarni bostirish jarayonlarini amalga oshirish imkonini beruvchi passiv filtrlashning imitatsion modeli Matlab/Simulink muhitida ishlab chiqilgan;

filtr-kompensatsiya qurilmasi yordamida elektr energiyasi sifatini oshirish, garmonik buzilishlarni kamaytirish va reaktiv quvvatni dinamik boshqarish jarayonlarini tavsiflash imkonini beruvchi matematik model vazn koeffitsiyentlarini kiruvchi parametrlar sifatida inobatga olib ishlab chiqilgan.

Tadqiqotning amaliy ahamiyati quyidagilardan iborat:

elektr energiyasi sifatini yaxshilash va reaktiv quvvatni kompensatsiyalashni amalga oshiradigan filtr-kompensatsiya qurilma ishlab chiqilgan;

ishlab chiqilgan filtr-kompensatsiya qurilmasi 0,4 kV li elektr ta'minoti tizimida qo'llanilganda elektr energiyasi isroflarini 10-15 % gacha kamayishi va bir paytning o'zida tarmoqdagi quvvat koeffitsienti 0,95 dan yuqori darajasida barqaror ushlab turishi aniqlangan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi. Tadqiqot natijalarining ishonchliligi izlanishlarning zamonaviy usul va o'lchash vositalaridan foydalangan holda o'tkazilganligi, nazariy tahlil, matematik modellashtirish, kompyuterli imitatsion tajribalar va ishlab chiqarish sharoitidagi eksperimental sinovlar o'zaro adekvatligi, bajarilgan tadqiqotlar asosida ishlab chiqilgan filtr-kompensatsiya qurilmasi sinovlarining ijobiy natijalari va amaliyotga joriy etilganligi bilan asoslanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati elektr ta'minoti tarmoqlarida quvvat va energiya isroflarining shakllanish qonuniyatlari hamda ularni kamaytirish mexanizmlari nazariy asoslanganligi, reaktiv quvvat kompensatsiyasi jarayonining matematik modeli yaratilganligi, kuchlanish va tok nosimmetriyasining elektr energiyasi sifatiga ta'sirini ifodalovchi analitik bog'lanishlar aniqlanganligi hamda ishlab chiqilgan ilmiy asoslar va ishlab chiqilgan ifodalardan turli quvvatdagi elektr ta'minoti tizimlarida filtr-kompensatsiya qurilmalarining optimal parametrlarini tanlash va ularning ish rejimlarini tahlil qilishda foydalanish mumkinligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati ishlab chiqilgan aktiv o'zgartkichli filtr-kompensatsiya qurilmasining elektr energiyasi isroflarini 10-15 % gacha kamaytirish, quvvat koeffitsientini barqaror ushlab turish, kuchlanish tebranishlarini 20-25 % gacha qisqartirish hamda elektr energiyasi sifatini me'yoriy darajada ta'minlash imkonini berishi hamda elektr tarmoqlarining ishonchliligi, barqarorligi va

energiya samaradorligi oshishi, ishlab chiqarish korxonalarida energiya ta'minoti ishonchliligi darajasi sezilarli yaxshilanishi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Elektr ta'minoti tizimlarining ishonchliligini kompensatsiyalovchi qurilmalarni qo'llash orqali oshirish bo'yicha olingan natijalar asosida:

elektr energiyasi sifat ko'rsatkichlarini yaxshilash, yuqori tartibli garmonik komponentlarni bostirish va reaktiv quvvatni optimal kompensatsiyalashni ta'minlovchi filtr-kompensatsiya qurilmasi "SULTON TEX GROUP" MCHJ ga joriy qilingan ("Hududiy elektr tarmoqlari" AJ ning 2025-yil 30-oktabrdagi 01-02-08/1645-son ma'lumotnomasi). Natijada korxonaning 0,4 kV taqsimlash tarmog'ida elektr energiyasi isroflarini 12–15 % gacha kamaytirish, kuchlanishning umumiy garmonik buzilish koeffitsientini 5–7 % gacha pasaytirish hamda quvvat koeffitsientini 0,99 gacha oshirishga erishilgan;

elektr iste'molchilarning quvvati, yuklama grafigi va tarmoq parametrlari, shuningdek garmonik tarkibini kompleks hisobga olgan holda elektr energiyasi sifatini yaxshilash va reaktiv quvvatni optimal kompensatsiyalashni ta'minlovchi algoritm, imitatsion model va dasturiy mahsulot "SULTON TEX GROUP" MCHJ ga joriy qilingan ("Hududiy elektr tarmoqlari" AJ ning 2025-yil 30-oktabrdagi 01-02-08/1645-son ma'lumotnomasi). Natijada korxonaning taqsimlash tarmog'ida elektr energiyasi yo'qotishlarini kamaytirish va elektr ta'minot tizimlarining ishonchliligini oshirish hisobiga yiliga 125 000 000 so'm iqtisodiy samaradorlikka erishilgan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Tadqiqot natijalari 5 ta ilmiy amaliy anjumanlar, shu jumladan 2 ta xalqaro va 3 ta respublika anjumanlarida aprobatsiyadan o'tgan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo'yicha 14 ta ilmiy ish, shu jumladan O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasining dissertatsiyalar asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etgan ilmiy nashrlarida 8 ta ilmiy maqola (1 ta xorijiy va 7 ta mahalliy) jurnallarda chop etilgan va 1 ta EHM dasturiga guvohnoma olingan.

Dissertatsiyaning hajmi va tuzilishi. Dissertatsiya tarkibi kirish, to'rtta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 120 betni tashkil etadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida tanlangan mavzuning dolzarbligi va zarurati asoslangan, tadqiqotning maqsad va vazifalari, ob'yekti va predmeti tavsiflangan, ularning respublika fan va texnologiyalarini rivojlantirishning ustuvor yo'nalishlariga muvofiqligi, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, olingan natijalarning ilmiy va amaliy ahamiyati yoritib berilgan, tadqiqot natijalarini amaliyotga joriy qilish, nashr etilgan ilmiy ishlar hamda dissertatsiyaning hajmi va tuzilishi bo'yicha ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning "Elektr ta'minoti tizimlari ishonchliligini ta'minlashda elektr energiyasining sifati va garmonik buzilishlarning ta'siri" deb nomlangan birinchi bobida sanoat elektr ta'minoti tizimlarida elektr energiyasi sifati

ko'rsatkichlari, ularning baholash mezonlari, yuqori garmonikalar hosil bo'lish sabablari hamda ularning transformatorlar, kabel liniyalari va kompensatsiya qurilmalariga ta'siri tahlil qilingan. Shuningdek, garmonik buzilishlarning elektr ta'minoti tizimlari ishonchliligiga ta'siri, energiya yo'qotishlarining ortishi va texnologik jarayonlar barqarorligining pasayishiga olib keluvchi omillar ilmiy asosda o'rganilgan.

Olib borilgan ilmiy adabiyotlar tahlili natijasida quyidagilar aniqlandi:

- sanoat elektr ta'minoti tizimlarida yuqori garmonikalar ta'sirini kompleks baholash bo'yicha ilmiy tadqiqotlar yetarli darajada olib borilmagan;
- noxiziqli yuklamalar (ayniqsa chastota o'zgartkichlar) ta'sirida yuzaga keladigan garmonik buzilishlarning transformator va kabel liniyalaridagi qo'shimcha energiya yo'qotishlariga ta'siri yetarli darajada hisobga olinmagan;
- elektr energiyasi sifati ko'rsatkichlarini baholashda garmonik buzilishlar va reaktiv quvvatning o'zaro bog'liqligi ko'plab hollarda to'liq inobatga olinmagan;
- kondensator batareyalari mavjud tizimlarda rezonans hodisalari va ularning elektr ta'minoti ishonchliligiga ta'siri yetarlicha chuqur o'rganilmagan;
- amaldagi usullarda elektr energiyasi sifati va tizim ishonchliligini kompleks baholash uchun yagona integral ko'rsatkichlardan foydalanish yetarli darajada rivojlantirilmagan;
- filtr-kompensatsiya qurilmalarini tanlash va hisoblashda real ekspluatatsiya sharoitlari, yuklama xarakteri va garmonik tarkib to'liq hisobga olinmagan.

Olib borilgan tahlillar asosida dissertatsiya ishining maqsad va vazifalari shakllantirilgan.

Dissertatsiyaning “Elektr ta'minoti tizimlarida reaktiv quvvat kompensatsiyasi va garmonik buzilishlarni kamaytirish usullari” deb nomlangan ikkinchi bobida elektr ta'minoti tizimlarida reaktiv quvvatni kompensatsiya qilish usullari, kondensator batareyalarining ishlash prinsipi va ularni tanlash asoslari, filtr-kompensatsiya qurilmalarining tasnifi hamda ularning garmonik buzilishlarni kamaytirishdagi samaradorligi tahlil qilingan. Shuningdek, passiv, aktiv va gibridd filtr-kompensatsiya qurilmalarining texnik xususiyatlari, ishlash algoritmlari hamda ularni sanoat elektr tarmoqlarida qo'llashning nazariy asoslari o'rganilgan.

Funksional vazifasiga ko'ra tasnifi reaktiv quvvat kompensatsiyalovchi qurilmalar quvvat omilini ($\cos\varphi$) oshirish uchun qo'llaniladi. Asosiy turlari:

- Kondensator batareyalari;
- Avtomatik bosqichli kompensatsiya tizimlari (APFC);
- Sinxron kompensatorlar;
- STATCOM.

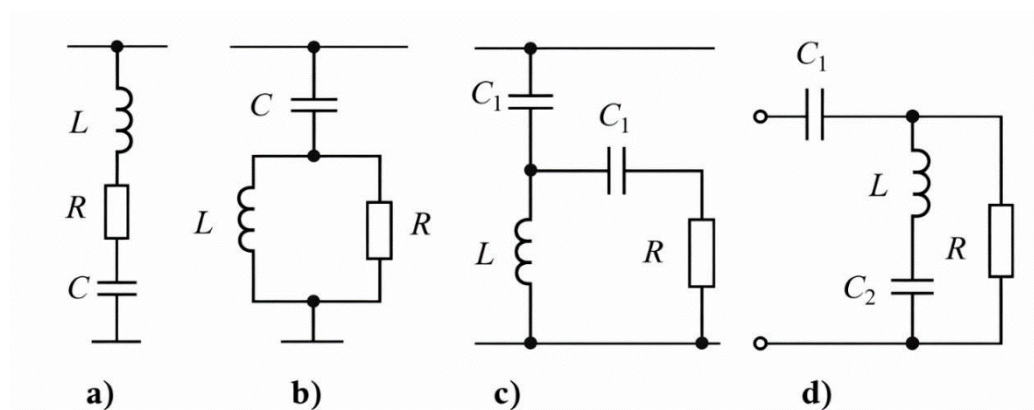
Funksional vazifasiga ko'ra filtr-kompensatsiya qurilmalari reaktiv quvvatni kompensatsiyalovchi, garmonik buzilishlarni filtrlovchi hamda kompleks ta'sirga ega bo'lgan qurilmalarga bo'linadi (1-rasm). Birinchi guruhga asosan quvvat omilini oshirishga mo'ljallangan kondensatorli tizimlar kiradi. Ikkinchi guruh qurilmalari yuqori tartibli garmonikalarni kamaytirishga xizmat qiladi. Uchinchi guruh esa reaktiv quvvat va garmonik buzilishlarni birgalikda optimallashtiruvchi kompleks filtr-kompensatsiya tizimlarini qamrab oladi.



1-rasm. Filtr-kompenstasiya qurilmalarining tasnifi

Passiv filtrlar turli konstruktiv tuzilishga ega bo'lib, ularning asosiy turlari quyidagilardan iborat: tor polosali filtrlar (ma'lum garmonikani bartaraf etishga mo'ljallangan), keng polosali filtrlar (bir nechta garmonikalarni kamaytirish uchun qo'llaniladi) hamda C-tipli filtrlar. Ushbu qurilmalar elektr tarmog'ining chastota xarakteristikasiga mos ravishda sozlanadi va garmonik toklarning ta'sirini kamaytirishga xizmat qiladi.

Tor polosali filtr (2-rasm, a) ketma-ket ulangan tebranish konturi bo'lib, u elektr tarmog'idagi ma'lum bir garmonikani bostirish hamda asosiy chastotada reaktiv quvvatni kompensatsiya qilish uchun sozlanadi. Bunday filtr odatda ma'lum tartibli garmonik toklarni kamaytirish maqsadida qo'llanadi.



2-rasm. Passiv filtr-kompenstasiya qurilmalarining asosiy konfiguratsiyalari:

a) tor polosali filtr; b) 2-tartibli keng polosali filtr; c) 3-tartibli keng polosali filtr; d) C-tipli filtr.

Tor polosali filtr yordamida bostiriladigan garmonikaga mos rezonans chastota f_r quyidagi ifoda orqali aniqlanadi:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

bunda: L – filtr induktivligi; C – filtr sig'imi.

Garmonik filtr ishlash jarayonida ma'lum miqdorda reaktiv quvvat hosil qiladi. Ushbu reaktiv quvvat quyidagi tenglama orqali aniqlanadi:

$$Q = \frac{n^2}{n^2-1} Q_K \quad (2)$$

bunda: n – filtr sozlangan garmonika tartibi; Q_K – filtr tarkibidagi kondensatorlarning reaktiv quvvati.

Filtrning o'tkazish polosasi nisbiy birliklarda quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$\Delta = \frac{f_1-f_0}{f_0} = \frac{1}{q} = \frac{r}{X_0} \quad (3)$$

bunda: Δ – filtrning o'tkazish polosasi kengligi; q – filtrning asllik koeffitsienti; r – rezonans konturining aktiv qarshiligi; X_0 – rezonans konturining reaktiv qarshiligi.

Masalan, 7-garmonika kuchlanishini filtrlash zarur bo'lganda, unga yaqin joylashgan 5-garmonika mavjud bo'lsa, odatda ikkita tor polosali filtrdan iborat filtr bloki o'rnatiladi. Bu filtrlarning biri 5-garmonikaga, ikkinchisi esa 7-garmonikaga sozlanadi.

Dissertatsiyaning “**Korxonalar elektr ta'minoti uchun filtr kompensatsiya qurilmasini ishlab chiqish**” deb nomlangan uchinchi bobida ip yigiruv korxonasining texnologik jarayonlar zanjiri o'rganilgan. Korxonada o'rnatilgan RSB-D 45 va SB-D 45 turidagi piltalash mashinalarining elektr yuritmalarida texnologik jarayonni barqaror boshqarish hamda ishlab chiqarish unumdorligini oshirish maqsadida 11 kVt nominal quvvatga ega chastota o'zgartkichlar qo'llaniladi.



3-rasm. Korxona elektr tarmog'ida tok garmonikalarining spektral taqsimoti va umumiy garmonik buzilish koeffitsiyenti (THD) qiymatlari

Ushbu elektr yuritmalar impuls-kenglik modulyatsiyasi (PWM) printsipli asosida ishlashi sababli elektr tarmog'ida yuqori chastotali elektromagnit buzilishlar hamda garmonik tok komponentlari hosil bo'lishiga olib keladi. Natijada elektr ta'minoti tizimida elektromagnit buzilishlarning paydo bo'lishi, kabel liniyalari bo'ylab yuqori chastotali toklarning tarqalishi hamda avtomatika va boshqaruv zanjirlarida noto'g'ri ishlash holatlari kuzatilishi mumkin.

O'lchov natijalariga ko'ra elektr tarmog'ida garmonik tok komponentlarining sezilarli darajada mavjudligi aniqlangan (3-rasm).

1-jadval

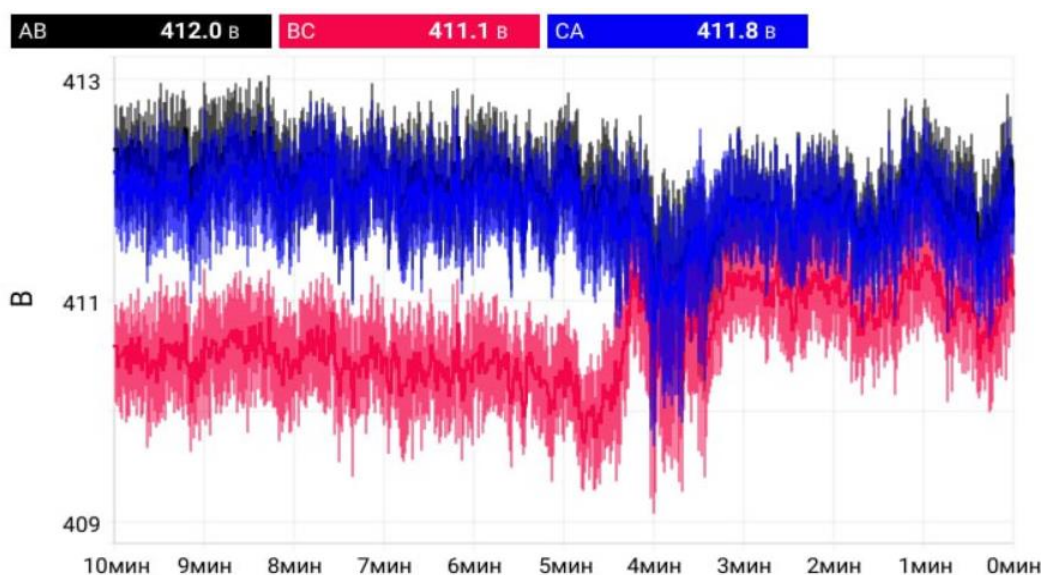
Elektr tarmog'idagi garmonik tok komponentlarining spektral tahlili

Garmonika tartibi	A faza (%)	B faza (%)	C faza (%)
DC	0	0	0
3	1.1	0.9	1.3
5	24.2	24.8	26.1
7	14.1	14.5	15.0
9	0.5	0.4	0.6
11	4.8	4.6	4.9
13	4.2	4.0	4.3
15	0.6	0.5	0.7
17	2.1	2.0	2.2
19	1.8	1.7	1.9
21	0.6	0.5	0.7
23	0.9	0.8	1.0
25	0.6	0.5	0.7
27	0.4	0.3	0.5
29	0.3	0.3	0.4
31	0.2	0.2	0.3
33-49	<0.2	<0.2	<0.2

Mazkur qiymatlar elektr energiyasi sifati bo'yicha GOST 32144-2013 va IEC 61000 standartlarida belgilangan ruxsat etilgan 5 % chegaradan bir necha baravar yuqori ekanligini ko'rsatadi (1-jadval).

O'lchov natijalarida transformator va kabel liniyalarining garmonik yuklanish darajasini baholovchi K-faktor qiymati ham aniqlangan. Tahlil natijalariga ko'ra K-faktor qiymati fazalar bo'yicha quyidagicha bo'ldi:

$$K_A = 24.1, \quad K_B = 24.2, \quad K_C = 27.1$$



4-rasm. Korxona elektr ta'minoti tizimida liniya kuchlanishlarning vaqt bo'yicha o'zgarish grafigi

K-faktor qiymatlarining 20 dan yuqori bo'lishi elektr tarmog'ida yuqori garmonik yuklama mavjudligini bildiradi (4-rasm). Bu holat transformator

chulgʻamlarining ortiqcha qizishiga, kabel izolyatsiyasining tez eskirishiga hamda kondensator batareyalarining shikastlanishiga olib kelishi mumkin.

Korxonada piltalash (RSB-D 45 va SB-D 45) qurilmalarining elektr yuritmalarini tezlik boʻyicha rostlash maqsadida 11 kVt nominal quvvatli chastota oʻzgartkichlar qoʻllanilganda, tarmoqqa uzatiladigan elektromagnit buzilishlar va yuqori chastotali tok komponentlari sababli kirish zanjirida passiv EMI/RFI filtr oʻrnatish talabi yuzaga keladi. Chastota oʻzgartkich kirish quvvati P_{in} uning foydali ish koʻeffitsiyenti η_{vfd} orqali aniqlanadi:

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta_{vfd}} = \frac{11}{0,96} = 11,46 \text{ kVt} \quad (4)$$

Uch fazali tarmoqda asosiy garmonik boʻyicha liniya toki I_1 quyidagicha topiladi:

$$I_1 = \frac{P_{in}}{\sqrt{3}U_{LL}PF_1}. \quad (5)$$

$U_{LL} = 380 \text{ V}$ hamda toʻgʻrilagichli kirish bosqichi uchun $PF_1 = 0.95$ qabul qilinganda $I_1 \approx 18.3 \text{ A}$ ga teng.

Chastota oʻzgartkich diodli 6-pulsli toʻgʻrilagichga ega boʻlgani uchun garmoniklar spektri $h = 6k \pm 1$ (5-, 7-, 11-, 13-...) koʻrinishida shakllanadi va tokning umumiy garmonik buzilish koʻeffitsiyenti THD_I ortadi. RMS tokning oʻsishi:

$$I_{rms} = I_1 \sqrt{1 + THD_I^2} \quad (6)$$

munosabat bilan baholanadi.

$THD_I = 0.45$ qabul qilinganda:

$$I_{rms} = 18.3 \sqrt{1 + 0.45^2} \approx 20.1 \text{ A} \quad (7)$$

hosil boʻladi. Filtr elementlari issiqlik rejimi va uzluksiz ish sharoitida tok boʻyicha zaxira koʻeffitsiyenti k_I bilan tanlanadi:

$$I_{filter} \geq k_I I_{rms}. \quad (8)$$

Sanoat sharoitida $k_I = 1.25$ qabul qilinganda:

$$I_{filter} \geq 1.25 \cdot 20.1 \approx 25.1 \text{ A}$$

talab etiladi. Schaffner FN3258-30-33 filtring nominal toki $I_N = 30 \text{ A}$ boʻlib, u hisoblangan 25.1 A talabni qoplaydi va issiqlik hamda ekspluatatsion zaxirani taʼminlaydi.

Kuchlanish boʻyicha tanlash sharti $U_N \geq U_{LL} \cdot k_U$ koʻrinishida ifodalanadi, bunda k_U tarmoq kuchlanishining ogʻishi va oʻtkinchi jarayonlar zaxirasini bildiradi.

EMI filtring fizik mazmuni PWM kommutatsiyasi natijasida yuzaga keladigan yuqori dv/dt va di/dt frontlari sababli shakllanuvchi yuqori chastotali oʻtkazuvchan buzilish toklarini (I_{CM} va I_{DM}) pasaytirishdan iborat. Oʻtkazuvchan buzilish toklarining yuqori chastotali komponentlari ekvivalent impedanslar orqali:

$$I_{noise}(f) = \frac{V_{noise}(f)}{Z_{source}(f) + Z_{filter}(f) + Z_{load}(f)} \quad (9)$$

koʻrinishida tavsiflanadi; filtr qoʻshilganda $Z_{filter}(f)$ ning chastotaga bogʻliq oʻsishi yuqori f sohalarda $I_{noise}(f)$ ni kamaytiradi. Natijada kabel boʻylab tarqaluvchi oʻtkazuvchan buzilish, boshqaruv zanjirlarida notoʻgʻri triggerlanish, PLC/sensor signallarida xatoliklar hamda qoʻshni uskunalarga elektromagnit taʼsir pasayadi.

Shu tariqa, tok boʻyicha: $I_{filter} \geq 25.1 \text{ A}$

Kuchlanish bo'yicha 3×480 V darajadagi zaxira hamda chastota o'zgartgichlar kommutatsiyasidan kelib chiquvchi yuqori chastotali buzilishlarni bostirish talablari asosida 30 A nominalga ega passiv EMI/RFI filtrning har bir 11 kVt chastota o'zgartkich kirishiga o'rnatilishi texnik jihatdan asoslangan yechim sifatida rasmiylashtiriladi.

Filtrning optimal parametrlari L_f , C_f , R_f quyidagi funksionalni minimallashtirish orqali aniqlanadi:

$$\Phi(L_f, C_f, R_f) = \alpha_1 \sum_{h \in H} \left(\frac{I_h^{(f)}}{I_h^{(0)}} \right)^2 + \alpha_2 \left(\frac{Q_f - Q_{req}}{Q_{req}} \right)^2 + \alpha_3 \left(\frac{f_{res} - f_h}{f_h} \right)^{-2} + \alpha_4 \frac{P_{loss}}{P_{base}} + \alpha_5 \left(\frac{THD_U - THD_{U,lim}}{THD_{U,lim}} \right)^2 \rightarrow \min \quad (10)$$

Bunda: $I_h^{(0)}$ – filtrsiz holdagi h-garmonika toki; $I_h^{(f)}$ – filtr ulangan holatdagi h-garmonika toki; Q_f – filtrning reaktiv quvvati; Q_{req} – talab etilgan kompensatsiya quvvati; f_{res} – tizimning haqiqiy rezonans chastotasi; P_{loss} – filtr elementlaridagi aktiv yo'qotish; P_{base} – bazaviy aktiv quvvat; THD_U – kuchlanish bo'yicha to'liq garmonik buzilishi; $THD_{U,lim}$ – ruxsat etilgan THD chegarasi; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ – vazn koeffitsiyentlari

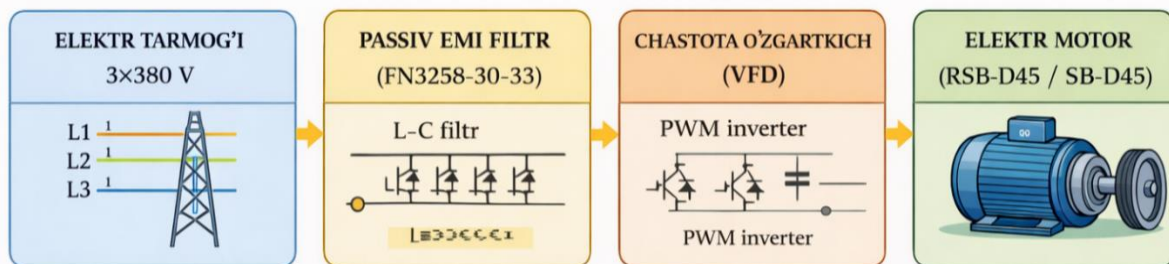
Integral optimal parametr tanlash formulasi

$$J(L_f, C_f, R_f) = \sum_{h \in H} \beta_h \left| \frac{Z_{sys,h}}{Z_{sys,h} + Z_{f,h}} \right|^2 + \gamma_1 \left(\frac{Q_f - Q_{req}}{Q_{req}} \right)^2 + \gamma_2 \left(\frac{THD_I}{THD_{I,lim}} \right)^2 + \gamma_3 \left(\frac{P_{loss}}{P_{base}} \right) + \gamma_4 \left(\frac{\Delta U}{\Delta U_{lim}} \right)^2 \rightarrow \min \quad (11)$$

Bunda β_h – har bir garmonikaning vazn koeffitsiyenti; $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ – optimallashtirish vaznlari; ΔU – kuchlanish og'ishi

Yuqorida keltirilgan muammolardan kelib chiqib, korxona elektr ta'minoti tizimi uchun Schaffner FN3258-30-33 turidagi passiv EMI filtr tanlandi va mazkur filtr quyidagi texnik xarakteristikalariga ega:

- nominal tok: 30 A
- maksimal ish kuchlanishi: 3×480 V AC
- ish chastotasi: 0–60 Hz
- elektromagnit buzilishlarni bostirish diapazoni: 150 kHz – 30 MHz
- ruxsat etilgan ortiqcha yuklama: 1,5 In (1 minut)
- ish harorati diapazoni: $-25^\circ\text{C} \div +100^\circ\text{C}$.



5-rasm. RSB-D45 (SB-D45) mashinasining elektr yuritma tizimining strukturaviy sxemasi

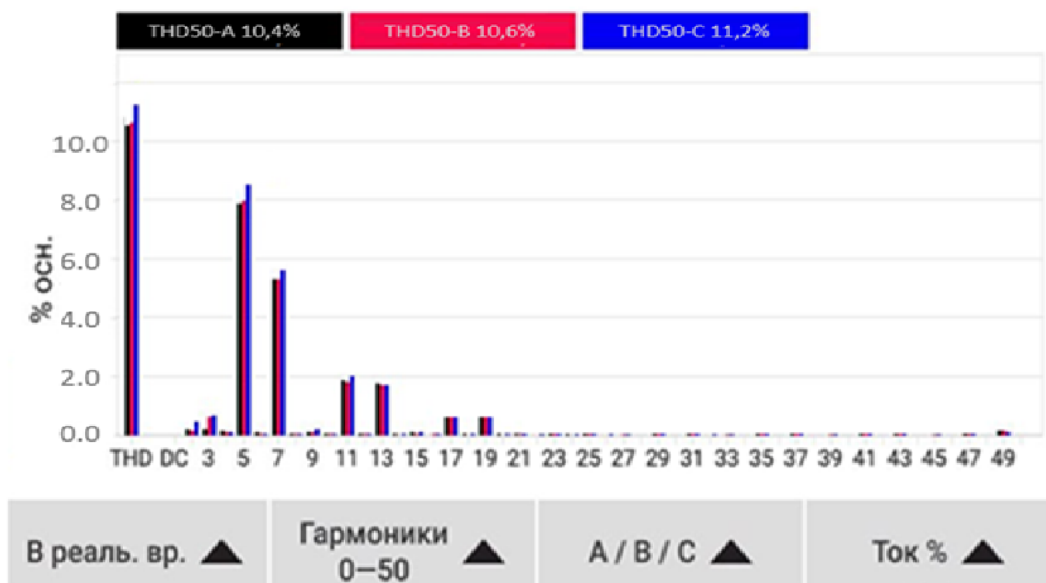
Mazkur filtr 100 kHz – 1 MHz chastota diapazonida elektromagnit buzilishlarni 40–70 dB gacha kamaytirish imkoniyatiga ega. Filtr qurilmasi chastota o'zgartkichning kirish qismiga quyidagi ketma-ketlikda ulanadi (5-rasm):

Elektr tarmog'i → passiv EMI filtr → chastota o'zgartkich → elektr motor

6-rasmda korxona elektr ta'minoti tizimida yuqori tartibli 5- va 7-garmonikalarni bostirish hamda reaktiv quvvatni kompensatsiya qilish uchun qo'llanilgan passiv filtr-kompensatsiya qurilmasi keltirilgan. Qurilma tarkibiga drossel, kondensator batareyalari va himoya-kommutatsiya elementlari kiradi. Mazkur qurilma elektr tarmog'ida garmonik buzilishlarni kamaytirish, quvvat koeffitsiyentini oshirish, kuchlanish sifatini yaxshilash va elektr ta'minoti tizimining ishonchligini ta'minlash imkonini beradi.

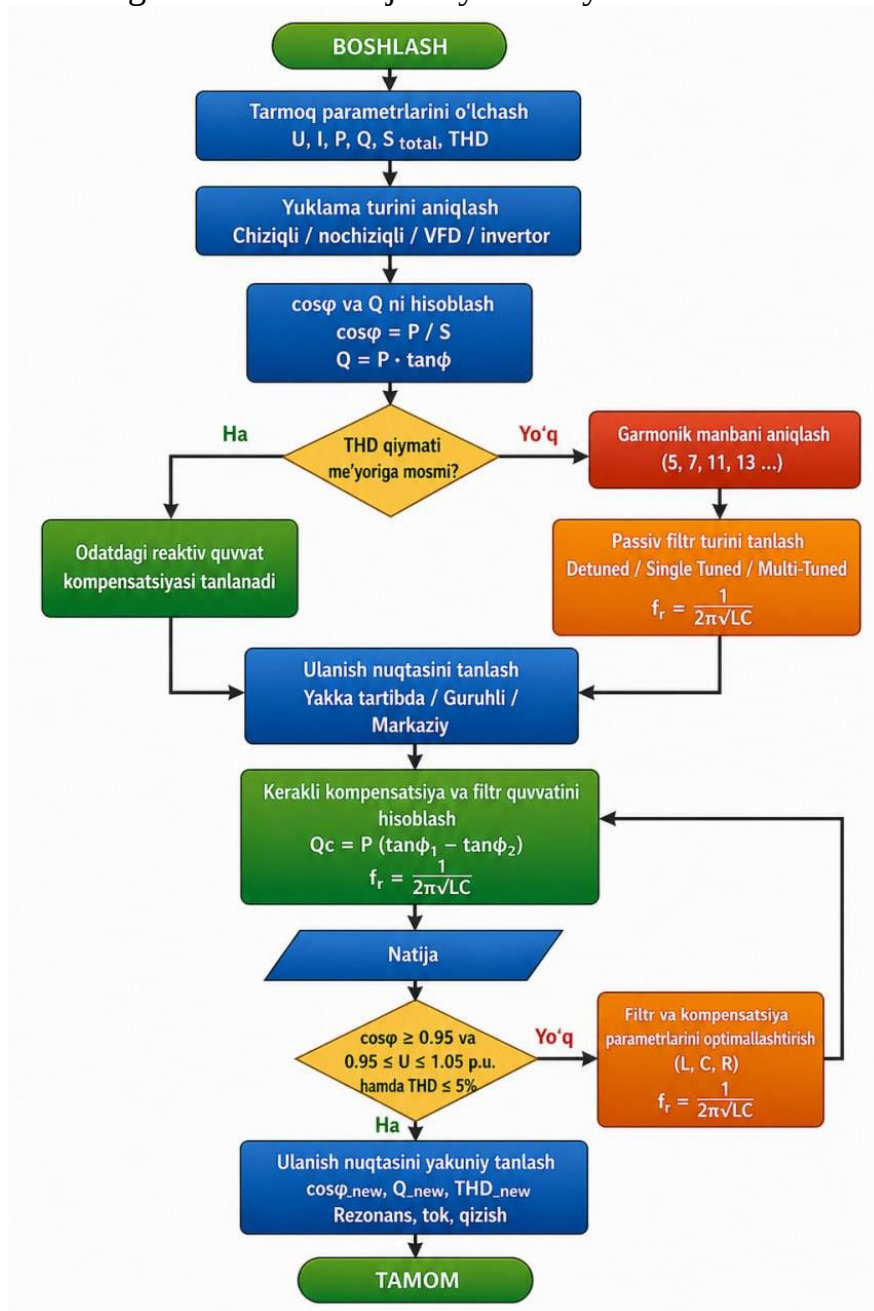


6-rasm. 5 va 7-garmonikaga sozlangan passiv filtr-kompensatsiya qurilmasi



7-rasm. Elektr tarmog'idagi tok garmonikalarining spektri va THD ko'rsatkichlari

Taklif etilgan filtr-kompensatsiya qurilmasida induktivlikning optimal tanlanishi natijasida chulg'am o'ramlar soni kamaytirilgan, bu esa aktiv qarshilik va mis yo'qotishlarining sezilarli pasayishiga olib kelgan. Rezonans chastotalarning aniq sozlanishi orqali 5 va 7-garmonikalar selektiv bostiriladi, natijada tarmoqdagi garmonik toklar kamayib, transformator va kabel liniyalaridagi issiqlik yo'qotishlari qisqaradi. Shu bilan birga, quvvat koeffitsiyenti oshadi, qurilma ixcham va modulli tuzilishga ega bo'lib, ekspluatatsiya va texnik xizmat ko'rsatish qulaylashadi. Umuman olganda, qurilma energiya yo'qotishlarini kamaytirish, ishonchlilikni oshirish va yuqori foydali ish koeffitsiyentini ta'minlash orqali elektr ta'minoti tizimining umumiy energetik samaradorligini sezilarli darajada yaxshilaydi.



8-rasm. Passiv filtr-kompensatsiya qurilmasini tanlashning blok-sxemasi

Uch fazali elektr tarmog'ida tok garmonikalarining spektral tahlili natijalari 7-rasmda keltirilgan. Grafikdan ko'rinib turibdiki, A, B va C fazalaridagi tokning

umumiy garmonik buzilish koeffitsienti mos ravishda $THD_A = 10,4 \%$, $THD_B = 10,6 \%$ va $THD_C = 11,2 \%$ ni tashkil etadi. Bu qiymatlar elektr tarmog'ida sezilarli darajada nochiziqli yuklamalar mavjudligini ko'rsatadi. Garmonik spektrning tahlili shuni ko'rsatadiki, buzilishlarning asosiy qismi 5- va 7-tartibli garmonikalar hissasiga to'g'ri keladi. Grafikda 5-garmonikaning amplitudasi taxminan 16–17 %, 7-garmonikaniki esa 9–10 % atrofida ekanligi kuzatiladi. Bundan tashqari, 11- va 13-tartibli garmonikalar ham mavjud bo'lib, ularning ulushi nisbatan kichik – 2–3 % atrofida. Yuqori tartibli garmonikalar (17 va undan yuqori) esa juda kichik qiymatga ega bo'lib, umumiy buzilish ko'rsatkichiga katta ta'sir ko'rsatmaydi.

Filtr-kompensatsiya qurilmasini tanlash va parametrlarini aniqlash algoritmi ishlab chiqildi (8-rasm). Mazkur algoritmda elektr tarmog'i parametrlarini o'lchash (U, I, P, Q, S, THD), yuklama turini aniqlash (chiziqli, nochiziqli, VFD va inverterli yuklamalar), quvvat koeffitsiyenti ($\cos\varphi$) va reaktiv quvvatni hisoblash, THD ko'rsatkichining me'yoriy qiymatlarga mosligini tekshirish, garmonikalar manbasini aniqlash (5-, 7-, 11-, 13-garmonikalar), passiv filtr turini tanlash, filtrning rezonans chastotasini aniqlash, filtr-kompensatsiya qurilmasining ulanish nuqtasini tanlash (individual, guruhli va markazlashgan), talab etilgan kompensatsiya quvvatini hisoblash hamda filtr parametrlarini (L, C, R) optimallashtirish jarayonlari hisobga olingan. Algoritm asosida $\cos\varphi \geq 0.95$, $0.95 \leq U \leq 1.05$ p.u. va $THD \leq 5\%$ shartlari ta'minlanishi nazarda tutilgan.

Dissertatsiyaning **“Filtr-kompensatsiya qurilmasi modelini ishlab chiqish va ishonchliligini baholash”** deb nomlangan to'rtinchi bobida Korxonalar elektr ta'minoti tizimlarida yuqori garmonik tarkiblarini passiv filtrlashning imitasion modeli ishlab chiqilgan.

Ip yigiruv korxonasidagi inverterli va yarimo'tkazgichli yuklamalar natijasida tok quyidagi Fourier qatori ko'rinishida ifodalanadi:

$$i(t) = \sum_{h \in H} I_h \sqrt{2} \sin(h\omega_1 t + \varphi_h) \quad (12)$$

Har bir garmonikada korxona yuklamasining kompleks o'tkazuvchanligi:

$$Y_{L,h} = G_{L,h} + jB_{L,h} \quad (13)$$

5- va 7-garmonikalar uchun alohida ketma-ket sozlangan LC shoxobchalar qabul qilinadi. Ularning to'la qarshiligi:

$$Z_5(h) = R_5 + j \left(h\omega_1 L_5 - \frac{1}{h\omega_1 C_5} \right) \quad Z_7(h) = R_7 + j \left(h\omega_1 L_7 - \frac{1}{h\omega_1 C_7} \right) \quad (14)$$

bunda h – garmonika tartibi.

Tok taqsimlanish koeffitsiyenti yordamida tarmoqqa o'tuvchi h -garmonik tok:

$$I_{S,h} = I_h \left| \frac{Y_{L,h}}{Y_{\Sigma,h}} \right| \quad (15)$$

13 ta yuqori garmonika filtrlari uchun sozlash sharti maqsadli diapazonda olinadi:

$$\omega_{r,k} = \frac{1}{\sqrt{L_{F_k} C_{F_k}}}, \quad \omega_{r,k} \in [\omega_{11}, \omega_n] \quad (16)$$

Taklif etilgan tizim samaradorligi quyidagicha baholanadi:

$$\eta_f = \alpha_1 \frac{THD_{I0} - THD_I}{THD_{I0}} + \alpha_2 \frac{THD_{U0} - THD_U}{THD_{U0}} + \alpha_3 \frac{\cos\varphi' - \cos\varphi_0}{1 - \cos\varphi_0} \quad (17)$$

bunda $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – vazn koeffitsiyentlari, ya'ni har bir mezonning ahamiyat darajasini belgilaydi; THD_{I0} – boshlang'ich tok garmonik buzilishi; THD_I – filtrdan keyingi tok THD.

Taklif etilayotgan tizim parametrlarini optimallashtirish funksiyasi:

$$J = \beta_1 THD_I + \beta_2 THD_U + \beta_3 \frac{P_{loss}}{P_1} + \beta_4 \left(\frac{Q_{res}}{Q_0} \right)^2 + \beta_5 \sum_{h \in \{5,7\}} \left(\frac{I_{s,h}}{I_{0,h}} \right)^2 \rightarrow \min \quad (18)$$

bunda $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ – vazn koeffitsiyentlari, bular har bir mezonning qanchalik muhimligini ko'rsatadi.

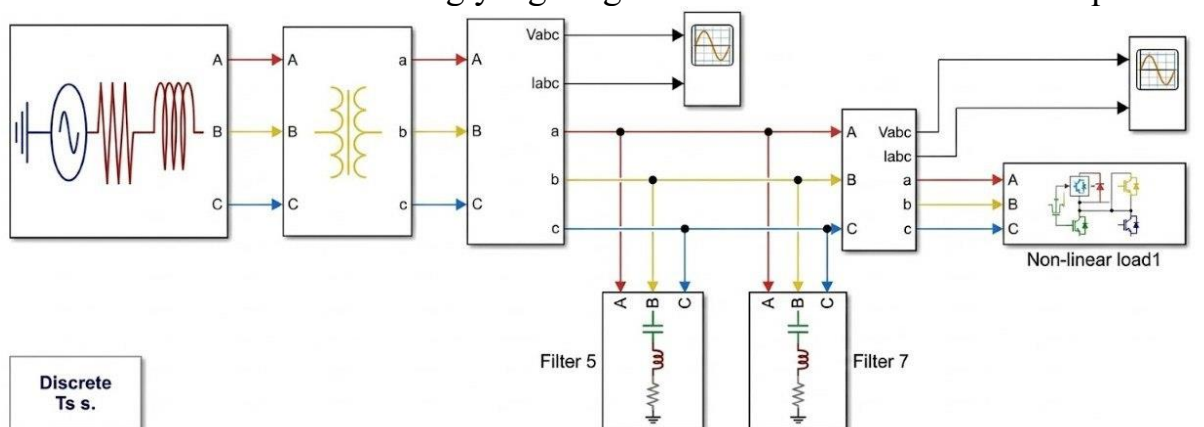
Cheklovlar:

$$\begin{aligned} THD_U &\leq THD_{U,lim}, \\ THD_I &\leq THD_{I,lim} \\ \cos\varphi' &\geq \cos\varphi_{min} \\ 0 &< L_5, L_7, L_{F_k}, C_5, C_7, C_{F_k} \end{aligned} \quad (19)$$

Ko'rib chiqilayotgan ip yigiruv korxonasining elektr ta'minoti tizimi 6/0,4 kV kuchlanishli va 630 kVA quvvatli transformator orqali ta'minlanadi. Transformatorning past kuchlanish tomonida reaktiv quvvatni kompensatsiyalash uchun 2 ta 150 kVAr quvvatli UKRM kondensator qurilmasi o'rnatilgan. Ushbu qurilma induktiv yuklamalar natijasida hosil bo'ladigan reaktiv quvvatni qisman kompensatsiyalaydi. Biroq tarmoqda nochiziqli yuklamalar mavjud bo'lganligi sababli kondensator qurilmalarida rezonans hodisasi yuzaga kelishi va garmonik buzilishlarning ortishi ehtimoli mavjud. Shu sababli kondensator batareyasi asosida passiv filtr parametrlarini aniqlash muhim hisoblanadi.

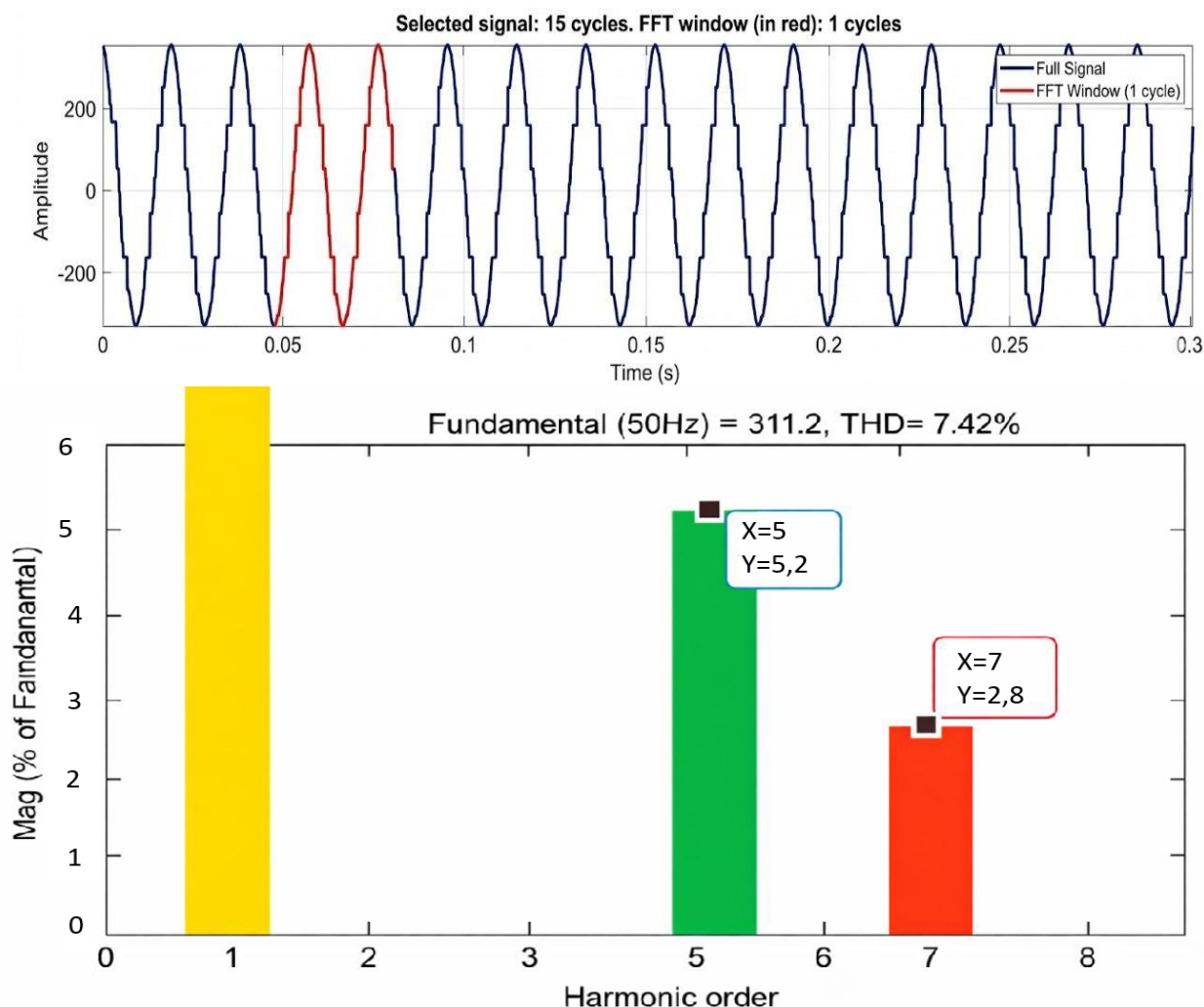
Elektr ta'minoti tizimining ishlab chiqilgan imitatsion modeli asosida nochiziqli yuklama ulangan holatda tarmoqning ish rejimi MATLAB Simulink muhitida o'rganildi. Modellash jarayonida tizimda hosil bo'ladigan tok va kuchlanish shakllari hamda ularning garmonik tarkibi aniqlash maqsadida osillogrammalar va spektral tahlil natijalari olindi.

Mazkur tadqiqot ishida elektr ta'minoti tizimi uchun 5- va 7-tartibli garmonikalarni kamaytirishga mo'ljallangan ikki bosqichli passiv filtrlar qo'llanildi. Filtr parametrlarini aniqlash natijalari avvalgi bo'limlarda hisoblab chiqilgan bo'lib, ular asosida elektr ta'minoti tizimining yangilangan imitatsion modeli ishlab chiqildi.



9-rasm. 5 va 7 tartibli garmonikalarni bostirish uchun passiv filtrlar o'rnatilgan elektr ta'minoti tizimining imitatsion modeli

9-rasmda elektr ta'minoti tizimining passiv filtrlar o'rnatilgan holatdagi imitatsion modeli keltirilgan. Mazkur model MATLAB Simulink muhitida ishlab chiqilgan bo'lib, u elektr energiyasi manbai, transformator, liniya elementlari, nochiziq yuklama hamda garmonik filtr bloklaridan tashkil topgan.



10-rasm. 5 va 7 garmonikalar uchun sozlangan passiv filtrlar qo'llanilganda bir faza kuchlanishining osillogrammasi va spektri

Olingan natijalar passiv filtrlar elektr ta'minoti tizimidagi garmonik buzilishlarni kamaytirishda samarali texnik vosita ekanligini ko'rsatadi. Filtrlar qo'llanilishi natijasida kuchlanish va tok shakllarining sinusoidal shaklga yaqinlashishi hamda garmonik komponentalarning kamayishi kuzatildi. Bu esa elektr energiyasi sifati ko'rsatkichlarini sezilarli darajada yaxshilash imkonini beradi. Olingan natijalar 10 va 10-rasmlarda keltirilgan.

2-jadval

Passiv filtrlarni qo'llash natijasida elektr energiyasi sifati ko'rsatkichlarining o'zgarishi

Holat	k_I , %	k_{I5} , %	k_{I7} , %	k_U , %	k_{U5} , %	k_{U7} , %	U , V	I , A	$\cos\varphi$
Filtrsiz	19.64	16.8	9.21	17.30	11.5	8.81	362	149	0.87
Passiv filtr bilan	5.5	4.0	2.2	7.4	2.8	2.3	370	146	0.93

2-jadvalda keltirilgan modellashtirish natijalari passiv filtr-kompensatsiya qurilmasi qo'llanilgandan so'ng elektr energiyasi sifati ko'rsatkichlari sezilarli darajada yaxshilanganligini ko'rsatadi. Xususan, tok va kuchlanishdagi yuqori garmonik komponentalar ulushi sezilarli darajada kamaygan. Bu esa elektr ta'minoti tizimining ish rejimini barqarorlashtirish va elektr uskunalarining ishonchli ishlashini ta'minlashga xizmat qiladi.

Olingan o'lchov natijalari asosida elektr energiyasi sifati ko'rsatkichlari aniqlanib, ular MATLAB Simulink muhitida ishlab chiqilgan imitatsion model natijalari bilan solishtirildi. Taqqoslash jarayonida kuchlanishning umumiy garmonik buzilish koeffitsiyenti, tok garmonik buzilish koeffitsiyenti hamda alohida garmonik komponentalar ulushi tahlil qilindi.

3-jadval

Real o'lchov va imitatsion modellashtirish natijalarini taqqoslash

Ko'rsatkich	Real o'lchov	Imitatsion model	Farq, %
Kuchlanish THD, %	16.8	17.3	2.9
Tok THD, %	19.6	18.9	3.6
5-garmonika ulushi, %	11.5	10.9	5.2
7-garmonika ulushi, %	8.8	8.2	6.8
Tok qiymati, A	149	146	2.0
Kuchlanish, V	362	365	0.8

3-jadvalda keltirilgan natijalar real o'lchovlar bilan imitatsion modellashtirish natijalari o'rtasidagi farq nisbatan kichik ekanligini ko'rsatadi. Ko'pchilik ko'rsatkichlar bo'yicha farq 3–7 % oralig'ida bo'lib, bu ishlab chiqilgan matematik modelning elektr ta'minoti tizimining real ish rejimiga yetarlicha mos kelishini ko'rsatadi.

Filtr-kompensatsiya qurilmalarini qo'llash natijasida elektr ta'minoti tizimining energiya samaradorligi sezilarli darajada oshdi. 5 va 7-garmonikalarni so'ndiruvchi passiv filtrlar joriy etilishi hisobiga quvvat koeffitsiyenti 0,98 gacha yaxshilandi, tok yuklanishlari kamaydi hamda transformator va kabel liniyalaridagi energiya yo'qotishlari qisqardi. Shu bilan birga, garmonik buzilishlarning kamayishi elektr uskunalarining qizishini pasaytirib, ularning ishonchliligini oshirdi va xizmat muddatini uzaytirdi.

Iqtisodiy jihatdan baholaganda, texnik xizmat va ta'mir xarajatlarining kamayishi, avariya va uzilishlarning qisqarishi hamda energiya yo'qotishlarining kamayishi natijasida yiliga 125,0 mln so'm iqtisodiy samaradorlikka erishildi. Kapital xarajatlarning qoplanish muddati 0,57 yil (taxminan 6,8 oy) ni tashkil etib, ushbu yechimning yuqori samaradorligini tasdiqlaydi.

XULOSA

“Elektr ta'minoti tizimlarining ishonchliligini kompensatsiyalovchi qurilmalarni qo'llash orqali oshirish” mavzusidagi texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiya ishi bo'yicha olib borilgan tadqiqotlar natijalari asosida quyidagi xulosalar taqdim etilgan:

1. Korxonalarning elektr ta'minoti tizimlarida reaktiv quvvat iste'moli va garmonik buzilishlar energiya samaradorligini pasaytiruvchi asosiy omillardan biri ekanligi aniqlandi. Asinxron motorlar, transformatorlar, chastota o'zgartkichlar va boshqa induktiv hamda nohiziqli yuklamalar tarmoqda qo'shimcha reaktiv quvvat oqimlarini hosil qilib, quvvat koeffitsiyentining kamayishi, kuchlanish rejimining yomonlashuvi hamda uzatish liniyalari va transformatorlarda qo'shimcha aktiv quvvat yo'qotishlariga olib keladi.

2. "Sulton tex group" MCHJ ip yigiruv korxonasi elektr ta'minoti tizimi misolida texnologik uskunalar va ularning tarmoqqa ta'siri o'rganildi. Tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, SB-D45, RSB-D45, RIETER C70, RIETER K42 va Murata QPRO EX liniyalarida qo'llanilgan chastota o'zgartkichlar yuqori garmonikalar manbai hisoblanadi. O'lchovlar natijasida filtr qo'llanilishidan oldin tokning umumiy garmonik buzilish koeffitsiyenti 28,7–30,9 % gacha yetgani aniqlanib, elektr energiyasi sifati yomonlashgani tasdiqlandi.

3. Tadqiqot natijasida 5 va 7-garmonikalarni bostirishga mo'ljallangan filtr-kompensatsiya qurilmasi ishlab chiqildi hamda optimal parametrlari asoslandi. Qurilmada $L_5 \approx 0,136$ mH va $L_7 \approx 0,069$ mH, har bir bosqich uchun 150 kVAr kondensator quvvati tanlandi. Natijada THDI 20–35 % dan 5–7 % gacha kamaydi, $\cos\varphi$ 0,78–0,82 dan 0,95–0,97 gacha oshdi, aktiv yo'qotishlar esa 10–15 % ga kamaygan. Natijada tizimning energiya samaradorligi va ishonchliligi sezilarli yaxshilandi.

4. MATLAB Simulink muhitida o'tkazilgan modellash natijasida filtr-kompensatsiya qurilmasining samaradorligi tasdiqlandi. Hisoblashlarda $C_p \approx 2200$ μ F, $L_5 \approx 0,18$ mH va $L_7 \approx 0,094$ mH qabul qilindi. Natijada tok buzilishi 19,64 % dan 5,5 % gacha, kuchlanish buzilishi 17,30 % dan 7,4 % gacha kamaydi, $\cos\varphi$ esa 0,87 dan 0,93 gacha oshdi.

5. MATLAB Simulink muhitida ishlab chiqilgan imitatsion modelning adekvatligi real o'lchov ma'lumotlari bilan taqqoslash orqali tasdiqlandi. Natijalarga ko'ra farq 3–7 % dan oshmadi, RMSE = 0,82 va NSE = 0,91 qiymatlar modelning yuqori aniqligini ko'rsatdi. Shuningdek, 5 va 7-garmonikalar ulushi model va real tizimda mos kelishi aniqlandi.

6. Hisob-kitoblar asosida yillik iqtisodiy samara $S_{yil} = 125$ mln so'mni tashkil etib, umumiy kapital xarajat $K = 70,7$ mln so'm bo'lgan holda qurilmaning qoplanish muddati $T \approx 0,57$ yil ($\approx 6,8$ oy) ni tashkil etdi. Bu natijalar filtr-kompensatsiya qurilmalarining yuqori samarador va tez qoplanadigan texnik yechim ekanligini tasdiqlaydi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ
ДОКТОРА НАУК DSc.05/2025.28.11.T.02.01 ПРИ ИНСТИТУТЕ ПРОБЛЕМ
ЭНЕРГЕТИКИ АКАДЕМИИ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ЭНЕРГЕТИКИ АН РУз

МУРТАЗОВ ШЕРЗОД ИСАКБАЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЗА
СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ**

05.05.01 – Энергетические системы и комплексы

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

Ташкент – 2026

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Академии наук Республики Узбекистан под номером B2025.4.PhD/T6206.

Диссертация выполнена в Институте проблем энергетики АН РУз.

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

Научный руководитель:

Толипов Жамшид Нурбекович
доктор философии по техническим наукам,
старший научный сотрудник

Официальные оппоненты:

Хамидов Шухрат Вахидович
доктор технических наук, профессор

Халикназаров Уролбой Абдурахманович
доктор философии технических наук, доцент

Ведущая организация:

Бухарский государственный технический университет

Защита диссертации состоится «14» августа 2026 г. в часов на заседании Научного совета DSc.05/2025.28.11.T.02.01 при Институте проблем энергетики Академии наук Республики Узбекистан (Адрес: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 40. Тел.: (+998 55) 520-01-52, e-mail: energetika_in@umail.uz

С диссертацией можно ознакомиться в информационно-ресурсном центре Института проблем энергетики Академии наук Республики Узбекистан (Адрес: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 40. Тел.: (+998 55) 520-01-52)

Автореферат диссертации разослан «28» июля 2026 года.

(Реестр протокола рассылки № 5 от «27» июля 2026 г.)



Х.М. Муратов

Председатель Научного совета по
присуждению ученой степени, доктор
технических наук, профессор

К.Ш. Кадиров

В.и.о. ученого секретаря Научного совета по
присуждению учёных степеней, доктор
технических наук, старший научный
сотрудник

О.Х. Ишназаров

Председатель Научного семинара при
Научном совете по присуждению ученой
степени доктора наук, доктор технических
наук, профессор

Введение (аннотация докторской (PhD) диссертации)

Актуальность и необходимость темы диссертации. В мире особое внимание уделяется вопросам применения энерго- и ресурсосберегающих технологий, а также современных технических средств для улучшения показателей качества электрической энергии, компенсации реактивной мощности и подавления гармоник тока с помощью фильтрующих устройств. «В мировом масштабе производится более 30121729 ГВт·ч электрической энергии»¹, и при обеспечении бесперебойной передачи произведённой электроэнергии потребителям надёжность систем электроснабжения приобретает важное значение, что, в свою очередь, требует повышения качества поставляемой электрической энергии, компенсации реактивной мощности в сетях 0,4 кВ и внедрения фильтро-компенсирующих устройств в практику эксплуатации. В этой связи большое внимание уделяется процессам приведения показателей качества электрической энергии, обусловленных воздействием нелинейных нагрузок, к нормативным значениям, а также широкому применению пассивных преобразователей и автоматически регулируемых фильтро-компенсирующих устройств для компенсации реактивной мощности.

В мире проводятся научно-исследовательские работы, направленные на повышение надёжности систем электроснабжения промышленных предприятий за счёт улучшения показателей качества электрической энергии и компенсации реактивной мощности, а также на снижение энергетических потерь, разработку современных технологий, совершенствование методов выявления и предотвращения резонансных явлений в электрических сетях, исследование взаимодействия фильтров и конденсаторных устройств с электрической сетью и выявление средств, вызывающих гармонические искажения. В данном направлении, в частности, одними из актуальных задач являются выявление факторов, отрицательно влияющих на показатели качества электрической энергии у потребителей, их снижение, совершенствование методов расчёта и выбора пассивных преобразователей, повышающих надёжность электроснабжения за счёт компенсации реактивной мощности, а также разработка фильтро-компенсирующих устройств и имитационных моделей для подавления высших гармоник в системах электроснабжения предприятий.

В республике реализуются широкомасштабные меры по созданию ресурсосберегающих техники и технологий, позволяющих повысить энергоэффективность систем электроснабжения промышленных предприятий, улучшить качество электрической энергии и снизить потери, в результате чего достигаются определённые положительные результаты. В Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы, в частности, определены задачи «обеспечения бесперебойного снабжения экономики электрической энергией, активного внедрения технологий “зелёной экономики” во все отрасли, а также повышения энергоэффективности экономики на 20 процентов»². При реализации

¹<https://objectstorage.ap-dcc-gazipur-1.oraclecloud15.com/>

²Указ Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года № УП-60 «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы», <https://lex.uz/uz/docs/-5841063>

данных задач одной из важных проблем является разработка современных электротехнических комплексов на основе фильтро-компенсирующих устройств и активных преобразователей, их внедрение в производственные отрасли, а также создание решений, обеспечивающих автоматизированный контроль и коррекцию показателей качества электрической энергии.

Настоящая диссертационная работа в определённой степени направлена на реализацию задач, установленных нормативно-правовыми актами Республики Узбекистан, в том числе Указом Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года № УП-60 «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы», постановлением от 13 февраля 2023 года № ПП-54 «О мерах по повышению эффективности государственного контроля в сфере использования топливно-энергетических ресурсов», постановлением от 1 апреля 2025 года №ПП-133 «О совершенствовании мер по предотвращению незаконного использования и нерационального расходования топливно-энергетических ресурсов, а также повышению энергоэффективности», Указом от 27 марта 2025 года № УП-63 «О совершенствовании государственного управления в сфере повышения энергоэффективности и развитии рынка услуг энергосервисных компаний», а также постановлениями Кабинета Министров от 24 октября 2025 года № 673 «О мерах по формированию рынка энергосервисных услуг и стимулированию повышения энергоэффективности жилых домов населения» и от 31 мая 2024 года № 319 «Об утверждении правил пользования электрической энергией и природным газом», а также другими нормативно-правовыми документами, регулирующими данную сферу.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Проведённые в рамках диссертационной работы исследования соответствуют приоритетному направлению 2. «Энергетика, энергосбережение и альтернативные источники энергии» развития науки и технологий Республики Узбекистан.

Степень изученности проблемы. Теоретический анализ несинусоидальных режимов в электрических сетях, выявление закономерностей возникновения гармоник тока и напряжения, а также совершенствование методов оценки их гармонического состава на основе анализа Фурье и определения коэффициентов гармонических искажений нашли отражение в трудах ряда известных зарубежных учёных, таких как Абрамович Б.Н., Гамазин С.И., Железко Ю.С., Смоловик С.В., Довгун В.П., Будяну К., Шидловский А.К., Агунов М.В., Тонкаль В.Е. и других.

Вопросам развития методов компенсации реактивной мощности и определения оптимальных параметров конденсаторных батарей и фильтро-компенсирующих устройств посвящены научные работы ведущих учёных Узбекистана, среди которых Фозилов Х.Ф., Насиров Т.Х., Аллаев К.Р., Камалов Т.С., Муратов Х.М., Хошимов Ф.А., Хамидов Ш.В., Сиддигов И.Х., Пирматов Н.Б., Ишназаров О.Х., Тоиров О.З. Проведённые исследования позволили получить значимые результаты в области изучения влияния нелинейных нагрузок на электрические сети, выявления механизмов возникновения гармонических искажений, разработки методов обнаружения и

предотвращения резонансных явлений, анализа взаимодействия фильтров и конденсаторных установок с сетью, а также разработки методов мониторинга и диагностики показателей качества электроэнергии.

Вместе с тем вопросы снижения гармонических искажений, возникающих под воздействием нелинейных нагрузок в системах электроснабжения промышленных предприятий, эффективной компенсации реактивной мощности и повышения качества электроэнергии изучены недостаточно полно. В частности, недостаточно разработаны комплексные математические модели, учитывающие взаимодействие пассивных фильтро-компенсирующих устройств с электрической сетью, влияние гармонических токов на элементы сети, методы оптимального выбора параметров фильтров и предотвращения резонансных явлений. Кроме того, в условиях широкого применения частотных преобразователей и других нелинейных нагрузок остаются недостаточно исследованными вопросы совместного использования пассивных фильтров и конденсаторных батарей для повышения качества электрической энергии.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ учреждения, в котором выполнена диссертация.

Выполнено в рамках программы научно-исследовательской лаборатории «Электротехнологии и эксплуатация энергетического оборудования» Института проблем энергетики Академии наук Республики Узбекистан на 2022–2025 годы по теме «Проблемы и решения формирования условий эксплуатации современных электрических сетей на основе распределённой генерации».

Целью исследования является разработка научных решений по повышению надёжности систем электроснабжения за счёт применения компенсирующих устройств.

Задачи исследования:

совершенствование метода расчёта и выбора пассивного преобразователя, повышающего надёжность электроснабжения за счёт снижения отрицательного влияния потребителей на показатели качества электрической энергии и компенсации реактивной мощности;

совершенствование фильтро-компенсирующего устройства, обеспечивающего подавление высших 5-й и 7-й гармоник и компенсацию реактивной мощности в системах электроснабжения предприятий;

разработка имитационной модели пассивной фильтрации для систем электроснабжения предприятий, реализующей процессы подавления высших 5-й и 7-й гармоник;

разработка математической модели, описывающей процессы повышения качества электрической энергии, снижения гармонических искажений и динамического управления реактивной мощностью с использованием фильтро-компенсирующего устройства.

Объектом исследования являются процесс улучшения показателей качества электрической энергии и компенсации реактивной мощности, а также фильтро-компенсирующее устройство, реализующее данный процесс.

Предметом исследования являются структуры, параметры, характеристики, системы управления и режимы работы фильтро-компенсирующих устройств, предназначенных для улучшения качества электрической энергии и компенсации реактивной мощности.

Методы исследования. В процессе исследования использованы методы математических расчётов, законы теоретической электротехники, методы статистического анализа, аналитические модели для расчёта потерь мощности в элементах электрических сетей, методы математического планирования эксперимента, а также методы компьютерного имитационного моделирования и подходы, предусмотренные действующими нормативными документами.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

усовершенствован метод расчёта и выбора пассивного преобразователя, повышающего надёжность электроснабжения за счёт снижения отрицательного влияния потребителей на показатели качества электрической энергии и компенсации реактивной мощности, посредством определения резонансных частот 5-й и 7-й гармоник, согласования индуктивных и ёмкостных параметров фильтра, а также повышения коэффициента мощности нагрузки;

усовершенствована конструкция фильтро-компенсирующего устройства, обеспечивающего подавление высших 5-й и 7-й гармоник и компенсацию реактивной мощности в системе электроснабжения предприятий, путём внесения конструктивных изменений;

разработана имитационная модель пассивной фильтрации в среде MATLAB Simulink, обеспечивающая реализацию процессов подавления высших 5-й и 7-й гармоник в системах электроснабжения предприятий;

разработана математическая модель, позволяющая описывать процессы повышения качества электрической энергии, снижения гармонических искажений и динамического управления реактивной мощностью с использованием фильтро-компенсирующего устройства, с учётом весовых коэффициентов в качестве входных параметров.

Практические результаты исследования:

разработано фильтро-компенсирующее устройство, обеспечивающее улучшение качества электрической энергии и компенсацию реактивной мощности;

установлено, что при применении разработанного фильтро-компенсирующего устройства в системе электроснабжения напряжением 0,4 кВ потери электрической энергии снижаются на 10–15 %, при этом коэффициент мощности сети стабильно поддерживается на уровне выше 0,95.

Достоверность результатов исследований. Достоверность результатов исследования обоснована использованием современных методов и средств измерения, адекватностью теоретического анализа, математического моделирования, компьютерных имитационных экспериментов и экспериментальных испытаний в производственных условиях, а также положительными результатами испытаний разработанного фильтро-компенсирующего устройства и его внедрением в практику.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования заключается в теоретическом обосновании закономерностей формирования потерь мощности и энергии в системах электроснабжения и механизмов их снижения, разработке математической модели процесса компенсации реактивной мощности, установлении аналитических зависимостей, отражающих влияние несимметрии напряжения и тока на качество электроэнергии, а также в возможности использования полученных научных положений и выражений при выборе оптимальных параметров фильтро-компенсирующих устройств и анализе их режимов работы в электрических сетях различной мощности.

Практическая значимость результатов исследования определяется тем, что разработанное фильтро-компенсирующее устройство с активным преобразователем обеспечивает снижение потерь электрической энергии на 10–15 %, поддержание коэффициента мощности на стабильном уровне, уменьшение колебаний напряжения на 20–25 %, а также обеспечение нормативного качества электроэнергии. Это способствует повышению надёжности, устойчивости и энергоэффективности электрических сетей, а также значительному улучшению уровня надёжности электроснабжения на промышленных предприятиях.

Введение результатов исследований. На основе полученных результатов по повышению надёжности систем электроснабжения за счёт применения компенсирующих устройств:

фильтро-компенсирующее устройство, обеспечивающее повышение показателей качества электрической энергии, подавление высших гармонических составляющих и оптимальную компенсацию реактивной мощности, внедрено на ООО «SULTON TEX GROUP» (справка АО «Hududiy elektr tarmoqlari» от 30 октября 2025 года № 01-02-08/1645). В результате в распределительной сети предприятия напряжением 0,4 кВ достигнуто снижение потерь электрической энергии на 12–15 %, уменьшение коэффициента гармонических искажений напряжения до 5–7 %, а также повышение коэффициента мощности до 0,99;

разработанные алгоритм, имитационная модель и программный продукт, обеспечивающие повышение качества электрической энергии и оптимальную компенсацию реактивной мощности с учётом мощности потребителей, графиков нагрузки, параметров сети и гармонического состава, внедрены на ООО «SULTON TEX GROUP» (справка АО «Hududiy elektr tarmoqlari» от 30 октября 2025 года № 01-02-08/1645). В результате за счёт снижения потерь электрической энергии и повышения надёжности систем электроснабжения достигнут экономический эффект в размере 125 000 000 сумов в год.

Апробация результатов исследования. Результаты исследования прошли апробацию на 5 научно-практических конференциях, в том числе - на 2 международных и 3 республиканских конференциях.

Публикации результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, в том числе 8 научных статей в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан

для публикации основных научных результатов диссертаций (из них 1 – в зарубежных и 7 – в отечественных журналах), а также получено 1 свидетельство на программу для ЭВМ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Общий объем диссертации составляет 120 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и необходимость выбранной темы, определены цель и задачи исследования, описаны объект и предмет исследования, показано их соответствие приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики, изложены научная новизна и практические результаты, раскрыта научная и практическая значимость полученных результатов, приведены сведения о внедрении результатов в практику, опубликованных научных работах, а также объеме и структуре диссертации.

В первой главе диссертации, озаглавленной **«Влияние качества электрической энергии и гармонических искажений на обеспечение надёжности систем электроснабжения»**, проанализированы показатели качества электроэнергии в промышленных системах электроснабжения, критерии их оценки, причины возникновения высших гармоник и их влияние на трансформаторы, кабельные линии и компенсирующие устройства. Также на научной основе изучено влияние гармонических искажений на надёжность систем электроснабжения, увеличение потерь энергии и факторы, приводящие к снижению устойчивости технологических процессов.

В результате анализа научной литературы установлено следующее:

недостаточно проведены исследования по комплексной оценке влияния высших гармоник в промышленных системах электроснабжения;

влияние гармонических искажений, возникающих под воздействием нелинейных нагрузок (особенно частотных преобразователей), на дополнительные потери энергии в трансформаторах и кабельных линиях учтено не в полной мере;

при оценке показателей качества электроэнергии взаимосвязь гармонических искажений и реактивной мощности во многих случаях учитывается недостаточно;

резонансные явления в системах с конденсаторными батареями и их влияние на надёжность электроснабжения изучены недостаточно глубоко;

существующие методы комплексной оценки качества электроэнергии и надёжности систем недостаточно развиты с точки зрения использования интегральных показателей;

при выборе и расчёте фильтро-компенсирующих устройств не полностью учитываются реальные условия эксплуатации, характер нагрузки и гармонический состав.

На основе проведённого анализа сформированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе диссертации, озаглавленной «**Методы компенсации реактивной мощности и снижения гармонических искажений в системах электроснабжения**», проанализированы методы компенсации реактивной мощности, принцип работы конденсаторных батарей и основы их выбора, классификация фильтро-компенсирующих устройств, а также их эффективность в снижении гармонических искажений. Кроме того, изучены технические характеристики пассивных, активных и гибридных фильтро-компенсирующих устройств, их алгоритмы работы и теоретические основы применения в промышленных электрических сетях.

По функциональному назначению устройства компенсации реактивной мощности применяются для повышения коэффициента мощности ($\cos\varphi$). К основным видам относятся:

конденсаторные батареи;
автоматические ступенчатые системы компенсации (APFC);
синхронные компенсаторы;
STATCOM.



Рис. 1. Классификация фильтро-компенсирующих устройств

По функциональному назначению фильтро-компенсирующие устройства подразделяются на устройства компенсации реактивной мощности, фильтрации гармонических искажений и устройства комплексного воздействия (рис.1). К первой группе относятся конденсаторные системы, предназначенные для повышения коэффициента мощности. Устройства второй группы служат для снижения высших гармоник. Третья группа охватывает комплексные системы, одновременно оптимизирующие реактивную мощность и гармонические искажения.

Пассивные фильтры имеют различные конструктивные исполнения, основными из которых являются: узкополосные фильтры (для подавления конкретной гармоники), широкополосные фильтры (для снижения нескольких гармоник) и фильтры S-типа. Данные устройства настраиваются в соответствии с частотной характеристикой электрической сети и предназначены для уменьшения влияния гармонических токов.

Узкополосный фильтр (рис. 2, а) представляет собой последовательный колебательный контур, настроенный на подавление определённой гармоники в электрической сети и компенсацию реактивной мощности на основной частоте. Такие фильтры, как правило, применяются для снижения гармонических токов заданного порядка.

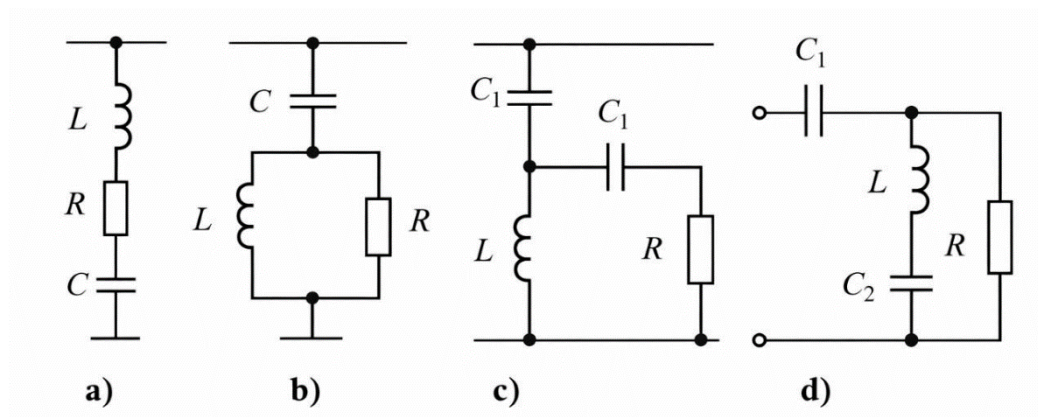


Рис. 2. Основные конфигурации пассивных фильтро-компенсирующих устройств:

- а) узкополосный фильтр; б) широкополосный фильтр 2-го порядка; в) широкополосный фильтр 3-го порядка; г) фильтр С-типа.

Резонансная частота f_r , соответствующая подавляемой гармонике в узкополосном фильтре, определяется следующим выражением:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

где L – индуктивность фильтра; C – ёмкость фильтра.

В процессе работы гармонический фильтр генерирует определённое количество реактивной мощности. Данная реактивная мощность определяется следующим выражением:

$$Q = \frac{n^2}{n^2-1} Q_K \quad (2)$$

где n – порядок гармоники, на которую настроен фильтр; Q_K – реактивная мощность конденсаторов, входящих в состав фильтра.

Полоса пропускания фильтра в относительных единицах определяется следующим выражением:

$$\Delta = \frac{f_1-f_0}{f_0} = \frac{1}{q} = \frac{r}{X_0} \quad (3)$$

где Δ – ширина полосы пропускания фильтра; q – добротность фильтра; r – активное сопротивление резонансного контура; X_0 – реактивное сопротивление резонансного контура.

При необходимости фильтрации напряжения 7-й гармоники, если в сети присутствует близко расположенная 5-я гармоника, как правило, устанавливается блок фильтров, состоящий из двух узкополосных фильтров. Один из них настраивается на 5-ю гармонику, а второй – на 7-ю гармонику.

В третьей главе диссертации, озаглавленной «Разработка фильтро-компенсирующего устройства для электроснабжения предприятий», исследована технологическая цепочка процессов прядильного предприятия. Для

стабильного управления технологическим процессом и повышения производительности производства в электроприводах ленточных машин типов RSB-D 45 и SB-D 45, установленных на предприятии, применяются преобразователи частоты номинальной мощностью 11 кВт.

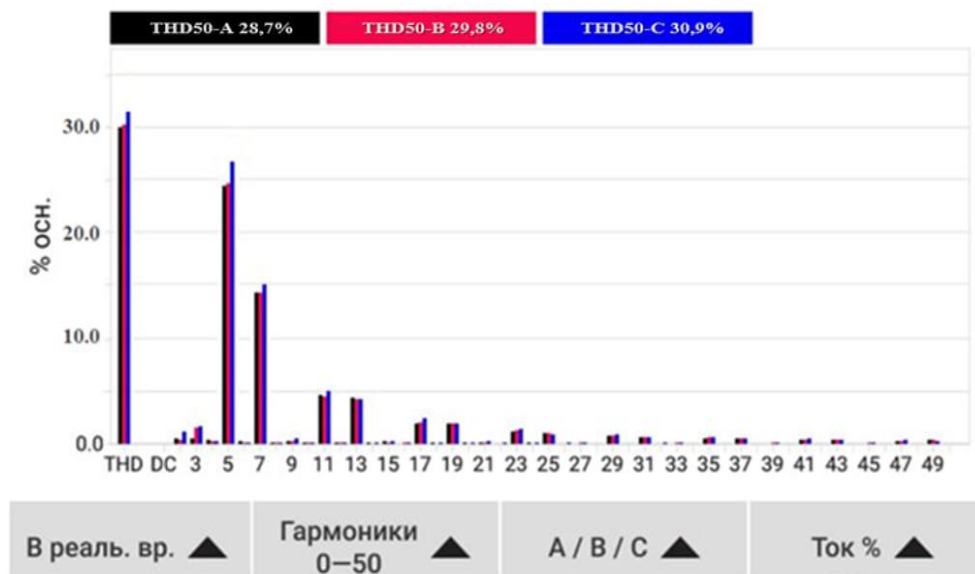


Рис. 3. Спектральное распределение гармоник тока и значения коэффициента общего гармонического искажения (THD) в электрической сети предприятия

Таблица 1

Спектральный анализ гармонических составляющих тока в электрической сети

Порядок гармоник	Фаза А (%)	Фаза В (%)	Фаза С (%)
DC	0	0	0
3	1.1	0.9	1.3
5	24.2	24.8	26.1
7	14.1	14.5	15.0
9	0.5	0.4	0.6
11	4.8	4.6	4.9
13	4.2	4.0	4.3
15	0.6	0.5	0.7
17	2.1	2.0	2.2
19	1.8	1.7	1.9
21	0.6	0.5	0.7
23	0.9	0.8	1.0
25	0.6	0.5	0.7
27	0.4	0.3	0.5
29	0.3	0.3	0.4
31	0.2	0.2	0.3
33–49	<0.2	<0.2	<0.2

В электроприводах пильных машин типа RSB-D 45 и SB-D 45, установленных на предприятии, для обеспечения стабильного управления технологическим процессом и повышения производительности применяются частотные преобразователи номинальной мощностью 11 кВт. Поскольку данные

электроприводы работают по принципу широтно-импульсной модуляции (PWM), это приводит к возникновению в электрической сети высокочастотных электромагнитных помех и гармонических составляющих тока. В результате в системе электроснабжения наблюдаются электромагнитные искажения, распространение высокочастотных токов по кабельным линиям, а также возможные сбои в работе систем автоматики и управления. По результатам измерений установлено значительное присутствие гармонических составляющих тока в электрической сети. (рис. 3)

Данные значения показывают, что они в несколько раз превышают допустимый предел 5 %, установленный стандартами GOST 32144-2013 и IEC 61000 по качеству электрической энергии (Таблица 1).

В ходе измерений также был определён К-фактор, характеризующий уровень гармонической нагрузки трансформатора и кабельных линий. По результатам анализа значение К-фактора по фазам составило следующее:

$$K_A = 24.1, \quad K_B = 24.2, \quad K_C = 27.1$$

Значения К-фактора выше 20 свидетельствуют о наличии высокой гармонической нагрузки в электрической сети (рис. 4). Это может привести к перегреву обмоток трансформатора, ускоренному старению изоляции кабелей, а также повреждению конденсаторных батарей.

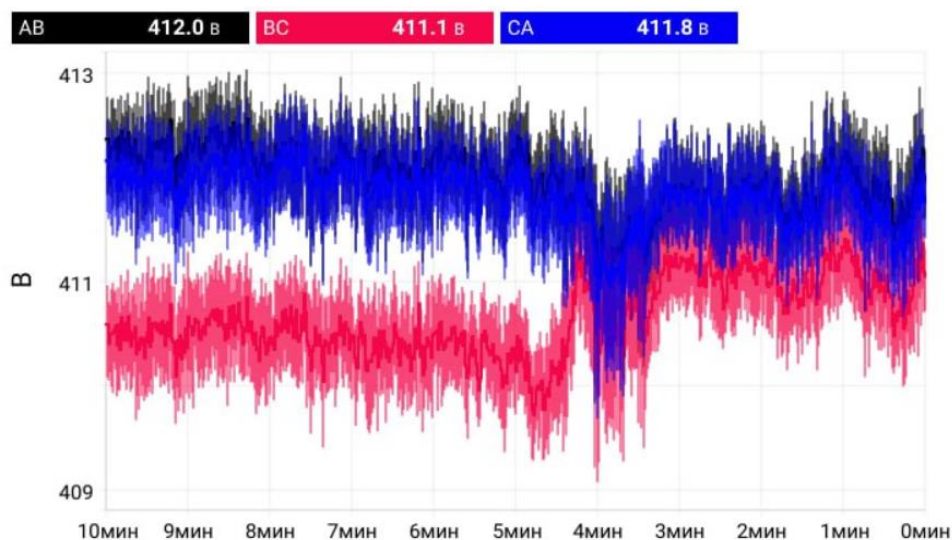


Рис. 4. График изменения линейных напряжений во времени в системе электроснабжения предприятия

При применении частотных преобразователей номинальной мощностью 11 кВт для регулирования скорости электроприводов пилотальных машин (RSB-D 45 и SB-D 45) в сети возникают электромагнитные помехи и высокочастотные токовые компоненты. В связи с этим возникает необходимость установки пассивного EMI/RFI-фильтра во входной цепи. Входная мощность частотного преобразователя P_{in} определяется через его коэффициент полезного действия η_{vfd} :

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta_{vfd}} = \frac{11}{0.96} = 11.46 \text{ кВт} \quad (4)$$

В трёхфазной сети линейный ток по основной гармонике I_1 определяется следующим образом:

$$I_1 = \frac{P_{in}}{\sqrt{3}U_{LL}PF_1} \quad (5)$$

При $U_{LL}=380$ В и $PF_1=0,95$ для входного каскада с выпрямителем значение I_1 составляет приблизительно 18,3 А.

Так как частотный преобразователь имеет диодный 6-пульсный выпрямитель, спектр гармоник формируется по закону $h = 6k \pm 1$, то есть появляются 5-я, 7-я, 11-я, 13-я и другие гармоники. В результате увеличивается коэффициент общего гармонического искажения тока THD_I . Рост действующего значения тока определяется следующим образом:

$$I_{rms} = I_1 \sqrt{1 + THD_I^2} \quad (6)$$

ценивается следующим соотношением.

При $THD_I=0,45$:

$$I_{rms} = 18,3 \sqrt{1 + 0,45^2} \approx 20,1 \text{ А} \quad (7)$$

получается. Элементы фильтра выбираются с учётом теплового режима и условий непрерывной работы по коэффициенту запаса по току k_I :

$$I_{filter} \geq k_I I_{rms} \quad (8)$$

В промышленных условиях при $k_I=1,25$:

$$I_{filter} \geq 1,25 \cdot 20,1 \approx 25,1 \text{ А}$$

требуется. Номинальный ток фильтра Schaffner FN3258-30-33 составляет $I_N = 30$ А, что покрывает расчётное значение 25,1 А и обеспечивает необходимый тепловой и эксплуатационный запас.

Условие выбора по напряжению выражается как $U_N \geq U_{LL} \cdot k_U$, где k_U учитывает отклонения сетевого напряжения и запас на переходные процессы.

Физический смысл ЕМИ-фильтра заключается в снижении высокочастотных проводимых помех токов (I_{CM} и I_{DM}), возникающих вследствие высоких фронтов dv/dt и di/dt при коммутации PWM. Высокочастотные компоненты проводимых токов помех через эквивалентные импедансы определяются следующим образом:

$$I_{noise}(f) = \frac{V_{noise}(f)}{Z_{source}(f) + Z_{filter}(f) + Z_{load}(f)} \quad (9)$$

описываются следующим образом; при подключении фильтра рост частотно-зависимого импеданса $Z_{filter}(f)$ приводит к снижению $I_{noise}(f)$ в области высоких частот. В результате уменьшаются проводимые помехи, распространяющиеся по кабельным линиям, снижается вероятность ложных срабатываний в цепях управления, ошибок в сигналах PLC/датчиков, а также электромагнитного воздействия на соседнее оборудование.

Таким образом, по току

$$I_{filter} \geq 25,1 \text{ А}$$

По напряжению с учётом запаса на уровне 3×480 В и требований по подавлению высокочастотных помех, возникающих при коммутации частотных преобразователей, установка пассивного ЕМИ/RFI-фильтра номиналом 30 А на вход каждого частотного преобразователя мощностью 11 кВт обоснована как технически целесообразное решение.

Оптимальные параметры фильтра L_f , C_f , R_f определяются путём минимизации следующего функционала:

$$\Phi(L_f, C_f, R_f) = \alpha_1 \sum_{h \in H} \left(\frac{I_h^{(f)}}{I_h^{(0)}} \right)^2 + \alpha_2 \left(\frac{Q_f - Q_{req}}{Q_{req}} \right)^2 + \alpha_3 \left(\frac{f_{res} - f_h}{f_h} \right)^{-2} + \alpha_4 \frac{P_{loss}}{P_{base}} + \alpha_5 \left(\frac{THD_U - THD_{U,lim}}{THD_{U,lim}} \right)^2 \rightarrow \min \quad (10)$$

где: $I_h^{(0)}$ – ток h-й гармоники без фильтра; $I_h^{(f)}$ – ток h-й гармоники при подключённом фильтре; Q_f – реактивная мощность фильтра; Q_{req} – требуемая компенсируемая мощность; f_{res} – фактическая резонансная частота системы; P_{loss} – активные потери в элементах фильтра; P_{base} – базовая активная мощность; THD_U – коэффициент полного гармонического искажения по напряжению; $THD_{U,lim}$ – допустимый предел THD; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ – весовые коэффициенты.

Интегральная формула выбора оптимальных параметров фильтра.

$$J(L_f, C_f, R_f) = \sum_{h \in H} \beta_h \left| \frac{Z_{sys,h}}{Z_{sys,h} + Z_{f,h}} \right|^2 + \gamma_1 \left(\frac{Q_f - Q_{req}}{Q_{req}} \right)^2 + \gamma_2 \left(\frac{THD_I}{THD_{I,lim}} \right)^2 + \gamma_3 \left(\frac{P_{loss}}{P_{base}} \right) + \gamma_4 \left(\frac{\Delta U}{\Delta U_{lim}} \right)^2 \rightarrow \min \quad (11)$$

где β_h – весовой коэффициент каждой гармоники; $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ – коэффициенты оптимизации; ΔU – отклонение напряжения.

Исходя из выявленных проблем, для системы электроснабжения предприятия выбран пассивный ЕМІ-фильтр Schaffner FN3258-30-33, обладающий следующими техническими характеристиками:

- номинальный ток: 30 А;
- максимальное рабочее напряжение: 3×480 В АС;
- рабочая частота: 0–60 Гц;
- диапазон подавления электромагнитных помех: 150 кГц – 30 МГц;
- допустимая перегрузка: 1,5 In (в течение 1 минуты);
- диапазон рабочих температур: –25°C ÷ +100°C.

Данный фильтр способен снижать электромагнитные помехи в диапазоне частот 100 кГц – 1 МГц на 40–70 дБ. Подключение фильтра к частотному преобразователю осуществляется по следующей последовательности: электрическая сеть → пассивный ЕМІ-фильтр → частотный преобразователь → электрический двигатель (рис. 5).

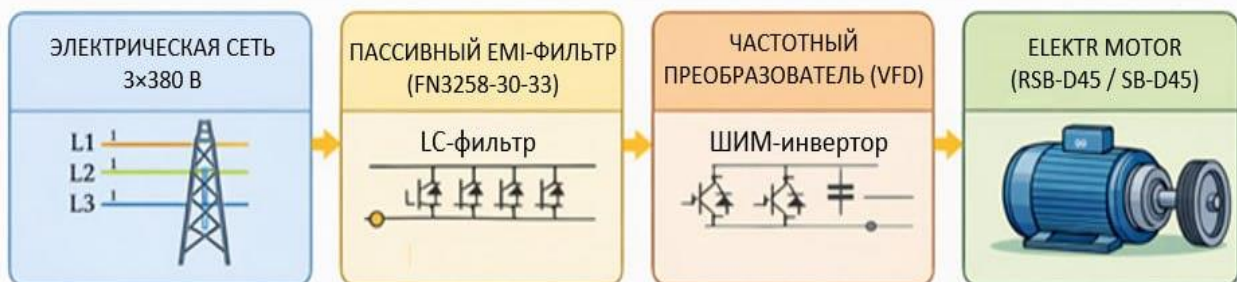


Рис. 5. Структурная схема системы электропривода машины RSB-D45 (SB-D45)



Рис. 6. Пассивное фильтро-компенсирующее устройство, настроенное на 5-ю и 7-ю гармоники

На рис. 6 представлено пассивное фильтро-компенсирующее устройство, применяемое в системе электроснабжения предприятия для подавления высших 5-й и 7-й гармоник, а также компенсации реактивной мощности. В состав устройства входят дроссел, конденсаторные батареи и защитно-коммутационные элементы. Данное устройство позволяет снизить гармонические искажения в электрической сети, повысить коэффициент мощности, улучшить качество напряжения и обеспечить надёжность системы электроснабжения.



Рис. 7. Спектр гармоник тока и значения коэффициента THD в электрической сети

В предлагаемом фильтро-компенсирующем устройстве оптимальный выбор индуктивности позволил уменьшить число витков обмотки, что привело

к снижению активного сопротивления и медных потерь. Точная настройка резонансных частот обеспечивает селективное подавление 5-й и 7-й гармоник, в результате чего уменьшаются гармонические токи в сети и сокращаются тепловые потери в трансформаторах и кабельных линиях. Одновременно повышается коэффициент мощности, а компактная модульная конструкция устройства облегчает эксплуатацию и техническое обслуживание. В целом применение устройства способствует снижению потерь энергии, повышению надёжности и увеличению энергетической эффективности системы электроснабжения.

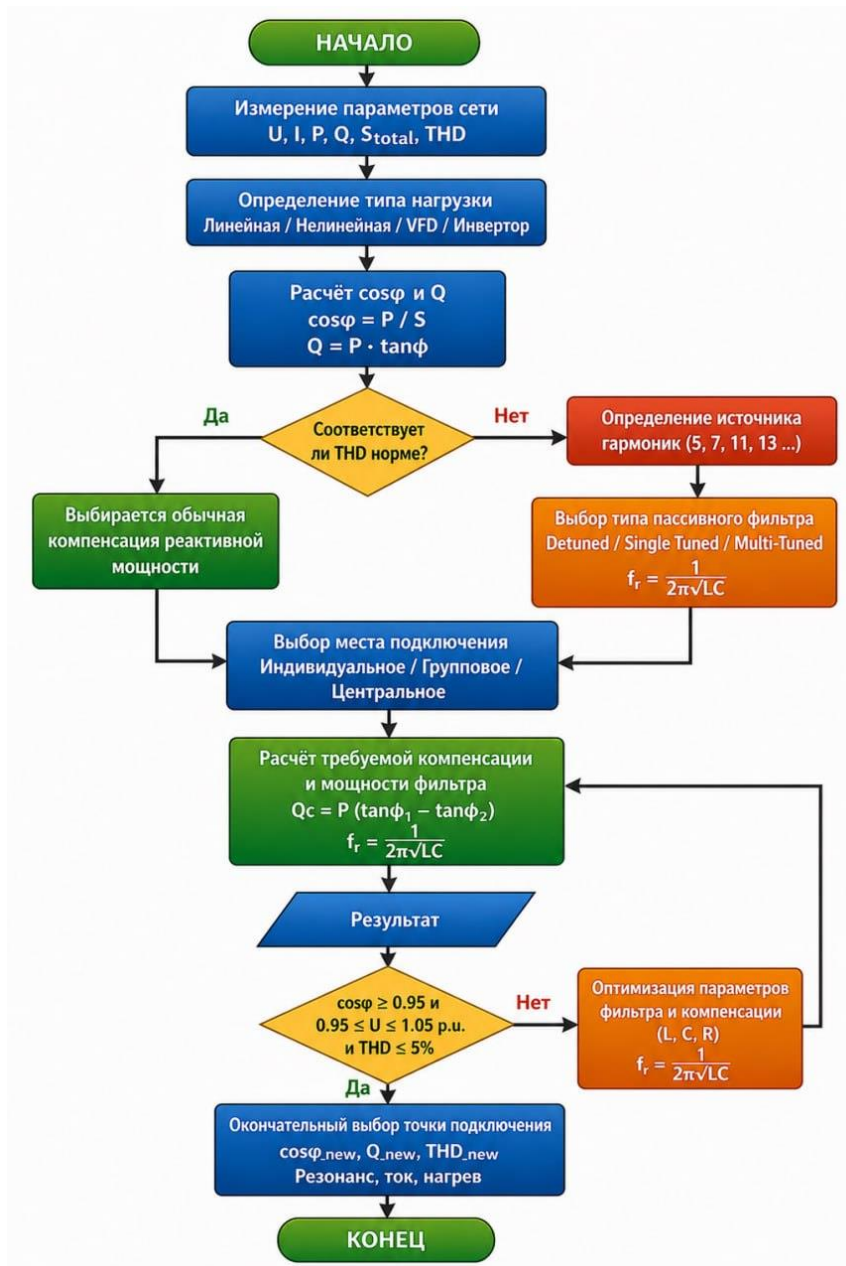


Рис. 8. Блок-схема выбора пассивного фильтро-компенсирующего устройства

Результаты спектрального анализа гармоник тока в трёхфазной электрической сети представлены на рис 7. Из графика видно, что коэффициент общего гармонического искажения тока по фазам А, В и С составляет соответственно $THD_A = 10,4\%$, $THD_B = 10,6\%$ и $THD_C = 11,2\%$. Эти значения

свидетельствуют о наличии значительной доли нелинейных нагрузок в электрической сети.

Анализ спектра гармоник показывает, что основная часть искажений приходится на гармоники 5-го и 7-го порядков. Амплитуда 5-й гармоники составляет примерно 16–17 %, а 7-й – около 9–10 %. Кроме того, присутствуют гармоники 11-го и 13-го порядков, доля которых относительно невелика – порядка 2–3 %. Гармоники более высокого порядка (17-й и выше) имеют незначительные значения и практически не влияют на общий уровень искажений.

Разработан алгоритм выбора и определения параметров фильтро-компенсирующего устройства (рис. 8). В данном алгоритме учтены процессы измерения параметров электрической сети (U, I, P, Q, S, THD), определения типа нагрузки (линейная, нелинейная, VFD- и инверторная нагрузка), расчёта коэффициента мощности ($\cos\varphi$) и реактивной мощности, проверки соответствия показателя THD нормативным значениям, определения источников гармоник (5-й, 7-й, 11-й, 13-й гармоники), выбора типа пассивного фильтра (detuned, single-tuned, multi-tuned), определения резонансной частоты фильтра, выбора точки подключения фильтро-компенсирующего устройства (индивидуальная, групповая и централизованная), расчёта требуемой мощности компенсации, а также оптимизации параметров фильтра (L, C, R). На основе алгоритма предусмотрено обеспечение условий $\cos\varphi \geq 0.95$, $0.95 \leq U \leq 1.05$ р.н. и $THD \leq 5\%$.

В четвёртой главе диссертации, озаглавленной «**Разработка модели фильтро-компенсирующего устройства и оценка его надёжности**», разработана имитационная модель пассивной фильтрации высших гармонических составляющих в системах электроснабжения промышленных предприятий.

Показано, что в прядильном производстве при наличии инверторных и полупроводниковых нагрузок ток может быть представлен в виде ряда Фурье следующего вида:

$$i(t) = \sum_{h \in H} I_h \sqrt{2} \sin(h\omega_1 t + \varphi_h) \quad (12)$$

Для каждой гармоники комплексная проводимость нагрузки предприятия определяется следующим образом:

$$Y_{L,h} = G_{L,h} + jB_{L,h} \quad (13)$$

Для 5-й и 7-й гармоник принимаются отдельные последовательно настроенные LC-ветви. Их полное сопротивление определяется следующим образом:

$$Z_5(h) = R_5 + j \left(h\omega_1 L_5 - \frac{1}{h\omega_1 C_5} \right) \quad Z_7(h) = R_7 + j \left(h\omega_1 L_7 - \frac{1}{h\omega_1 C_7} \right) \quad (14)$$

где h — порядок гармоники.

С использованием коэффициента распределения тока ток h -й гармоники, протекающий в сеть, определяется следующим образом:

$$I_{S,h} = I_h \left| \frac{Y_{L,h}}{Y_{\Sigma,h}} \right| \quad (15)$$

Условие настройки для 13 фильтров высших гармоник принимается в целевом диапазоне:

$$\omega_{r,k} = \frac{1}{\sqrt{L_{F_k} C_{F_k}}}, \quad \omega_{r,k} \in [\omega_{11}, \omega_n] \quad (16)$$

Эффективность предложенной системы оценивается следующим образом:

$$\eta_f = \alpha_1 \frac{THD_{I0} - THD_I}{THD_{I0}} + \alpha_2 \frac{THD_{U0} - THD_U}{THD_{U0}} + \alpha_3 \frac{\cos\varphi' - \cos\varphi_0}{1 - \cos\varphi_0} \quad (17)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ — весовые коэффициенты, определяющие значимость каждого критерия; THD_{I0} — исходный коэффициент гармонического искажения тока; THD_I — значение THD тока после установки фильтра.

Функция оптимизации параметров предлагаемой системы определяется следующим образом:

$$J = \beta_1 THD_I + \beta_2 THD_U + \beta_3 \frac{P_{loss}}{P_1} + \beta_4 \left(\frac{Q_{res}}{Q_0} \right)^2 + \beta_5 \sum_{h \in \{5,7\}} \left(\frac{I_{s,h}}{I_{0,h}} \right)^2 \rightarrow \min \quad (18)$$

где $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ — весовые коэффициенты, отражающие степень важности каждого критерия.

Ограничения:

$$\begin{aligned} THD_U &\leq THD_{U,lim}, \\ THD_I &\leq THD_{I,lim} \\ \cos\varphi' &\geq \cos\varphi_{min} \\ 0 &< L_5, L_7, L_{F_k}, C_5, C_7, C_{F_k} \end{aligned} \quad (19)$$

Рассматриваемая система электроснабжения прядильного предприятия питается через трансформатор напряжением 6/0,4 кВ мощностью 630 кВА. На стороне низкого напряжения для компенсации реактивной мощности установлена конденсаторная установка УКРМ мощностью 300 кВАр, которая частично компенсирует реактивную мощность, возникающую из-за индуктивных нагрузок. Однако наличие в сети нелинейных нагрузок может приводить к возникновению резонансных явлений в конденсаторных установках и увеличению уровня гармонических искажений. В связи с этим важным является определение параметров пассивного фильтра на основе конденсаторной батареи.

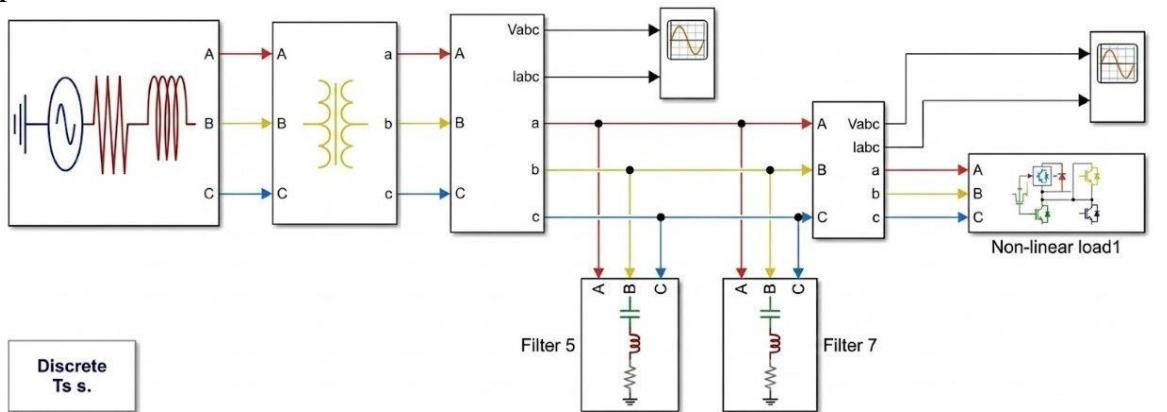


Рис. 9. Имитационная модель системы электроснабжения с установленными пассивными фильтрами для подавления гармоник 5-го и 7-го порядков

На основе разработанной имитационной модели системы электроснабжения исследован режим работы сети при подключении нелинейной

нагрузки в среде MATLAB Simulink. В процессе моделирования получены осциллограммы токов и напряжений, а также результаты спектрального анализа для определения их гармонического состава.

В данной работе для системы электроснабжения применён двухступенчатый пассивный фильтр, предназначенный для снижения гармоник 5-го и 7-го порядков. Параметры фильтра были определены в предыдущих разделах, на основе которых разработана обновлённая имитационная модель системы электроснабжения.

На рис. 9 представлена имитационная модель системы электроснабжения с установленными пассивными фильтрами. Данная модель реализована в среде MATLAB Simulink и включает источник электрической энергии, трансформатор, элементы линии, нелинейную нагрузку, а также блоки гармонических фильтров.

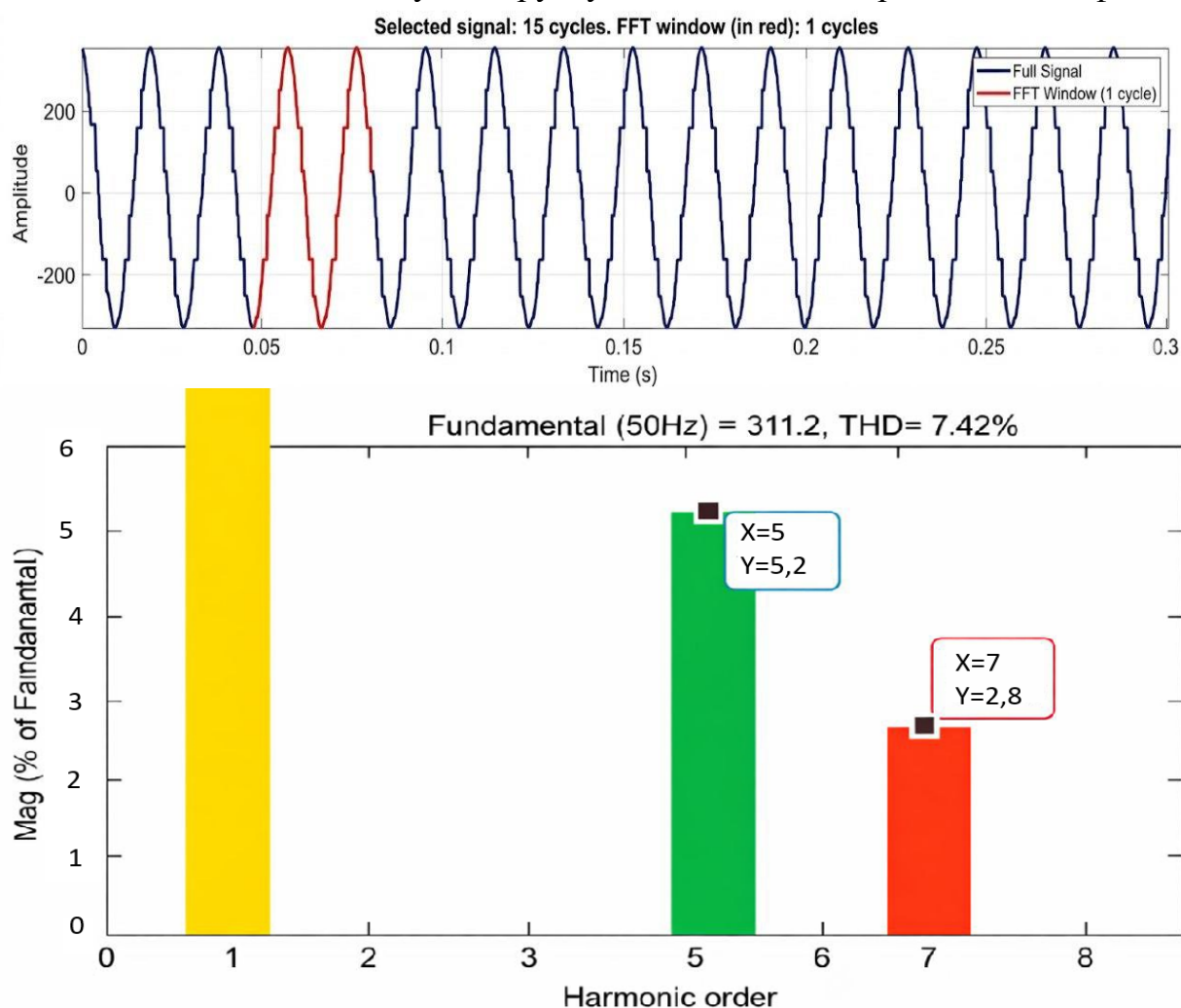


Рис. 10. Осциллограмма и спектр фазного напряжения при применении пассивных фильтров, настроенных на 5-ю и 7-ю гармоники

Полученные результаты показывают, что пассивные фильтры являются эффективным техническим средством снижения гармонических искажений в системе электроснабжения. В результате их применения формы напряжения и тока приближаются к синусоидальным, а уровень гармонических составляющих уменьшается, что позволяет существенно повысить показатели качества электрической энергии. Полученные результаты представлены на рис. 10.

Результаты моделирования, представленные в таблице 2, показывают, что после применения фильтро-компенсирующего устройства показатели качества электрической энергии значительно улучшились. В частности, существенно снизилась доля высших гармонических составляющих в токе и напряжении. Это способствует стабилизации режима работы системы электроснабжения и обеспечению надёжной работы электрического оборудования.

Таблица 2

Изменение показателей качества электрической энергии при применении пассивных фильтров

Состояние	k_I , %	k_{I5} , %	k_{I7} , %	k_U , %	k_{U5} , %	k_{U7} , %	U , V	I , A	$\cos\varphi$
Без фильтра	19.64	16.8	9.21	17.30	11.5	8.81	362	149	0.87
С пассивным фильтром	5.5	4.0	2.2	7.4	2.8	2.3	370	146	0.93

На основе полученных экспериментальных данных были определены показатели качества электроэнергии и проведено их сравнение с результатами имитационного моделирования, выполненного в среде MATLAB Simulink. В процессе сопоставления были проанализированы коэффициент общего гармонического искажения напряжения, коэффициент гармонических искажений тока, а также доли отдельных гармонических составляющих.

Таблица 3

Сравнение результатов реальных измерений и имитационного моделирования

Показатель	Реальные измерения	Имитационная модель	Отклонение
THD напряжения, %	16.8	17.3	2.9
THD тока, %	19.6	18.9	3.6
Доля 5-й гармоники, %	11.5	10.9	5.2
Доля 7-й гармоники, %	8.8	8.2	6.8
Ток, A	149	146	2.0
Напряжение, В	362	365	0.8

Результаты, приведённые в таблице 3, показывают, что расхождение между реальными измерениями и результатами имитационного моделирования является относительно небольшим. По большинству показателей отклонение находится в пределах 3–7 %, что свидетельствует о достаточной адекватности разработанной математической модели реальным режимам работы системы электроснабжения.

В результате применения фильтро-компенсирующих устройств энергоэффективность системы электроснабжения значительно повысилась. За счёт внедрения пассивных фильтров, настроенных на 5-ю и 7-ю гармоники, коэффициент мощности увеличился до 0,98, снизились токовые нагрузки, а также уменьшились потери энергии в трансформаторах и кабельных линиях. Одновременно снижение гармонических искажений привело к уменьшению нагрева электрооборудования, повышению его надёжности и увеличению срока службы.

С экономической точки зрения, за счёт снижения затрат на техническое обслуживание и ремонт, уменьшения аварийных отключений и потерь электроэнергии достигнут годовой экономический эффект в размере 125,0 млн сумов. Срок окупаемости капитальных затрат составил 0,57 года (около 6,8 месяца), что подтверждает высокую эффективность предлагаемого решения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов исследований, проведённых по диссертационной работе на соискание степени доктора философии (PhD) по техническим наукам на тему «Повышение надёжности систем электроснабжения за счёт применения компенсирующих устройств», сформулированы следующие выводы:

1. Установлено, что потребление реактивной мощности и гармонические искажения являются одними из основных факторов снижения энергоэффективности в системах электроснабжения предприятий. Асинхронные двигатели, трансформаторы, частотные преобразователи и другие индуктивные и нелинейные нагрузки создают дополнительные потоки реактивной мощности, что приводит к снижению коэффициента мощности, ухудшению режима напряжения и увеличению активных потерь в линиях и трансформаторах.

2. На примере системы электроснабжения прядильного предприятия ООО «Sulton tex group» исследовано влияние технологического оборудования на сеть. Установлено, что частотные преобразователи, применяемые в линиях SB-D45, RSB-D45, RIETER C70, RIETER K42 и Murata QPRO EX, являются основными источниками высших гармоник. По результатам измерений коэффициент гармонических искажений тока до установки фильтра достигал 28,7–30,9 %, что свидетельствует о существенном ухудшении качества электроэнергии.

3. Разработано фильтро-компенсирующее устройство для подавления гармоник 5-го и 7-го порядков и обоснованы его оптимальные параметры. В устройстве приняты значения $L_5 \approx 0,136$ мГн и $L_7 \approx 0,069$ мГн, при мощности конденсаторов 150 кВАр на каждую ступень. В результате уровень THDI снизился с 20–35 % до 5–7 %, коэффициент мощности увеличился с 0,78–0,82 до 0,95–0,97, а активные потери уменьшились на 10–15 %, что обеспечило повышение энергоэффективности и надёжности системы.

4. Результаты имитационного моделирования в среде MATLAB Simulink подтвердили эффективность фильтро-компенсирующего устройства. При параметрах $C_{pf} \approx 2200$ мкФ, $L_5 \approx 0,18$ мГн и $L_7 \approx 0,094$ мГн коэффициент гармонических искажений тока снизился с 19,64 % до 5,5 %, напряжения – с 17,30 % до 7,4 %, а коэффициент мощности увеличился с 0,87 до 0,93.

5. Адекватность разработанной имитационной модели подтверждена сравнением с экспериментальными данными. Расхождение между результатами не превышает 3–7 %, значения RMSE = 0,82 и NSE = 0,91 свидетельствуют о высокой точности модели. Также установлено совпадение долей 5-й и 7-й гармоник в модели и реальной системе.

6. Экономическая эффективность подтверждена расчётами: годовой эффект составил 125 млн сумов при капитальных затратах 70,7 млн сумов, а срок окупаемости – 0,57 года (около 6,8 месяца). Это подтверждает высокую эффективность и целесообразность внедрения фильтро-компенсирующих устройств в системах электроснабжения предприятий.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARDING DEGREE OF DOCTOR OF
SCIENCE DSc.05/2025.28.11.T.02.01
AT INSTITUTE OF ENERGY PROBLEMS OF ACADEMY OF SCIENCES
OF THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN**

**INSTITUTE OF ENERGY PROBLEMS OF THE ACADEMY OF SCIENCES
OF THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN**

MURTAZOV SHERZOD ISAKBAEVICH

**IMPROVING THE RELIABILITY OF POWER SUPPLY SYSTEMS
THROUGH THE USE OF COMPENSATING DEVICES**

05.05.01 – Energy systems and complexes

**DISSERTATION ABSTRACT OF DOCTOROL OF PHILOSOPHY (PhD)
ON TECHNICAL SCIENCES**

Ташкент – 2026

The topic of dissertation of doctor of philosophy (PhD) in technical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission under the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan under number B2025.4.PhD/T6206.

The dissertation was completed at the Institute of Energy Problems of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan.

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

Scientific supervisor:

Tolipov Jamshid Nurbekovich

Doctor of Philosophy in Technical Sciences, Senior Researcher

Official opponents:

Khamidov Shukhrat Vakhidovich

Doctor of technical sciences, Professor.

Khaliknazarov Urolboy Abdurakhmanovich

Doctor of Philosophy in Technical Sciences, Associate Professor

Leading organization:

Bukhara State Technical University

The defense of the dissertation will take place on "14" avqust 2026 at 10⁰⁰ hours at a meeting of the Scientific Council DSc.05/2025.28.11.T.02.01 at the Institute of Energy Problems of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan (Address: 40, Durmon yuli str., Tashkent, 100125, Uzbekistan. Phone number: (+998 55) 520-01-52, e-mail: energetika_in@umail.uz).

The dissertation can be found at the Information and Resource Center of the Institute of Energy Problems of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan (Registration number 6) (Address: 40, Durmon yuli str., Tashkent, 100164, Uzbekistan. Phone number: (+998 55) 520-01-52)

Abstract of the dissertation is posted "28" July 2026.

(Mailing Protocol No "5" dated "11" July 2026).



Kh.M. Muratov

Chairman of the Scientific Council for the awarding scientific degrees, Doctor of Technical Sciences, Professor

K.Sh. Kadirov

Acting Scientific Secretary of the Scientific Council for awarding scientific degrees, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher

O.Kh. Ishnazarov

Chairman of the Scientific Seminar under Scientific Council on awarding scientific degrees, Doctor of Technical Sciences, Professor

INTRODUCTION (PhD dissertation abstract)

The purpose of the research is to develop scientific solutions for improving the reliability of power supply systems through the application of compensating devices.

The tasks of the research are:

to improve the method for calculating and selecting a passive converter that increases the reliability of power supply systems by reducing the negative impact of consumers on electric power quality indicators and by compensating reactive power;

to improve a filter-compensation device that provides suppression of higher-order 5th and 7th harmonics and reactive power compensation in industrial power supply systems;

to develop a simulation model of passive filtering for industrial power supply systems implementing the processes of suppressing higher-order 5th and 7th harmonics;

to develop a mathematical model describing the processes of improving electric power quality, reducing harmonic distortions, and dynamically controlling reactive power using a filter-compensation device.

The scientific novelty of the research is as follows:

the method for calculating and selecting a passive converter that improves the reliability of power supply systems by reducing the negative impact of consumers on electric power quality indicators and compensating reactive power has been improved through determining the resonance frequencies of the 5th and 7th harmonics, matching the inductive and capacitive parameters of the filter, and increasing the load power factor;

the design of a filter-compensation device capable of suppressing higher-order 5th and 7th harmonics and compensating reactive power in industrial power supply systems has been improved by introducing structural modifications;

a simulation model of passive filtering for industrial power supply systems, enabling the implementation of higher-order 5th and 7th harmonic suppression processes, has been developed in the MATLAB Simulink environment;

a mathematical model enabling the description of processes for improving electric power quality, reducing harmonic distortions, and dynamically controlling reactive power using a filter-compensation device has been developed, taking weighting coefficients into account as input parameters.

Implementation of research results.

Based on the results obtained in improving the reliability of power supply systems through the application of compensating devices:

a filter-compensation device designed to improve electric power quality indicators, suppress higher-order harmonic components, and provide optimal reactive power compensation has been implemented at “SULTON TEX GROUP” LLC (reference of JSC “Hududiy elektr tarmoqlari” dated October 30, 2025, No. 01-02-08/1645). As a result, in the enterprise’s 0.4 kV distribution network, electric energy losses were reduced by 12–15%, the total harmonic distortion of voltage was decreased to 5–7%, and the power factor was increased up to 0.99;

an algorithm, simulation model, and software product developed to improve electric power quality and ensure optimal reactive power compensation, taking into account consumer power, load profiles, network parameters, and harmonic composition, have been implemented at “SULTON TEX GROUP” LLC (reference of JSC “Hududiy elektr tarmoqlari” dated October 30, 2025, No. 01-02-08/1645). As a result, due to the reduction of electric energy losses and improvement of power supply system reliability, an economic efficiency of 125,000,000 UZS per year has been achieved.

Publication of research results. A total of 14 scientific papers have been published on the topic of the dissertation, including 8 articles in journals recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for publishing the main scientific results of dissertations - 1 paper in international and 7 papers in national journals and obtained for 1 computer program.

Volume and structure of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references, and an appendix. The total volume of the dissertation is 120 pages.

E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YHATI
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I bo'lim (I часть; I part)

1. Eshpulatov N.M., Murtazov Sh.I. 0,4 kV kuchlanishli qishloq elektr tarmoqlarida reaktiv quvvatni kompensatsiyalash asosida elektr energiyasi sifatini yaxshilash // Agro ilm - O'zbekiston qishloq va suv xo'jaligi, 2022-yil, 5-son, 103-105-b. (05.00.00; № 3) <https://qxjurnal.uz/index.php/ai/issue/view/51/51>
2. Ibragimov M., Eshpulatov N.M., Murtazov Sh.I. Reaktiv quvvatni kompensatsiyalashda kondensator qurilmasidan samarali foydalanish // Agro ilm - O'zbekiston qishloq va suv xo'jaligi, 2022-yil, 6-son, 89-90-b. (05.00.00; № 3) <https://qxjurnal.uz/index.php/ai/issue/view/52/52>
3. Ibragimov M., Eshpulatov N.M., Murtazov Sh.I. Qishloq elektr tarmoqlarida filtrlı kompensator qurilmasi yordamida reaktiv quvvatni kompensatsiyalash // "Irrigatsiya va melioratsiya" jurnali, Maxsus son. 2022-yil, 236-241-b. (05.00.00; №22)
4. Tolipov J.N., Murtazov Sh.I., Tolipov F.N. Ensuring the reliability of voltage and frequency control in modern power grids // Peer Reviewed International Journal Texas Journal of Engineering and Technology, August 2025, pp 5-7 («Impakt-faktor»ga ega (14) ResearchBib) <https://zienjournals.com/index.php/tjet/article/view/6361/5152>
5. Murtazov Sh.I., Tolipov J.N. Elektr ta'minoti tizimining rezonans rejimini tarmoq kuchlanishi sifat darajasiga ta'sirini baholash // Journal of Transport scientific-technical and innovation journal, Volume 2, ISSUE 4, December, 2025, pp. 58-61 (05.00.00; №11) <https://jot.tstu.uz/index.php/jot-journal/article/view/260>
6. Tolipov J.N., Murtazov Sh.I., Norboyev A.E. 0,4 kV tarmoqlarda reaktiv quvvatni kompensatsiyalashning elektr energiyasi sifat ko'rsatkichlariga ta'siri // Innovatsion texnologiyalar ilmiy-texnika jurnali, 2025-yil, 3-son, 86-94-b. (05.00.00; №38) <https://www.innotex-journal.uz/article.php?id=90&download=1>
7. Tolipov J.N., Murtazov Sh.I., Axmadjanova Sh.Sh. Filtrlı kompensatsiya qurilmalari yordamida tarmoqdagi garmonika va rezonans ta'sirlarini kamaytirish // Farg'ona davlat texnika universiteti "Ilmiy-texnika jurnali", 2025-yil, Maxsus 17-son, 100-107-b. (05.00.00; №20)
8. Tolipov J.N., Murtazov Sh.I. Filtrlı kompensatsiya qurilmalari yordamida elektr energiyasi sifatini oshirish // Journal of Transport scientific-technical and innovation journal, Volume 2, ISSUE 4 December, 2025, pp. 160-164 (05.00.00; №11) <https://jot.tstu.uz/index.php/jot-journal/article/view/290>

II bo'lim (II часть; II part)

9. Tolipov J.N., Murtazov Sh.I. Elektr ta'minot tizimlarida reaktiv quvvatni kompensatsiyalovchi qurilmalarning parametrlari // "Avtomatlashtirish tizimlari va yashil energetika muammolari: ishlab chiqarishda, fan va ta'limda" respublika ilmiy - amaliy anjumani, Qarshi sh., 2024-yil, 18-19-oktyabr, 584-590-b.

<https://staff.tiiame.uz/storage/users/402/articles/NjZ4WocGvEZWN0jn2gkocppUOtGjBdO6J7U9oiKb.pdf>

10. Ибрагимов М., Машарипов Х.Б., Муртазов Ш.И., Юсупов Р.Р. Повышение эксплуатационной надёжности двигателей снижением отсырения изоляции // “Қишлоқ хўжалиги маҳсулотларини етиштириш, сақлаш ва қайта ишлашда илғор агротехнологиялардан самарали фойдаланиш, ирригация ва мелиорация тизимларини ривожлантириш: муаммо ва ечимлар”: Республика илмий-амалий анжумани мақолалари тўплами. Тошкент-2015 йил, 16-17 апрель, 255-257-б.

11. Муртазов Ш., Машарипов Х., Ибрагимов М. Обоснование степени регулирования мощности конденсаторных установок // “Қишлоқ ва сув хўжалигининг замонавий муаммолари” мавзусидаги анъанавий XV - ёш олимлар, магистрантлар ва иқтидорли талабаларнинг илмий-амалий анжумани Тошкент- 2016 йил, 15-16 апрель, 61-64-б.

12. Муртазов Ш.И., Толипов Ж.Н. Влияние резонансного режима в системах электроснабжения на показатели качества напряжения // «Advances in Science and Technology» LXXI Международная научно-практическая конференция, г. Москва (Россия), 15 сентября 2025 г., с. 70-71

https://xn--80aa3afkgvdf5he.xn--p1ai/AST-71_originalmaket_N.pdf

13. Муртазов Ш.И., Толипов Ж.Н. Анализ потерь электроэнергии в электрических сетях и методов их снижения // «Advances in Science and Technology» LXXI Международная научно-практическая конференция, г. Москва (Россия), 15 сентября 2025 г., с. 72-74

https://xn--80aa3afkgvdf5he.xn--p1ai/AST-71_originalmaket_N.pdf

14. Murtazov Sh.I., Tolipov J.N. Elektr energiyasi sifatini oshirish uchun filtr-kompensatsiya qurilmasini asoslash algoritmi // O‘zbekiston Respublikasi Adliya vazirligi tomonidan berilgan elektron hisoblash mashinalari uchun guvohnoma. DGU 60319, 20.02.2026 y.

Босишга рухсат этилди: 24.07.2026 йил
Бичими 60x84 1/16, «Times New Roman»
гарнитуроюда рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табоғи 3,25. Адади: 60. Буюртма: № 68.
Тошкент тўқимачилик ва енгил саноат босмахонасида чоп этилган.
Манзил: 100100, Тошкент ш., Шохжаҳон кўчаси, 5- уй.

