Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union

O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASI
OLIY TA’LIM, FAN VA INNOVATSIYALAR VAZIRLIGI

E. ABDULLAYEV, B. NARIMONOV,
J. TULAKOV, M. ANARBOEV

ELEKTROTEXNIK QURILMALAR

O‘quv qo‘llanma

JIZZAX – 2025

UDK.620.92

M. Anarboyev, J.Tulyakov, E.Abdullayev B. Narimonov. Elektrotexnik qurulmalar .

JizPI, 2025 y, 221 b.

Elektrotexnika — bu elektr energiyasining hosil bo‘lishi, uzatilishi, taqsimlanishi va turli shakllarga aylantirilish jarayonlarini o‘rganadigan fan bo‘lib, uning amaliy qismi elektrotexnik qurilmalarda mujassamdir. Elektrotexnik qurilmalar elektr energiyani ishlab chiqarishdan tortib uni iste’molchiga yetkazishgacha bo‘lgan barcha bosqichlarda asosiy texnik vosita sifatida ishlaydi. Bugungi kunda elektrotexnik qurilmalar energetika, transport, ishlab chiqarish, qishloq xo‘jaligi, axborot texnologiyalari va hatto tibbiyot sohalarida muhim o‘rin tutadi. O’quv qo’llanma “DEBSEUz —ERASMUS-EDU-2023-CBHE—101128871”ra qamli, “O‘zbekistonda quyosh energiyasi bo‘yicha bakalavrlar uchun maqsadli ta'lim dasturini (DEBSEUz) ishlab chiqish” xalqaro loyihasi doirasida tayyorlangan.

Taqrizchilar: E. Rabbimov - JizPI, “RE va EQ” kafedrasi dotsenti, texnika f.m.f.n.

I. Saidmuradov– JVET korxonasi muhandisi.

MUNDARIJA

I BOB. ELEKTROTEXNIK QURILMALAR 5

1.1. Elektrotexnik qurilmalarning mohiyati va asosiy atamalar 5

1.2. Transformatorlar turlari va ularning qo‘llanilish sohalari 13

1.3. Bir fazali transformatorning tuzilishi va ishlash prinsipi..... 24

1.4. Transformatorning elektr yuklama holati va energiya yo‘qotishlari 49

1.5. Transformatorning keltirilgan sxemasi va hisoblash usullari 73

1.6. Transformatorning T-shaklli o‘rinbosar sxemasi..... 97

1.7. Transformatorning bo‘sh yurish sinovi va tahlili..... 114

1.8. Transformatorning qisqa tutashuv tajribasi va natijalarini tahlil qilish 120

1.9. Transformatorning tashqi xarakteristikasi va kuchlanish o‘zgarishi 128

1.10. Uch fazali transformatorlarning tuzilishi va ishlash prinsiplari..... 136

1.11. Transformatorlarning parallel ulanish shartlari va samaradorligi..... 142

1.12. Transformatorning foydali ish koeffitsientini aniqlash usullari 150

1.13. Transformatorning issiqlik barqarorligi va sovutish tizimlari 157

II-BOB. ELEKTR MASHINALAR 166

2.1. Elektr mashinalarning umumiy tushunchasi va tasnifi 166

2.2. Asinxron mashinalarning ishlash prinsipi va asosiy elementlari..... 169

2.3. Uch fazali asinxron dvigatelning tuzilishi va vazifalari 177

2.4. Asinxron dvigatelning o‘rinbosar sxemasi (T-shaklli model) 183

2.5. Elektromagnit moment va aylanish tezligi o‘rtasidagi bog‘liqlik 190

III-BOB.“TRANSFORMATORLAR” MAVZUSI BO‘YICHA LABORATORIYA ISHLARI UCHUN METODIK KO‘RSATMALAR..... 197

Laboratoriya ishi №1. Transformatorning bo‘sh yurish tajribasini o‘rganish..... 197

Laboratoriya ishi №2. Qisqa tutashuv tajribasi va yo‘qotishlarni aniqlash..... 198

Laboratoriya ishi №3. Transformatorning tashqi xarakteristikasini olish 198

Laboratoriya ishi №4. Transformatorning yuklama holatidagi ishlashini tahlil qilish 198

Laboratoriya ishi №5. Transformatorning foydali ish koeffitsientini aniqlash 199

IV-BOB.“ELEKTRODVIGATELLAR” MAVZUSI BO‘YICHA LABORATORIYA ISHLARI UCHUN METODIK KO‘RSATMALAR..... 200

Laboratoriya ishi №1: asinxron dvigatelning konstruksiyasini o‘rganish 200

Laboratoriya ishi №2: asinxron dvigatelni ishga tushirish usullarini sinovdan o‘tkazish 202

Laboratoriya ishi №3: asinxron dvigatelning mexanik xarakteristikasini aniqlash 206

Laboratoriya ishi №4: sinxron dvigatelning asosiy ko‘rsatkichlarini o‘lchash 209

Laboratoriya ishi №5: dvigatel aylanish tezligini tartibga solish usullari 212

Laboratoriya ishi №6: sinxron kompensatorning ishlash jarayonini kuzatish..... 214

Laboratoriya ishi №7: elektr mashinalarning issiqlik va sovutish tizimini tekshirish 216

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR..... 219

I BOB. ELEKTROTEXNIK QURILMALAR

1.1. Elektrotexnik qurilmalarning mohiyati va asosiy atamalar

Elektrotexnika — bu elektr energiyasining hosil bo‘lishi, uzatilishi, taqsimlanishi va turli shakllarga aylantirilish jarayonlarini o‘rganadigan fan bo‘lib, uning amaliy qismi elektrotexnik qurilmalarda mujassamdir. Elektrotexnik qurilmalar elektr energiyani ishlab chiqarishdan tortib uni iste’molchiga yetkazishgacha bo‘lgan barcha bosqichlarda asosiy texnik vosita sifatida ishlaydi. Bugungi kunda elektrotexnik qurilmalar energetika, transport, ishlab chiqarish, qishloq xo‘jaligi, axborot texnologiyalari va hatto tibbiyot sohalarida muhim o‘rin tutadi. Ularning asosiy vazifasi — energiya almashinuvi, nazorat va boshqaruv jarayonlarini samarali, xavfsiz va iqtisodiy jihatdan foydali tarzda tashkil etishdir.

O‘zbekiston Respublikasida elektrotexnika sohasi **“Yashil iqtisodiyot strategiyasi – 2030”, “Energiya samaradorligini oshirish dasturi” (PQ–381, 2022) va “Raqamli O‘zbekiston – 2030”** konsepsiyalari doirasida faol rivojlanmoqda. Shu sababli, muhandislik yo‘nalishidagi mutaxassislar uchun elektrotexnik qurilmalar haqidagi bilimlar asosiy professional kompetensiya sifatida qaraladi.

Elektrotexnik qurilma — bu elektr energiyasini ishlab chiqarish, o‘zgartirish, uzatish, taqsimlash va iste’mol qilish uchun xizmat qiluvchi texnik vositalar majmui. Ular oddiy elektr lampadan tortib, murakkab energetik stansiyalar, transformator punktlari, avtomatik boshqaruv tizimlari va raqamli nazorat panellarigacha bo‘lgan keng doirani qamrab oladi.

Tarixiy rivojlanish bosqichlari

Jadval-1.1.1

Davr	Kashfiyot / Yutuq	Olim yoki kompaniya
XVIII asr	Elektr zaryadi va tok tushunchasi	B. Franklin, A. Volta
XIX asr boshlarida	Elektromagnit induksiya qonuni	M. Faradey
XIX asr o‘rtalari	Om qonuni, Joule-Lents qonuni	G. Om, J. Joule
XX asr boshlarida	Elektr mashinalar, transformatorlar	N. Tesla, M. Dolivo-Dobrovolskiy
XXI asr	Avtomatlashtirilgan va raqamli tizimlar	Siemens, ABB, Schneider Electric

Tarixan, elektrotexnik qurilmalar dastlab mexanik harakatni elektr energiyaga aylantirish yoki aksincha, elektr energiyani mexanik ishga aylantirish maqsadida yaratilgan. Bugungi kunda ular aqlli boshqaruv, energiya tejash va avtomatlashtirish funksiyalari bilan boyitilgan.

Har bir elektrotexnik tizimning ishlash prinsipi elektr tok, kuchlanish, qarshilik, quvvat, energiya kabi asosiy fizik kattaliklarga tayanadi.

Tok, kuchlanish va qarshilik

Elektr tok (I) — bu elektr zaryadlarining tartibli harakati. Tok kuchi quyidagicha aniqlanadi:

$$I = \frac{q}{t}$$

bu yerda:

q — o‘tgan zaryad miqdori (Kulon),

t — vaqt (sekund).

Kuchlanish (U) — elektr maydonining zaryadni harakatlantiruvchi potensial farqidir.

Qarshilik (R) — tok o‘tishiga to‘sqinlik qiluvchi modda xususiyati. Bu bog‘lanish Om qonuni bilan ifodalanadi:

$$U = I \cdot R$$

Bu tenglama barcha elektr qurilmalarning ishlashining nazariy asosi hisoblanadi.

Quvvat va energiya

Quvvat (P) — ma’lum vaqt ichida bajarilgan elektr ish miqdoridir.

$$P = U \cdot I$$

Energiya (W) esa quvvatning vaqt bo‘yicha yig‘indisi sifatida aniqlanadi:

$$W = P \cdot t$$

Energiya hisoblashda **kVt·soat (kilovatt-soat)** amaliy o‘lchov birligi sifatida ishlatiladi.

Asosiy atamalar jadvali

Jadval-1.1.2

№	Atama	Belgilanishi	O‘lchov birligi	Ta’rif
1	Elektr tok	I	A	Zaryadlarning tartibli harakati
2	Kuchlanish	U	V	Elektr potensiallar farqi
3	Qarshilik	R	Ω	Tok o‘tishiga to‘sqinlik darajasi
4	Quvvat	P	W	Vaqt birligida bajarilgan ish miqdori
5	Energiya	W	J yoki kVt·soat	Quvvatning vaqt bo‘yicha yig‘indisi

№	Atama	Belgilanishi	O‘lchov birligi	Ta’rif
6	Sig‘im	C	F	Zaryad to‘plash qobiliyati
7	Induktivlik	L	H	Magnit maydon hosil qilish qobiliyati
8	Reaktiv quvvat	Q	var	Energiya almashinuvi jarayonidagi kechikish komponenti

Elektr tizimlarining tasnifi

Elektrotexnik tizimlar quyidagi mezonlarga ko‘ra tasniflanadi:

Jadval-1.1.3

Tasnif belgisi	Turi	Qo‘llanish sohasi
Tok turi	Doimiy tok (DC) / O‘zgaruvchan tok (AC)	Batareyalar, generatorlar, tarmoqlar
Kuchlanish darajasi	Past (≤1 kV), O‘rta (≤35 kV), Yuqori (>110 kV)	Maishiy, sanoat, energetika
Funktsiyasi	Ishlab chiqarish, uzatish, iste’mol qilish	Stansiyalar, transformatorlar, iste’molchilar
Boshqaruv turi	Qo‘lda, avtomatik, raqamli	PLC, SCADA, Smart-Grid tizimlari

Tizimlarning umumiy sxemasi

[Generator] → [Transformator] → [Uzatish liniyasi] → [Taqsimot punktlari] → [Iste’molchi]

Bu zanjirda har bir bo‘g‘in o‘z vazifasiga ega:

Generator *— elektr energiyani ishlab chiqaradi;*

Transformator *— kuchlanishni o‘zgartiradi;*

Uzatish liniyasi *— energiyani uzoq masofalarga uzatadi;*

Taqsimot punktlari *— energiyani tarmoqlarga taqsimlaydi;*

Iste’molchi *— elektr energiyani foydali ishga aylantiradi*.

Energetika tizimlarida elektrotexnik qurilmalarning o‘rni

O‘zbekiston energetika tizimida har bir transformator, generator, elektr dvigatel yoki taqsimot paneli ishlab chiqarish samaradorligiga bevosita ta’sir qiladi.

Misol uchun:

- 220/380 V tarmoqlar — maishiy va kichik ishlab chiqarish uchun;
- 6–10 kV tarmoqlar — lokal korxonalar va shahar infratuzilmasi uchun;
- 110–500 kV magistral tarmoqlar — yirik elektr uzatish liniyalari uchun ishlatiladi.

Kuchlanish va quvvat birliklari -Jadval-1.1.4

Kuchlanish	**Qiymati**	**Qo‘llanish sohasi**
220 V	Maishiy tarmoqlar	Maishiy texnika
380 V	Sanoat tarmoqlari	Dvigatellar, nasoslar
6–10 kV	Mahalliy energiya tarmoqlari	Transformator punktlari
35–110 kV	Shahar energetikasi	Ta’minot tarmoqlari
220–500 kV	Magistral liniyalar	Respublika tarmoqlari

Zamonaviy rivojlanish yo‘nalishlari

Bugungi kunda elektrotexnik qurilmalar quyidagi yo‘nalishlarda takomillashmoqda:

- Energiyani tejovchi materiallar va yuqori samarali o‘tkazgichlar;
- Raqamli monitoring va avtomatik diagnostika;
- “Aqlli tarmoqlar” (Smart Grids) va masofaviy boshqaruv tizimlari;
- IoT asosida ishlovchi transformator va dvigatellar.

Misol uchun, Siemens kompaniyasi ishlab chiqargan **“Sensformer”** texnologiyasi transformatorlarning harorat, yuklama va namlik holatini onlayn tahlil qilib, ularni avtomatik boshqarish imkonini beradi.

Elektrotexnik qurilmalar — energetika tizimining poydevori. Ular elektr energiyani ishlab chiqarishdan tortib, iste’molchigacha uzatish jarayonida samaradorlik, barqarorlik va xavfsizlikni ta’minlaydi.

Ushbu qurilmalarni o‘rganish muhandislarga: tizimlarni to‘g‘ri loyihalash, yo‘qotishlarni kamaytirish, avtomatlashtirish va energiya tejash texnologiyalarini joriy etish imkonini beradi.

Test savollari

1. Elektrotexnik qurilmalar nima uchun xizmat qiladi?

A) Elektr energiyani ishlab chiqarish, uzatish, taqsimlash va iste’mol qilish uchun

B) Faqat mexanik energiyani o‘zgartirish uchun

C) Faqat elektr signalini kuchaytirish uchun

D) Issiqlik energiyasini saqlash uchun

2. Elektr tokining o‘lchov birligi qaysi?

A) Volt (V)

B) Om (Ω)

C) Amper (A)

D) Joule (J)

3. Quyidagi formulalardan qaysi biri Om qonunini ifodalaydi?

A) P=U·IP = U \cdot IP=U·I

B) U=I·RU = I \cdot RU=I·R

C) W=P·tW = P \cdot tW=P·t

D) I=qtI = \frac{q}{t}I=tq

4. Elektr energiyani foydali ishga aylantiruvchi qurilmalar qanday nomlanadi?

A) Transformatorlar

B) Generatorlar

C) Iste’molchilar

D) O‘lchov asboblari

5. “Yuqori kuchlanishli tizim” deganda qanday tarmoq tushuniladi?

A) 12–24 V

B) 220–380 V

C) 6–10 kV

D) 110 kV va undan yuqori

6. Elektr energiya zanjirida generatorning asosiy vazifasi nima?

A) Tokni kamaytirish

B) Elektr energiyani hosil qilish

C) Kuchlanishni o‘zgartirish

D) Energiya sarfini hisoblash

7. Qaysi qurilma kuchlanishni oshiradi yoki kamaytiradi?

A) Generator

B) Transformator

C) Reostat

D) Ampermetr

8. Elektr tizimlarida energiya oqimi qanday yo‘nalishda amalga oshadi?

A) Iste’molchidan generator tomon

B) Transformator → Generator → Uzatish liniyasi

C) Generator → Transformator → Uzatish liniyasi → Iste’molchi

D) Uzatish liniyasi → Taqsimot punktlari → Transformator

9. Quyidagilardan qaysi biri asosiy elektrotexnik kattalik emas?

A) Quvvat

B) Energiya

C) Tok

D) Bosim

10. O‘zbekiston energetika tizimida 35–110 kV tarmoqlar asosan qayerda qo‘llaniladi?

A) Magistral uzatish liniyalarida

B) Uy-ro‘zg‘or tarmoqlarida

C) Shahar va sanoat tarmoqlarida

D) Mobil qurilmalarda

Test savollari

1. Elektrotexnik qurilma deganda nimani tushunasiz? Uning asosiy vazifalarini yozing.
2. Elektrotexnika fanining rivojlanishiga katta hissa qo‘shgan olimlardan kamida uchtasini nomlang va ularning kashfiyotlarini qisqacha tushuntiring.
3. Elektr tokining, kuchlanishning va qarshilikning o‘zaro bog‘liqligini izohlang. Om qonunini formula va so‘z bilan ifoda eting.
4. Quvvat va energiya tushunchalari o‘rtasidagi farqni tushuntiring va ular o‘rtasidagi matematik bog‘lanishni yozing.
5. Elektr energiya tizimlarining kuchlanish darajalariga ko‘ra tasnifini yozing va har biriga misol keltiring.
6. Elektr energiya zanjirining asosiy qismlarini ketma-ket tartibda yozing va ularning vazifalarini qisqacha tushuntiring.
7. O‘zbekiston energetika tizimida elektrotexnik qurilmalarning o‘rni va ahamiyatini tahlil qiling. “Yashil energetika – 2030” strategiyasi bilan bog‘lab yozing.
8. Zamonaviy elektrotexnik qurilmalar rivojlanishining uchta asosiy yo‘nalishini sanab o‘ting va ularning afzalliklarini yozing.

9. “Smart transformer” yoki raqamli boshqariluvchi transformatorlar qanday ishlaydi? Ularning oddiy transformatorlardan farqi nimada?
10. Elektrotexnik qurilmalarni o‘rganish muhandislik amaliyotida qanday ahamiyatga ega? O‘zingizning fikringizni bayon qiling.

Foydalanilgan manbalar

1. Розенберг Е.А. Электротехнические устройства. – Москва: Академия, 2019.
2. Sayfullayev A. Elektr mashinalari. – Toshkent: TATU, 2022.
3. IEEE Transactions on Power Delivery. – 2021.
4. O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining PQ–381-son qarori, 2022-yil.
5. ScienceDirect: Electric Power Systems Research, 2020.
6. O‘zbekiston Energetika vazirligi normativ hujjatlari, 2023.

1.2. Transformatorlar turlari va ularning qo‘llanilish sohalari

Bugungi kunda elektroenergetika tizimining har bir bo‘g‘inida transformatorlar yetakchi o‘rin egallaydi. Ular elektr energiyani bir kuchlanish darajasidan boshqasiga o‘zgartirish orqali ishlab chiqarish, uzatish va taqsimlash jarayonlarini samarali tashkil etish imkonini beradi.

Transformator — oddiy qurilma emas, balki butun elektr tizimining markaziy **“ko‘prigi”**, energetika ishonchliligi va tejamkorligining garovidir. O‘zbekiston energetika tizimida transformatorlardan foydalanish tarixi 1930-yillarga borib taqaladi. Dastlabki transformatorlar Toshkent elektr stansiyasida, keyinchalik Navoiy va Farg‘ona hududlarida o‘rnatilgan. Bugungi kunda esa ular ishlab chiqarishdan tortib, maishiy sohalargacha keng qo‘llanmoqda.

Transformator — elektromagnit induksiya hodisasiga asoslangan qurilma bo‘lib, u o‘zgaruvchan tokning kuchlanishini yoki tok kuchini o‘zgartirish imkonini beradi. Qurilma chastotani o‘zgartirmaydi, ya’ni elektr energiyaning chastotasi 50 Gts bo‘lsa, chiqishda ham shu qiymat saqlanadi. Bu hodisa Faradey tomonidan 1831-yilda aniqlangan elektromagnit induksiya qonuniga asoslanadi.

Unga ko‘ra, o‘zakdagi magnit oqim o‘zgarganda unga o‘ralgan simda elektr yurituvchi kuch (EYuK) hosil bo‘ladi:

$$E = -N\frac{d\Phi}{dt}$$

bu yerda:

E — induksiyalangan kuchlanish,

N — o‘ramlar soni,

Φ — magnit oqim.

Shu qonunga asoslanib, transformatorlar ishlab chiqilgan va ular o‘zgaruvchan tok tarmoqlarida asosiy energetik bog‘lovchi sifatida ishlay boshlagan.

Transformatorlarning asosiy qismlari

Transformatorlar turli ko‘rinishda bo‘lishiga qaramay, ularning asosiy qismlari bir xil:

1. Magnit o‘zak (yadro) — po‘lat plastinkalardan yig‘ilgan ferromagnit materialdan iborat bo‘lib, magnit oqimni yo‘naltiradi.
2. Birlamchi chulg‘am — tarmoq kuchlanishini qabul qilib, magnit oqim hosil qiladi.
3. Ikkilamchi chulg‘am — hosil bo‘lgan magnit oqim ta’sirida induksiyalangan kuchlanishni chiqaradi.
4. Izolyatsiya — chulg‘amlar orasidagi xavfsizlikni ta’minlaydi.
5. Sovutish tizimi — issiqlikni tarqatadi, yog‘li yoki quruq tipda bo‘lishi mumkin.

Bu elementlarning uyg‘un ishlashi transformatorning samaradorligini belgilaydi.

Transformatorning ishlash jarayoni juda oddiy, ammo chuqur fizik mazmunga ega. Birlamchi chulg‘amga o‘zgaruvchan tok berilganda, o‘zakda o‘zgaruvchan magnit maydon hosil bo‘ladi. Bu magnit maydon ikkilamchi chulg‘amni kesib o‘tadi va unda yangi kuchlanish hosil qiladi.

Agar chulg‘amlarning o‘ram sonlari quyidagicha belgilanadigan bo‘lsa:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

demak, o‘ramlar soni ortsa — chiqish kuchlanishi oshadi (kuchaytiruvchi transformator), kamaytirilsa — chiqish kuchlanishi pasayadi (pasaytiruvchi transformator).

Masalan: Toshkent issiqlik elektr stansiyasida 10 kV kuchlanishli generatorlardan chiqayotgan energiya 220 kV gacha oshiriladi, so‘ng magistral liniyalar orqali uzatiladi va mahalliy transformator punktlarida 0,4 kV gacha tushiriladi.

Transformatorlarning energetik tizimdagi o‘rni

Elektr energiyani ishlab chiqarishdan tortib iste’molgacha bo‘lgan yo‘l quyidagi bosqichlarda amalga oshadi:

- Ishlab chiqarish (elektr stansiya) — generator 6–11 kV kuchlanishda energiya hosil qiladi.
- Uzatish (magistral tarmoq) — kuchlanish 110–220 kV gacha oshiriladi.
- Taqsimlash (podstansiyalar) — kuchlanish 35–10 kV gacha pasaytiriladi.
- Iste’mol (korxona yoki xonadon) — 0,4 kV gacha kamaytiriladi.

Har bir bosqichda transformatorlar ishlaydi. Ular yo‘qotishlarni kamaytiradi, kuchlanish barqarorligini saqlaydi va elektr ta’minotining uzluksizligini ta’minlaydi.

Transformatorlar energiya uzatishda samaradorlik koeffitsienti juda yuqori bo‘lsa-da, yo‘qotishlar butunlay yo‘q emas. Ular ikki asosiy turga bo‘linadi:

- Magnit yo‘qotishlar — o‘zakdagi histerezis va girdob toklar tufayli issiqlikka aylanadigan energiya.

- Elektr yo‘qotishlar — mis chulg‘amlarda issiqlik shaklida yo‘qoladigan energiya.

Zamonaviy transformatorlarda bu yo‘qotishlarni kamaytirish uchun silikon po‘latdan yasalgan o‘zaklar, issiqqa chidamli emal izolyatsiyalar va avtomatik sovutish tizimlari qo‘llaniladi.

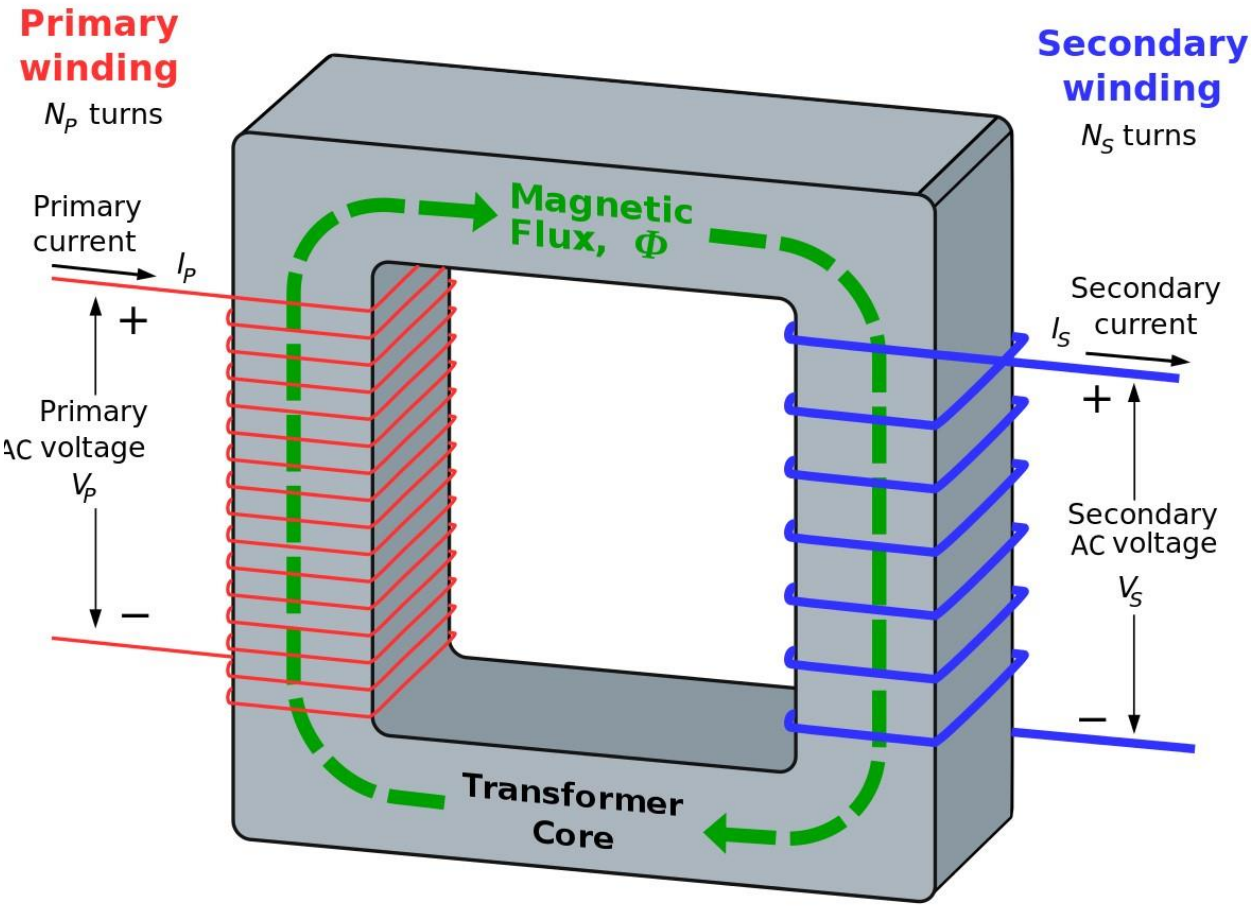
Transformator ishlayotganida issiqlik hosil bo‘ladi. Agar bu issiqlik vaqtida chiqarilmasa, chulg‘amlar izolyatsiyasi shikastlanadi va transformatorning xizmat muddati qisqaradi. Shu sababli, har bir transformator sovutish tizimiga ega:

- Yog‘ bilan sovutiluvchi — katta quvvatli transformatorlarda qo‘llanadi; issiqlik yog‘ orqali tashqariga uzatiladi.
- Quruq sovutishli — ventilyator yordamida havo aylanishi bilan sovutiladi; binolarda xavfsiz ishlaydi.

O‘zbekiston Energetika vazirligining 2023-yilgi me’yorlariga ko‘ra, 1000 kVA dan yuqori quvvatli transformatorlar uchun yog‘ bilan sovutish tizimi majburiy hisoblanadi.

So‘nggi yillarda dunyo bo‘ylab energetika tarmoqlari raqamlashtirilmoqda. Shu jarayonda “aqlli transformatorlar” (smart transformers) paydo bo‘ldi. Ular harorat, yuklama, yog‘ bosimi, tebranish darajasini onlayn kuzatadi va avariyaviy holatlarda avtomatik o‘chadi. Masalan, Siemens Sensformer tizimi SCADA orqali real vaqt rejimida nazorat qilinadi, ABB TXplore esa dron texnologiyasi yordamida yog‘li transformator ichini avtomatik tahlil qiladi. Bu texnologiyalar O‘zbekiston elektr tarmoqlarida ham bosqichma-bosqich joriy etilmoqda.

1.2.1-rasm. Transformatorning ishlash prinsipi



Transformatorning ishlash prinsipi. Rasmda birlamchi va ikkilamchi chulg‘amlar, magnit oqim yo‘nalishi hamda tok-kuchlanish munosabatlari ko‘rsatilgan. Ushbu chizma transformatorning elektromagnit induksiya asosida ishlash mexanizmini ifodalaydi.

🔻 Birlamchi chulg‘am (Primary winding) — rasmning chap tomonida qizil rang bilan tasvirlangan. Bu chulg‘amga o‘zgaruvchan tok manbai ulanadi va u orqali birlamchi kuchlanish (Vp) hosil bo‘ladi. Tok chulg‘am o‘ramlaridan o‘tganida, magnit maydon paydo bo‘ladi. Bu maydon po‘lat o‘zak orqali yopiq yo‘nalishda harakatlanadi.

🔻 Magnit oqim (Magnetic flux, Φ) — yashil chiziq bilan ko‘rsatilgan. Bu o‘zak bo‘ylab aylanadigan elektromagnit oqimdir. Aynan shu oqim energiyani birlamchi chulg‘amdan ikkilamchi chulg‘amga mexanik aloqa bo‘lmasdan, faqat elektromagnit induksiya orqali uzatadi. Bu hodisa Faradey qonuni bilan izohlanadi:

$$E = -N\frac{d\Phi}{dt}$$

ya’ni o‘zakdagi magnit oqim o‘zgarishi chulg‘amda elektr yurituvchi kuch (EYuK) hosil qiladi.

🔻 Ikkilamchi chulg‘am (Secondary winding) — rasmning o‘ng tomonida ko‘k rang bilan ifodalangan. Bu chulg‘am birlamchi chulg‘am bilan bevosita ulangan emas, lekin o‘zak orqali magnit bog‘lanishda bo‘ladi. O‘zakdagi o‘zgaruvchan magnit oqim bu chulg‘amda ham induksiyalanib, ikkilamchi kuchlanish (Vs) hosil qiladi. Shu tarzda elektr energiya bir kuchlanish darajasidan boshqasiga o‘zgartiriladi.

🔻 Tok yo‘nalishlari — har ikki chulg‘amda oqim yo‘nalishlari (Ip va Is) ko‘rsatilgan. Bu toklar qarama-qarshi yo‘nalgan, chunki birlamchi chulg‘amdagi magnit oqim o‘zgarishi ikkilamchi chulg‘amda teskari yo‘nalishda EYuK hosil qiladi.

🔻 O‘zak (Transformer core) — po‘latdan yasalgan ferromagnit material bo‘lib, magnit oqimning yopiq aylanishini ta’minlaydi. O‘zakning vazifasi — magnit oqimni to‘liq o‘tkazish va yo‘qotishlarni kamaytirish. Rasmda u kulrang shaklda ko‘rsatilgan.

Ishlash prinsipi bosqichma-bosqich:

- Birlamchi chulg‘amga o‘zgaruvchan tok beriladi, natijada magnit oqim hosil bo‘ladi.
- Magnit oqim o‘zak bo‘ylab aylanadi va ikkilamchi chulg‘amni kesib o‘tadi.
- Ikkilamchi chulg‘amda elektromagnit induksiya natijasida yangi kuchlanish hosil bo‘ladi.
- Chiqish kuchlanishining qiymati chulg‘amlar o‘ram soniga bog‘liq:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$ ya’ni, agar ikkilamchi chulg‘amdagi o‘ramlar soni birlamchidan ko‘p bo‘lsa, kuchlanish oshadi; agar kam bo‘lsa, pasayadi.

Rasmning fizik mazmuni

Bu rasm orqali transformatorning ishlashidagi energiya o‘tishning elektromagnit tabiati aniq ko‘rinadi:

- Elektr energiya magnit maydonga,
- Magnit maydon esa yana elektr energiyaga aylanadi.

Bu jarayon mexanik harakat yoki aloqa talab qilmaydi — ya’ni energiya to‘liq elektromagnit induksiya orqali o‘tadi. Shu sababli transformatorlar ishonchli, jim ishlaydigan va uzoq muddat xizmat qiluvchi qurilmalar hisoblanadi.

Texnik xususiyatlar bo‘yicha tushuntirish

- Birlamchi chulg‘amdagi kuchlanish (Vp) odatda 220 V dan 220 kV gacha bo‘lishi mumkin.
- O‘zakdagi magnit oqim chastotasi 50 Gts (O‘zbekiston tarmog‘i) bo‘lib, bu qiymat o‘zgarmaydi.
- Transformatorning samaradorligi 98–99% ni tashkil etadi.

Yog‘li turlarida sovutish samaradorligi yuqori, quruq turlar esa xavfsizligi bilan ajralib turadi.

O‘zbekiston olimlarining hissasi

Mahalliy mutaxassislar ham transformatorlar nazariyasi va texnologiyasi rivojiga salmoqli hissa qo‘shgan. Masalan:

T. To‘xtasinov (2009) — “Transformatorlar nazariyasi va amaliyoti” asarida issiqlik rejimini optimallashtirish usullarini taklif qilgan.

A. Abdug‘aniyev (2017) — transformator yog‘ining issiqlik o‘tkazuvchanligini oshirish uchun nanomateriallardan foydalanishni o‘rganib chiqqan.

R. Shukurov (2020) — “Elektrotexnik qurilmalarda energiya tejamkor yechimlar” nomli ishida transformatorlarni modernizatsiya qilishning iqtisodiy samaradorligini tahlil qilgan.

Shuningdek, Jizzax politexnika instituti va Farg‘ona davlat texnika universiteti laboratoriyalarida transformator sovutish tizimlari, izolyatsiya materiallari va issiqlik balansini o‘rganish bo‘yicha ilmiy ishlar olib borilmoqda.

Transformator — bu elektr energiyasining “ko‘rinmas dvigateli”. U tizimdagi kuchlanishni boshqarish, yo‘qotishlarni kamaytirish, va energiyani xavfsiz uzatish vazifasini bajaradi. Bugungi kunda transformatorlar faqat fizik qurilma emas, balki raqamli, ekologik va aqlli boshqaruv tizimi darajasiga ko‘tarilgan.
Ular O‘zbekistonning “Yashil iqtisodiyot” va “Energiya samaradorligi – 2030” dasturlarida markaziy texnologik element sifatida qaralmoqda.

Test savollari

1. Transformatorning asosiy vazifasi nimadan iborat?

A) Elektr tokining chastotasini oshirish
B) Elektr energiyasini bir kuchlanishdan boshqasiga o‘tkazish
C) Doimiy tokni o‘zgaruvchan tokka aylantirish
D) Mexanik energiyani elektr energiyasiga aylantirish

2. Transformatorning ishlash prinsipi qaysi qonunga asoslanadi?

A) Om qonuni
B) Faradeyning elektromagnit induksiya qonuniga
C) Nyuton qonuniga
D) Kirxgof qonuniga

3. Quyidagi formula transformatorning qaysi xususiyatini bildiradi?

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

A) Foydali ish koeffitsienti

B) Chulg‘amlarning issiqlik muvozanati

C) Kuchlanish va o‘ramlar soni orasidagi bog‘lanish

D) Magnit oqimning yo‘nalishi

4. Transformatorning o‘zak (yadro) materiali odatda nimalardan tayyorlanadi?

A) Alyuminiy plastinkalar

B) Ferromagnit po‘lat plastinkalar

C) Mis simlar

D) Grafit plastinalar

5. Transformatorlarda eng ko‘p uchraydigan energiya yo‘qotish turlari qaysilar?

A) Optik va issiqlik yo‘qotishlar

B) Elektr va magnit yo‘qotishlar

C) Mexanik va akustik yo‘qotishlar

D) Termik va kimyoviy yo‘qotishlar

6. Yog‘ bilan sovutiluvchi transformatorlar qayerda ko‘proq qo‘llaniladi?

A) Kichik maishiy tarmoqlarda

B) Laboratoriya sinovlarida

C) Katta quvvatli sanoat transformatorlarida

D) Batareya zaryadlovchi qurilmalarda

7. Zamonaviy “aqlli transformatorlar” qanday funksiyaga ega?

A) Tok chastotasini o‘zgartiradi

B) Harorat, yuklama va bosimni onlayn nazorat qiladi

C) Doimiy tok hosil qiladi

D) Elektr signalini kuchaytiradi

8. Transformatorning foydali ish koeffitsienti (η) nimalar nisbatida aniqlanadi?

A) Kuchlanish va tok

B) Chiqish va kirish quvvatlari

C) O‘ram sonlari va magnit oqimi

D) O‘zak materiali va izolyatsiya turi

9. O‘zbek olimlaridan qaysi biri transformatorlar bo‘yicha tadqiqot olib borgan?

A) M. Ulug‘bek

B) A. Abdug‘aniyev

C) I. Karimov

D) Sh. Rashidov

10. Transformatorlarning energetika tizimidagi asosiy roli nimada?

A) Elektr energiyani mexanik energiyaga aylantirish

B) Tok chastotasini o‘zgartirish

C) Kuchlanish darajasini moslashtirish va energiya yo‘qotishlarini kamaytirish

D) Tok yo‘nalishini teskari aylantirish

Savollar

1. Transformator tushunchasi nimani anglatadi?
2. Transformatorning ishlash prinsipi qaysi fizik qonunga asoslanadi?
3. Transformator o‘zak materiali sifatida nima uchun ferromagnit po‘lat ishlatiladi?

4. Agar ikkilamchi chulg‘amdagi o‘ramlar soni birlamchidan ko‘p bo‘lsa, transformator qanday bo‘ladi?
5. Transformatorlarda energiya yo‘qotishlarning asosiy sabablari nimalar?
6. Yog‘ bilan sovutiluvchi transformatorlar asosan qayerda qo‘llaniladi?
7. “Aqlli transformatorlar” (smart transformers) qanday xususiyatga ega?
8. Transformatorlarning foydali ish koeffitsienti (FIK) qaysi qiymatlarda bo‘ladi?
9. O‘zbekiston energetika tizimida transformatorlarning o‘rni nimada namoyon bo‘ladi?
10. Qaysi kompaniyalar transformator ishlab chiqarishda jahon yetakchilari hisoblanadi?

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Розенберг Е.А. Электротехнические устройства, Москва: Энергия, 2019.
2. IEC Standard 60076: Power Transformers, International Electrotechnical Commission, 2020.
3. To‘xtasinov T. Transformatorlar nazariyasi va amaliyoti, Toshkent, 2009.
4. Abdug‘aniyev A. Elektr qurilmalarda issiqlik jarayonlari, Toshkent, 2017.
5. Shukurov R. Elektrotexnik tizimlarda energiya samaradorligi, Farg‘ona, 2020.
6. O‘zbekiston Respublikasi Milliy Energiya Strategiyasi – 2030.
7. Siemens, ABB, Schneider Electric texnik kataloglari (2021–2023).

Ushbu mavzu buyicha qo’shimcha ma’lumotlarni ushbu havolalar orqali olishingiz mumkin.

https://youtu.be/U6yvFmnIvLA?si=QQ3Ggq978cnU2Rs6

https://www.youtube.com/@Transformator_yusufjonov

https://youtu.be/RpQApLlt6p8?si=X1yUsg0Oi5dgcVsz

1.3. Bir fazali transformatorning tuzilishi va ishlash prinsipi

Zamonaviy elektr energetika tizimining deyarli har bir bo‘g‘inida transformatorlarning o‘rni beqiyosdir. Ayniqsa, bir fazali transformatorlar — kundalik hayotdan tortib, sanoat, aloqa, transport va avtomatika tizimlarigacha bo‘lgan ko‘plab sohalarda ishlatiladigan eng sodda va keng tarqalgan qurilmalardan biridir. Ular elektr energiyasini bir kuchlanish darajasidan boshqasiga aylantirish orqali tarmoqlar o‘rtasida ishonchli uzatish va taqsimlash imkonini beradi.

Bir fazali transformator — bu o‘zgaruvchan tok kuchlanishini elektromagnit induksiya yo‘li bilan boshqa qiymatga aylantiruvchi stasionar elektrotexnik qurilma bo‘lib, u ikki chulg‘amdan — birlamchi va ikkilamchi o‘ramlardan tashkil topadi. Ushbu chulg‘amlar bir-biriga elektr jihatdan ulanmagan bo‘lsa-da, ular magnit o‘zak (yadro) orqali o‘zaro magnit bog‘lanishda bo‘ladi.

Transformatorning birlamchi chulg‘amiga kuchlanish berilganda, unda o‘zgaruvchan tok oqadi va bu oqim magnit maydon hosil qiladi. Bu magnit maydon o‘zak orqali o‘tib, ikkilamchi chulg‘amni kesib o‘tadi va natijada unda yangi kuchlanish induksiyalanadi. Shu tarzda energiya bir zanjirdan boshqasiga mexanik harakatsiz, faqat magnit maydon yordamida o‘tadi.

Bunday qurilmalarda chastota o‘zgarmaydi, ya’ni 50 Gts chastotadagi tok kirsa, chiqishda ham 50 Gts bo‘ladi. Faqat kuchlanish va tok miqdorlari o‘zgaradi. Bu esa bir fazali transformatorni energiya tejamkor va soddaligi sababli ishonchli qurilmaga aylantiradi.

Bir fazali transformatorlarning qo‘llanish sohasi

Bir fazali transformatorlar elektr tarmog‘ining kichik quvvatli iste’molchilarini ta’minlashda keng qo‘llaniladi. Ular quyidagi yo‘nalishlarda ishlatiladi:

- Maishiy tarmoqlar: 220/12 V yoki 220/24 V kuchlanishni ta’minlaydigan televizorlar, audioapparatlar, zaryadlovchi qurilmalar, LED yoritish tizimlari va maishiy stabilizatorlarda.
- Laboratoriyalar va o‘quv markazlari: tajriba o‘tkazish, o‘quv transformatorlari sifatida.
- Sanoat va avtomatika: signalizatsiya, o‘lchov tizimlari, boshqaruv panellari, rele va kontaktor zanjirlarini oziqlantirish uchun.
- Aloqa va tibbiyot: past kuchlanishli, xavfsiz energiya ta’minoti uchun.

Bu qurilmalar kichik o‘lcham, yengillik, oson ekspluatatsiya va arzon ishlab chiqarish xarajatlari tufayli har bir sohada o‘z o‘rnini topgan.

Tarixiy rivojlanish bosqichlari

Bir fazali transformatorning yaratilish tarixi XIX asrning ikkinchi yarmiga borib taqaladi. 1831-yilda M. Faradey elektromagnit induksiya hodisasini kashf etdi — bu transformator ishlashining ilmiy asosi hisoblanadi.

Keyinchalik 1870–1880-yillar oralig‘ida Jeyms Keyli, Sebastyan Ferranti, Lutsatto va Gaulard singari olimlar kuchlanishni o‘zgartiruvchi qurilmalarni tajribaviy sinovlardan o‘tkazishdi. 1884-yilda G. Gaulard va J. Gibbs Londonda birinchi transformatorli elektr yoritish tizimini ishga tushirdi. 1885-yilda esa Nikola Tesla o‘zgaruvchan tok tizimiga asoslangan yuqori samarali transformator loyihasini yaratdi. U yaratgan kontseptsiya bugungi kunda ham barcha turdagi transformatorlarning ishlash prinsipi sifatida qo‘llaniladi. Shundan so‘ng, 1890–1900-yillarda transformator ishlab chiqarish sanoat miqyosida kengaydi. Westinghouse, Siemens, General Electric kabi kompaniyalar bir fazali va uch fazali transformatorlarni seriyali ishlab chiqarishni yo‘lga qo‘yishdi.

O‘zbekiston hududida transformatorlardan foydalanish elektr energetika tizimining shakllanishi bilan chambarchas bog‘liq. XX asrning o‘rtalarida mamlakatda ko‘plab elektr tarmoqlari barpo etilishi natijasida bir fazali transformatorlar maishiy va ishlab chiqarish sohalarining ajralmas qismi bo‘lib

qoldi. Hozirgi kunda “O‘zbekiston Milliy elektr tarmoqlari” AJ, “Hududiy elektr tarmoqlari” AJ va “Farg‘ona transformator zavodi” kabi korxonalar yuqori sifatli, energiya tejamkor bir fazali transformatorlarni ishlab chiqarmoqda. Ularning ayrim modellari xalqaro IEC 60076 standartlariga moslashtirilgan. Bundan tashqari, O‘zbekiston “Yashil energetika – 2030” strategiyasi doirasida transformatorlarni raqamlashtirish va avtomatlashtirish bo‘yicha chora-tadbirlarni amalga oshirmoqda. Bir fazali transformatorlarning zamonaviy turlari energiya oqimini masofadan kuzatish va boshqarish imkonini beradi.

Bir fazali transformatorlarning afzalliklari

- Tuzilishi sodda, texnik xizmat ko‘rsatish oson.
- Ishonchliligi yuqori, uzoq muddat ishlaydi.
- Narxi arzon, energiya samaradorligi yuqori (≈ 98%).
- Turli kuchlanish diapazonlariga moslashuvchan.
- Xavfsiz ishlash uchun galvanik ajratish imkoniyatiga ega.

Shu jihatlar uni maishiy va o‘quv maqsadlarida eng ko‘p ishlatiladigan qurilmaga aylantirgan.

So‘nggi yillarda transformatorlar konstruksiyasida nanomateriallar asosidagi magnit o‘zaklar, kompozit izolyatsion materiallar va raqamli monitoring tizimlari keng joriy qilinmoqda. Bu esa issiqlik yo‘qotishlarini kamaytiradi, magnit samaradorligini oshiradi va xizmat muddatini uzaytiradi. Masalan, ABB kompaniyasi ishlab chiqqan “Dry-Type Cast Resin” bir fazali transformatorlari yog‘siz, ekologik xavfsiz, portlashdan himoyalangan va past shovqinli bo‘lishi bilan ajralib turadi. O‘zbekistonda ham so‘nggi yillarda intellektual o‘lchov tizimlari va Smart Grid texnologiyalariga mos bir fazali transformatorlar ishlab chiqilmoqda.

Bir fazali transformatorlarning mohiyati — elektr energiyasini samarali, xavfsiz va yo‘qotishsiz uzatish tamoyiliga asoslanadi. Ularning rivojlanish tarixi elektromagnit induksiya g‘oyasidan boshlab, zamonaviy raqamli tarmoqlarga

qadar bo‘lgan uzluksiz evolyutsiyani ifodalaydi. Bugungi kunda bir fazali transformatorlar faqat maishiy qurilmalar bilan cheklanib qolmay, balki “aqlli” energiya tizimlarining muhim bo‘g‘iniga aylangan.

Bir fazali transformatorlar konstruksiyasi jihatdan sodda ko‘rinsa-da, ularning ichki tuzilishi yuqori aniqlik va muvozanatni talab qiladi. Har bir qismi — magnit o‘zak, chulg‘amlar, izolyatsiya tizimi va sovutish qurilmasi — bir-biri bilan uzviy bog‘liq bo‘lib, transformatorning ishonchliligi, samaradorligi hamda xavfsiz ishlashini ta’minlaydi. Quyida ushbu qismlarning har biri alohida ko‘rib chiqiladi.

1. Magnit o‘zak (yadro)

Magnit o‘zak transformatorning yuragi bo‘lib, u magnit oqim uchun yopiq yo‘l hosil qiladi. Bu o‘zak orqali birlamchi chulg‘amda hosil bo‘lgan magnit maydon ikkilamchi chulg‘amga uzatiladi.

Material va shakl: Magnit o‘zak odatda sovuq holda prokatlangan elektroteknik po‘lat plastinkalar (qalinligi 0,35–0,5 mm)dan yig‘iladi. Bu plastinkalar lak bilan izolyatsiyalangan bo‘ladi, bu esa eddy current (girdob tok) yo‘qotishlarini kamaytiradi. O‘zakning shakli odatda “O” yoki “E-I” ko‘rinishida bo‘ladi. “E-I” shaklli o‘zaklar maishiy va kichik quvvatli transformatorlarda qo‘llanadi. “O” shaklli o‘zaklar esa yuqori samaradorlikka ega, lekin ishlab chiqarish qimmatroq.

Funktsiyasi: Magnit o‘zak energiya almashinuvining markaziy yo‘li bo‘lib xizmat qiladi. Birlamchi chulg‘amda hosil bo‘lgan magnit maydon shu o‘zak bo‘ylab aylanadi va ikkilamchi chulg‘amga yetib boradi.

Amaliy tavsiya: Mahalliy ishlab chiqaruvchilarda, xususan **“Farg‘ona transformator zavodi”**da o‘zaklar kam uglerodli po‘latdan tayyorlanib, Epoksidli lak qoplama bilan himoyalanadi. Bu usul o‘zakning ishlash muddatini 20% ga uzaytiradi.

2. Chulg‘amlar (o‘ramlar)

Transformatorning eng muhim qismi — chulg‘am yoki o‘ramdir. Ular magnit maydon bilan elektr energiyani o‘zaro aylantirib turadi.

Tuzilishi: Har bir bir fazali transformator ikki asosiy chulg‘amdan iborat:

- Birlamchi chulg‘am (Primary winding) — tarmoqdan keladigan kuchlanish ulanadigan qism.
- Ikkilamchi chulg‘am (Secondary winding) — iste’molchiga kerakli kuchlanish beradigan qism.

Bu chulg‘amlar o‘zak atrofida izolyatsion qatlamlar yordamida o‘ralgan bo‘ladi. Ularning materiali — elektr texnik mis (Cu) yoki ba’zan alyuminiy (Al) simlardan iborat. Mis yuqori o‘tkazuvchanlikka ega bo‘lgani uchun sanoatda afzal hisoblanadi.

Chulg‘amning joylashuvi: Odatda birlamchi chulg‘am tashqi, ikkilamchi esa ichki joylashtiriladi. Buning sababi — yuqori kuchlanishli o‘ramni tashqi tomonda joylashtirib, issiqlikni samarali chiqarish va elektr xavfsizligini ta’minlashdir.

O‘ram soni va kuchlanish bog‘lanishi: Birlamchi va ikkilamchi kuchlanish o‘rtasidagi bog‘lanish quyidagi formulada ifodalanadi:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Bu yerda:
U_1 — birlamchi kuchlanish (Volt),
U_2 — ikkilamchi kuchlanish (Volt),
N_1 — birlamchi o‘ram soni,
N_2 — ikkilamchi o‘ram soni.

Agar N2>N1N_2 > N_1N2>N1, transformator kuchaytiruvchi; agar N2<N1N_2 < N_1N2<N1, pasaytiruvchi hisoblanadi.

O‘zbekiston tajribasidan misol: Jizzax, Farg‘ona va Toshkentdagi kichik ishlab chiqarish tarmoqlarida 220/36 V yoki 220/24 V bir fazali transformatorlar asosan signal tizimlari, yoritish tarmoqlari va avtomatika bloklarida ishlatiladi.

3. Izolyatsiya tizimi

Transformatorlarda izolyatsiya elektr xavfsizligi va qisqa tutashuvlarning oldini olishda hal qiluvchi ahamiyatga ega. Har bir chulg‘am boshqa chulg‘amdan va o‘zakdan dielektrik materiallar yordamida ajratilgan bo‘ladi.

Izolyatsion materiallar:

- Qog‘oz (cellulose-based paper) — kichik quvvatli transformatorlarda.
- Epoksidli qatron — o‘rta quvvatli transformatorlar uchun.
- Elyaf, mikarta, polimer qoplamalar — yuqori harorat bardoshli variantlar.

Vazifasi:

- Izolyatsiya quyidagilarni ta’minlaydi:
- Elektr zanjirlar orasida xavfsizlik;
- Tok sizib o‘tishini oldini olish;
- Dielektrik mustahkamlikni oshirish;
- Qurilmaning xizmat muddatini uzaytirish.

O‘zbekiston amaliyoti:

2020-yildan boshlab “Hududiy elektr tarmoqlari” AJ ishlab chiqarayotgan kichik transformatorlarda epoksid-kompozit izolyatsiya tizimlari joriy etilgan bo‘lib, ular namlik va harorat o‘zgarishiga nisbatan barqarorroq ishlaydi.

4. Sovutish tizimi

Transformator ishlaganda elektr va magnit yo‘qotishlar natijasida issiqlik hosil bo‘ladi. Bu issiqlik o‘z vaqtida chiqarilmasa, chulg‘am izolyatsiyasi kuyishi

yoki transformatorning FIKi kamayishi mumkin. Shu sababli har bir transformator sovutish tizimi bilan jihozlanadi.

Sovutish turlari:

Tabiiy havo sovutish (AN) — kichik quvvatli transformatorlarda.

Yog‘ bilan sovutish (ONAN, ONAF) — o‘rta va katta quvvatli tarmoqlarda.

Majburiy havo sovutish — ventilyator yordamida sovutish tizimlari.

Sovutish prinsipi:

Yog‘li transformatorlarda issiqlik o‘zakdan yog‘ga o‘tadi, so‘ng yog‘ radiator panjaralari orqali havoga issiqlikni beradi. Havoli (quruq) transformatorlarda esa o‘zak va chulg‘am atrofida tabiiy havo aylanadi.

Energiya tejamkor yondashuv: Hozirda “ABB TXdry” va “Siemens Cast Resin” transformatorlari sovutish uchun yog‘ o‘rniga ekologik xavfsiz qatronlardan foydalanadi. Bu usul portlash xavfini kamaytiradi va xizmat ko‘rsatishni yengillashtiradi.

5. Qo‘shimcha elementlar

Katta quvvatli transformatorlarda quyidagi yordamchi qismlar ham bo‘ladi:

Korpus va idish (tank) – mexanik himoya va yog‘ saqlash uchun.

Harorat datchiklari – chulg‘am va yog‘ haroratini kuzatish uchun.

Bosim klapanlari – ichki bosim oshganda xavfni kamaytiradi.

Quruq transformatorlarda ventilyatorlar – havo aylanishini ta’minlaydi.

Bir fazali transformatorning har bir tarkibiy qismi uning samaradorligiga bevosita ta’sir qiladi.

- O‘zak – magnit oqimning asosiy yo‘li;
- Chulg‘amlar – elektr energiyani magnit maydonga aylantiruvchi va aksincha;

- Izolyatsiya – elektr xavfsizligini ta’minlovchi himoya;
- Sovutish tizimi – issiqlik barqarorligini saqlovchi mexanizm.

Ularning uyg‘un ishlashi tufayli transformator uzoq muddat ishonchli ishlaydi va energiya yo‘qotishlari minimal bo‘ladi.

Bir fazali transformatorning ishlash mohiyatini chuqur tushunish uchun elektromagnit induksiya qonunini bilish zarur. Bu qonun elektr energiyaning magnit maydon orqali o‘tishini tushuntiruvchi eng muhim fizik asoslardan biridir. Faradey tomonidan 1831-yilda kashf etilgan ushbu qonun zamonaviy elektr energetika tizimlarining — generator, dvigatel, transformator, induktor va boshqa ko‘plab qurilmalarning — ishlash tamoyilini tashkil etadi.

Elektromagnit induksiya qonunining fizik mohiyati

Faradey tajribalarida aniqlangan asosiy natija shundan iborat ediki:

“Agar o‘tkazgichni kesib o‘tuvchi magnit oqim vaqt bo‘yicha o‘zgarsa, o‘tkazgichda elektr yurituvchi kuch (EYuK) hosil bo‘ladi.” Bu jarayon elektr va magnit maydonlarning o‘zaro bog‘liqligini ifodalaydi. Faradeyning qonuni matematik shaklda quyidagicha yoziladi:

$$E = -N\frac{d\Phi}{dt}$$

Bu yerda:

E — induksiyalanayotgan EYuK (Volt),

N — o‘ramlar soni,

Φ (phi) — magnit oqim (Veber),

dΦ/dt — magnit oqimning o‘zgarish tezligi.

Formuladagi “–” manfiy ishora Lents qonunini bildiradi: induksiya yo‘nalishi har doim sababchi o‘zgarishga qarshi yo‘nalishda hosil bo‘ladi.

Bir fazali transformatorning ishlash jarayoni

Transformatorning ishlash prinsipi to‘liq elektromagnit induksiya hodisasiga asoslanadi.

1. Birlamchi chulg‘amdagi jarayon:

Birlamchi chulg‘amga 220 V o‘zgaruvchan kuchlanish beriladi. Natijada unda o‘zgaruvchan tok oqadi, bu tok o‘zakda o‘zgaruvchan magnit oqim (Φ) hosil qiladi. Bu oqim sinusoidal shaklda o‘zgarib turadi:

$$\Phi = \Phi_{max} \sin(\omega t)$$

2. Magnit oqimning o‘zak bo‘ylab tarqalishi:

Hosil bo‘lgan magnit oqim ferromagnit o‘zak bo‘ylab harakatlanadi. O‘zak magnit maydonni jamlaydi va uni ikkilamchi chulg‘amga yo‘naltiradi. Shu tariqa energiya elektr maydondan magnit maydonga o‘tadi.

3. Ikkilamchi chulg‘amda EYuK hosil bo‘lishi:

Magnit oqim ikkilamchi chulg‘amni kesib o‘tganida, u yerda ham EYuK induksiyalanadi. Bu kuchlanishning qiymati o‘ramlar soniga proporsional bo‘ladi:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Agar N2>N1N_2 > N_1N2>N1 bo‘lsa, chiqish kuchlanish E2>E1E_2 > E_1E2 >E1 (kuchaytiruvchi transformator), aksincha, N2<N1N_2 < N_1N2<N1 bo‘lsa, E2<E1E_2 < E_1E2<E1 (pasaytiruvchi transformator).

4. Energiya almashinuvi:

Birlamchi o‘ramdagi elektr energiya magnit maydonga aylanadi, so‘ngra ikkilamchi o‘ramda qaytadan elektr energiya sifatida paydo bo‘ladi. Bu jarayon mexanik harakatsiz, faqat magnit o‘zgarish orqali kechadi — bu transformatorning asosiy ustunligi hisoblanadi.

Magnit oqim yo‘nalishi va fazaviy bog‘lanish

Magnit oqimning yo‘nalishi va EYuKning fazasi o‘zaro bog‘liq. Lents qonuniga ko‘ra, hosil bo‘layotgan EYuK magnit oqimning o‘zgarishiga qarshi yo‘nalgan bo‘ladi. Shu sababli, birlamchi va ikkilamchi kuchlanishlar o‘rtasida 180° fazaviy siljish kuzatiladi. Bu holat, ayniqsa, parallel ishlaydigan transformatorlarda muhim — faza muvofiqligi ta’minlanmasa, zanjirda teskari toklar hosil bo‘lishi mumkin. Shu bois O‘zbekistonning elektr tarmoqlarida transformatorlarni ulashda “U1 – V1” faza belgilarini aniq saqlash talab etiladi.

Magnit yo‘qotishlar va samaradorlik

Amalda transformator ideal emas. Unda magnit va elektr yo‘qotishlar mavjud.

1. Magnit yo‘qotishlar:

- Girdob toklar (eddy current losses) — o‘zakda hosil bo‘ladigan ichki toklar.
- Gisterezis yo‘qotishlari — magnit yo‘nalishning doimiy o‘zgarishidan hosil bo‘ladigan issiqlik yo‘qotishlari.

Bu yo‘qotishlarni kamaytirish uchun o‘zak yupqa po‘lat plastinkalardan yig‘iladi va lak bilan izolyatsiyalanadi.

2. Elektr yo‘qotishlar:

- Mis chulg‘amlarning qarshiligi natijasida I^2R shaklida issiqlik hosil bo‘ladi.
- Tok kuchaygan sayin yo‘qotish kvadrat tarzda ortadi.

3. Samaradorlik formulasi:

$$\eta = \frac{P_{chiqish}}{P_{kirish}} \times 100\%$$

Bir fazali transformatorlarda samaradorlik odatda 97–99% ni tashkil etadi.

O‘zbekiston energetika tizimidagi amaliy qo‘llanilishi

Bir fazali transformatorlar respublikamizda taqsimot tarmoqlari, qishloq elektr punktlari, maishiy iste’molchilar va avtomatik boshqaruv tizimlarida keng qo‘llanadi.

Masalan:

- 220/36 V yoki 220/24 V transformatorlar ishlab chiqarish sexlarida xavfsiz yoritish tizimlarini ta’minlaydi;
- 10/0.4 kV transformatorlar esa kichik elektr podstansiyalarda kuchlanishni pasaytiradi;
- Energiya nazorati tizimlarida — signalizatsiya, rele va himoya qurilmalarini oziqlantiradi.

Yangi transformator modellarida raqamli monitoring sensorlari o‘rnatilgan bo‘lib, ular harorat, yuklama, tebranish va yog‘ bosimini onlayn kuzatadi. Bunday texnologiyalar O‘zbekistonning “Smart Grid” dasturi doirasida bosqichma-bosqich joriy etilmoqda.

Elektromagnit induksiya jarayonining bosqichlari (soddalashtirilgan sxema bilan)

1. Birlamchi chulg‘amga o‘zgaruvchan kuchlanish beriladi.
2. O‘zakda o‘zgaruvchan magnit oqim hosil bo‘ladi.
3. Bu magnit oqim ikkilamchi chulg‘amni kesib o‘tadi.
4. Ikkilamchi chulg‘amda elektromagnit induksiya natijasida EYuK hosil bo‘ladi.
5. Energiyaning o‘tishi — elektr → magnit → elektr shaklida amalga oshadi.

Bir fazali transformatorning ishlash prinsipi — elektromagnit induksiya qonunining to‘liq amaliy ifodasidir. Ushbu jarayon tufayli energiya hech qanday mexanik yo‘qotishsiz, yuqori samaradorlik bilan uzatiladi. Transformatorlar faqat fizik hodisani emas, balki energiya uzatishning eng samarali tizim modelini ham ifodalaydi.Bugungi kunda O‘zbekiston energetikasida ham bu prinsip asosida ishlab chiqilgan raqamli, izolyatsiyasi kuchaytirilgan, o‘z-o‘zini boshqaruvchi transformatorlar qo‘llanmoqda.

O‘zbekiston elektr energetika tizimi so‘nggi yillarda jadal modernizatsiya jarayonini boshdan kechirmoqda. Bu jarayonning markazida — transformator texnologiyalarini yangilash, raqamlashtirish va energiya tejamkorligini oshirish masalalari turibdi. Bir fazali transformatorlar bu tizimning eng muhim bo‘g‘inlaridan biri hisoblanadi. Ular asosan past kuchlanishli tarmoqlar, maishiy iste’molchilar, taqsimlovchi podstansiyalar va sanoat avtomatikasida qo‘llaniladi. Transformatorlar bo‘lmasa, elektr energiyani uzoq masofalarga uzatish, kuchlanishni moslashtirish va iste’molchi darajasida xavfsiz foydalanish imkonsiz bo‘lardi.

1. O‘zbekiston energetika tizimining umumiy holati

O‘zbekiston Respublikasi Energetika vazirligi ma’lumotlariga ko‘ra, 2025-yil holatiga elektr energiya ishlab chiqarish hajmi 77 mlrd kVt·soatdan oshgan. Bu energiya 20 mingdan ortiq transformator punkti orqali iste’molchilarga uzatiladi.

- Yuqori kuchlanishli tarmoqlar: 220–500 kV (asosiy magistral).
- O‘rta kuchlanish tarmoqlari: 35–110 kV.
- Past kuchlanishli tarmoqlar: 0,4–10 kV (uy va kichik korxonalar uchun).

Aynan shu past kuchlanish bosqichida bir fazali transformatorlarning o‘rni beqiyosdir — ular uy xo‘jaliklari, qishloq elektr tarmoqlari, maishiy texnika, yoritish tizimlari, va telekommunikatsiya tarmoqlarida xizmat qiladi.

2. Bir fazali transformatorlarning tizimdagi funksional o‘rni

O‘zbekiston elektr tarmoqlarida bir fazali transformatorlar quyidagi asosiy vazifalarni bajaradi:

a) Kuchlanishni pasaytirish (taqsimot bosqichida)- Elektr stansiyalardan kelgan 6–10 kV kuchlanish transformator podstansiyalarida 0,4 kV gacha pasaytiriladi. Bu kuchlanish maishiy iste’molchilarga (220 V) mosdir. Masalan, 10/0.4 kV tarmoqlarda bir fazali transformatorlar 220/24 V yoki 220/12 V chiqish beradi — bu yoritish tizimlari, himoya relelari va signal zanjirlarini oziqlantiradi.

b) Elektr xavfsizligini ta’minlash- Ko‘plab ishlab chiqarish sexlarida va tibbiyot uskunalarida past kuchlanishli transformatorlar qo‘llanadi. Ular inson tanasi uchun xavfsiz bo‘lgan 12–36 V diapazonda kuchlanish beradi.

c) Mahalliy energiya uzatish va avtonom tizimlar-Qishloq hududlaridagi avtonom quyosh yoki shamol stansiyalarida ham bir fazali transformatorlar ishlatiladi. Ular quyosh paneli tomonidan ishlab chiqarilgan 12 yoki 24 V kuchlanishni 220 V ga aylantirib, maishiy tarmoqqa beradi.

d) Avtomatika va boshqaruv tizimlari-Sanoat korxonalari, masalan, “Farg‘onaazot” AJ yoki “Navoiy KMK” AJda asbob-uskunalarning boshqaruv bloklari past kuchlanishli (24 V, 36 V) transformatorlar orqali oziqlanadi. Bu tizimlar elektr xavfsizligini ta’minlaydi va uzluksiz ishni kafolatlaydi.

3. Amaliy qo‘llanilish sohalari

Bir fazali transformatorlarning O‘zbekistonda qo‘llaniladigan asosiy turlari va ularning ishlash joylari quyidagi jadvalda keltirilgan:

1-jadval. Bir fazali transformatorlarning O‘zbekistondagi asosiy qo‘llanilish turlari.

№	Qo‘llanish sohasi	Kuchlanish (V)	Transformator turi	Misol
1	Maishiy yoritish	220/12 yoki 220/24	Quruq turdagi	LED yoritish tizimlari

№	Qo‘llanish sohasi	Kuchlanish (V)	Transformator turi	Misol
2	Elektr jihozlari	220/36	Pasaytiruvchi	Payvandlash va signal tizimlari
3	Sanoat avtomatikasi	220/24	Quruq turdagi	PLC boshqaruv bloklari
4	Tibbiyot asboblari	220/12	Izolyatsiyalangan	EKG, laboratoriya uskunalari
5	Quyosh tizimlari	24/220	Kuchaytiruvchi (invertorli)	Quyosh panellari tarmoqlari

3. Mahalliy ishlab chiqaruvchilar va ishlab chiqarish quvvati

Bugungi kunda O‘zbekiston bir fazali transformatorlarni importga qaramlikni kamaytirish maqsadida mahalliy ishlab chiqarishni kengaytirmoqda. Quyidagi korxonalar bu yo‘nalishda yetakchi hisoblanadi:

- “Farg‘ona transformator zavodi” AJ – 0,25 kV dan 630 kVAgacha bo‘lgan yog‘li va quruq transformatorlar ishlab chiqaradi.
- “Toshkent Elektroapparat Zavodi” – kichik o‘lchamli maishiy va laboratoriya transformatorlari.
- “Navoiy KMK texnik xizmat” – sanoat transformatorlarini ta’mirlash va qayta sarg‘ish.
- “Hududiy elektr tarmoqlari” AJ – taqsimlovchi punktlar uchun 10/0,4 kV blok-transformatorlar ishlab chiqmoqda.

2024-yilda bu korxonalar umumiy hisobda 42 mingdan ortiq bir fazali transformator ishlab chiqargan, shundan 70% mahalliy ehtiyojni qoplagan.

4. Zamonaviy tendensiyalar va modernizatsiya yo‘nalishlari

O‘zbekiston “Yashil energetika – 2030” strategiyasi doirasida transformatorlarni energiya tejovchi texnologiyalarga almashtirish jarayonini

boshlab yuborgan.

Unga ko‘ra, quyidagi yo‘nalishlar rivojlanmoqda:

a) Smart transformatorlar (raqamli boshqaruvli)

Harorat, yuklama va kuchlanishni onlayn nazorat qiladi.

Internet orqali markaziy SCADA tizimiga ma’lumot uzatadi.

Masalan, “Sensformer Siemens” modellarining ilk nusxalari 2023-yilda Toshkent viloyatida sinovdan o‘tkazilgan.

b) Ekologik xavfsiz sovutish tizimlari

Yog‘ o‘rniga biologik asosli ester suyuqliklar qo‘llanmoqda.

Bu ekologik xavf-xatarsiz va portlash ehtimoli past.

c) Nanomaterialli izolyatsiya

Epoksid qatron asosidagi nanokompozit materiallar chulg‘amlararo issiqlikka chidamlilikni oshirmoqda.

Bu tizim xizmat muddatini 30 yildan 40 yilgacha uzaytiradi.

6 . Energiya yo‘qotishlarini kamaytirishdagi ahamiyati

O‘zbekiston elektr tarmoqlarida transformatorlar orqali o‘tayotgan energiya miqdori yiliga 60 mlrd kVt·soatni tashkil etadi. Shu jarayonda yo‘qotishlarning 10–12% qismi aynan transformatorlardagi samaradorlik yetishmasligi bilan bog‘liq.

Yangi avlod bir fazali transformatorlar:

Mis o‘rniga alyuminiy o‘ramli, ammo past qarshilikli materiallar bilan;

Magnit yo‘qotishlarni kamaytiruvchi po‘lat yadro bilan ishlab chiqilmoqda.

Bu yangiliklar natijasida 2025–2030-yillar oralig‘ida O‘zbekistonda elektr energiya yo‘qotishlari 8% gacha kamaytirilishi rejalashtirilgan.

7. Maishiy sohada qo‘llanish namunasi

Toshkent shahridagi “Yangi hayot” turar-joy massivida har bir bino uchun 220/12 V xavfsiz yoritish tizimi o‘rnatilgan. Bu tizim har bir kvartirada joylashgan bir fazali quruq transformator orqali ishlaydi. Buning natijasida:

- Yoritish tizimlarining energiya sarfi 25% ga kamaygan;
- Elektr xavfsizligi oshgan;
- Xizmat muddati 2 barobar ko‘paygan.

8. Xalqaro tajriba bilan integratsiya

O‘zbekiston 2022-yildan buyon Yevropa Ittifoqining “Erasmus+ Green Energy Education” dasturi doirasida transformator texnologiyalari bo‘yicha Politecnico di Torino (Italiya), Universidade de Évora (Portugaliya) va Universidad Politécnica de Madrid (Ispaniya) universitetlari bilan hamkorlik qiladi.
Bu hamkorlik natijasida mahalliy muhandislar zamonaviy energiya ta’minoti tizimlarini o‘rganib, yangi energiyani boshqarish laboratoriyalarini tashkil etmoqda. Bir fazali transformatorlar O‘zbekiston elektr energetika tizimining eng barqaror va keng qo‘llaniladigan elementlaridan biridir. Ularning o‘rni nafaqat maishiy energiya ta’minotida, balki avtomatika, ishlab chiqarish, aloqa va “yashil energetika” loyihalarida ham hal qiluvchi ahamiyatga ega. Bugungi modernizatsiya jarayonlari, mahalliy ishlab chiqarishning kengayishi va raqamli texnologiyalar joriy etilishi natijasida, O‘zbekiston transformator sohasida to‘liq milliy o‘zini ta’minlash bosqichiga yaqinlashmoqda.

Bir fazali transformatorlarning ishlashini to‘liq anglash uchun ularning hisoblash tamoyillari, energiya samaradorligini tahlil qilish va xatolik manbalarini aniqlash juda muhimdir. Transformatorlarning nazariy modellari bilan amaliy natijalari o‘rtasidagi farq odatda kichik bo‘ladi, ammo ularning tahlili qurilma sifatini oshirishda asosiy yo‘nalish hisoblanadi. Shu bois bu bobda transformatorning asosiy hisoblash formulalari, samaradorlik ko‘rsatkichlari va zamonaviy modernizatsiya yo‘nalishlari keng yoritiladi.

1. Asosiy elektr kattaliklar va ularning o‘zaro bog‘lanishi

Bir fazali transformatorlarda asosiy hisoblashlar quyidagi fizik kattaliklar asosida olib boriladi:

U_1 – birlamchi kuchlanish (V)

U_2 – ikkilamchi kuchlanish (V)

I_1 – birlamchi tok (A)

I_2 – ikkilamchi tok (A)

N_1, N_2 – o‘ramlar soni

P_1, P_2 – kirish va chiqish quvvatlari (Vt)

η – foydali ish koeffitsienti (FIK)

Bu kattaliklar orasidagi asosiy bog‘lanish quyidagicha ifodalanadi:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$U_1 I_1 = U_2 I_2$$

Agar energiya yo‘qotishlar hisobga olinmasa, transformator ideal deb qabul qilinadi. Bunda kirish quvvati chiqish quvvatiga teng:

$$P_{kirish} = P_{chiqish}$$

Ammo amalda har doim issiqlik, magnit va mexanik yo‘qotishlar mavjud bo‘lib, ular samaradorlikni biroz kamaytiradi.

2. Transformatorning samaradorligi (η) ni aniqlash

Transformatorning foydali ish koeffitsienti (FIK) yoki samaradorligi uning kirish va chiqish quvvatlari nisbatiga teng:

$$\eta = \frac{P_{chiqish}}{P_{kirish}} \times 100\%$$

yoki

$$\eta = \frac{U_2 I_2 \cos\varphi_2}{U_1 I_1 \cos\varphi_1} \times 100\%$$

Bu yerda:

$\cos\varphi_1$, $\cos\varphi_2$ — quvvat koeffitsientlari (odatda 0,8–0,95 oralig‘ida).

Zamonaviy transformatorlarda η ≈ 98–99% ni tashkil etadi. Bu degani, 1000 Vt energiya kiritilganda, 980–990 Vt foydali quvvat iste’molchiga yetib boradi.

2.1. Samaradorlikni aniqlashning amaliy misoli

Masalan, quyidagi parametrli transformator berilgan:

U1=220 VU_1 = 220 \, VU1=220V

U2=36 VU_2 = 36 \, VU2=36V

I2=5 AI_2 = 5 \, AI2=5A

Quvvat koeffitsienti

$$\cos\varphi = 0.9$$

Kirish quvvat:

$$P_1 = 220 \times 0.85 \times 2.0 = 374\,Vt$$

Chiqish quvvat:

$$P_2 = 36 \times 5 \times 0.9 = 162\,Vt$$

Samaradorlik:

$$\eta = \frac{162}{374} \times 100 = 97.1\%$$

✓ Natija: Transformator samaradorligi 97% bo‘lib, bu kichik quvvatli bir fazali transformatorlar uchun juda yaxshi ko‘rsatkich hisoblanadi.

2. Energiya yo‘qotish turlari va ularni kamaytirish usullari

Transformatorlarda energiya yo‘qotishlar ikki asosiy turga bo‘linadi:

a) Magnit yo‘qotishlar (o‘zakda) Girdob tok (Eddy current losses) – Magnit maydon o‘zgarishidan o‘zakda hosil bo‘ladigan aylanuvchi toklar sababli issiqlik yo‘qotishlari. Kamaytirish usuli: o‘zakni yupqa po‘lat plastinkalardan yig‘ish va ularni lak bilan izolyatsiyalash. Gisterezis yo‘qotishlari (Hysteresis losses)– Magnitlanish yo‘nalishi o‘zgarishidan o‘zakda issiqlik hosil bo‘lishi. Kamaytirish usuli: past gisterezisli po‘lat (masalan, Fe–Si qotishmasi) ishlatish.

b) Elektr yo‘qotishlar (chulg‘amlarda) I^2R yo‘qotishlar: Mis o‘tkazgich qarshiligi tufayli hosil bo‘ladigan issiqlik. Kamaytirish usuli: Mis sim diametrini oshirish, alyuminiy o‘ramlarda qo‘shimcha sovutish qo‘llash. Dielektrik yo‘qotishlar: Izolyatsiya eskirishi yoki namlanishdan kelib chiqadigan energiya sizishi.

Kamaytirish usuli: Epoksidli izolyatsiya, ventilyatsiya va yog‘ning sifat nazorati.

Yo‘qotishlar uchun umumiy ifoda:

$$P_{yo'qotish} = P_{o'zak} + P_{chulg'am} = (P_h + P_e) + (I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2)$$

Bu ifoda asosida issiqlik chiqishi hisoblanadi va transformatorning sovutish tizimi loyihalanadi.

3. Xatoliklar manbalari va ularni bartaraf etish

Transformator ishlashida quyidagi xatoliklar kuzatiladi:

2-jadval. Bir fazali transformatorlarda uchraydigan xatoliklar va ularni kamaytirish yo‘llari.

№	Xatolik manbasi	Sababi	Bartaraf etish choralari
1	Kuchlanish pasayishi	Yuklama ortishi	Qo‘shimcha transformator qo‘llash
2	Isish (qizish)	Yog‘ sirkulyatsiyasi sust	Radiatorlar tozaligini tekshirish
3	Izolyatsiya shikastlanishi	Namlik, qarish	Epoksidli izolyatsiya, quritish
4	Girdob toklar	O‘zak plastinkalari yopiqligi	Lak izolyatsiya va yupqa plastinka
5	Tez eskirish	Doimiy yuklama o‘zgarishi	Avtomatik yuklama nazorati tizimi

Hisoblash va nazorat usullari: O‘zbekiston texnik reglamentlariga ko‘ra (O‘zDSt 3055:2021), transformatorlar har yili quyidagi sinovlardan o‘tkaziladi:

1.Bo‘sh yurish sinovi (no-load test)

- Magnit yo‘qotish va gisterezis aniqlanadi.
- Birlamchi kuchlanish beriladi, ikkilamchi ochiq zanjirda.

2. Qisqa tutashuv sinovi (short-circuit test)

- Elektr yo‘qotishlar (I^2R) aniqlanadi.
- Ikkilamchi qisqa tutashtiriladi, kirish kuchlanish pasaytiriladi.

3.Yuklama sinovi

- Chiqish quvvat va harorat barqarorligi o‘lchanadi.
- FIK va yuklama qobiliyati aniqlanadi.
- Natijalar asosida har yili texnik xizmat rejasiga o‘zgartirish kiritiladi.

6.Modernizatsiya va innovatsion yo‘nalishlar

a) Raqamli nazorat tizimlari

- Transformatorlarga harorat sensori, yuklama datchigi, IoT moduli o‘rnatiladi.
- Ma’lumotlar real vaqt rejimida SCADA tizimiga uzatiladi.
- Bu tizim O‘zbekistonning “Smart Grid 2030” dasturida muhim o‘rin tutadi.

b) Nanomateriallar va kompozit o‘zaklar

- Yangi avlod o‘zak materiallari: amorf po‘lat, nanokristallik qotishmalar.
- Bu materiallar magnit yo‘qotishlarni 30–40% kamaytiradi.
- Farg‘ona transformator zavodi 2024-yilda nanokristall o‘zakli birinchi modelni sinovdan o‘tkazgan.

c) Ekologik xavfsizlik

- Yog‘ o‘rniga ester asosli sovutuvchi suyuqliklar joriy etilmoqda (biologik parchalanadigan).
- Bu yondashuv portlash va yong‘in xavfini kamaytiradi.

7.Samaradorlikni oshirishda O‘zbekiston amaliyoti

- Toshkent shahridagi “Yangi Energiya” loyihasi (2023) doirasida 2000 dan ortiq bir fazali transformatorlar raqamli datchiklar bilan almashtirildi.
- Natijada har bir transformatorning o‘rtacha energiya tejalishi 4–5% ni tashkil etdi.
- Shu bilan birga, texnik xizmat oralig‘i 3 yildan 5 yilgacha uzaytirildi.

Bir fazali transformatorlarning hisoblash, tahlil va modernizatsiya jarayonlari O‘zbekiston energetika tizimining raqamli kelajagiga zamin yaratmoqda. Samaradorlikni oshirish, yo‘qotishlarni kamaytirish va ekologik xavfsizlikni ta’minlash bugungi kun talabidir. Yangi texnologiyalar — nanomateriallar, aqlli sensor tizimlari, raqamli nazorat va ekologik sovutish yechimlari — transformator sohasini butunlay yangi bosqichga olib chiqmoqda. Natijada, O‘zbekiston o‘zining elektr energetika tizimida barqaror, xavfsiz va energiya tejovchi transformator infratuzilmasini shakllantirish yo‘lida izchil qadam tashlamoqda.

Test savollar

1. Bir fazali transformatorning asosiy vazifasi nima?

A) Elektr energiyani magnit energiyaga aylantirish

B) Elektr kuchlanishini o‘zgartirish

C) Tok chastotasini oshirish

D) Issiqlik energiyasini kamaytirish

2.Transformatorlarning ishlash prinsipi qaysi fizik qonunga asoslanadi?

A) Om qonuni

B) Faradey qonuni

C) Kulon qonuni

D) Nyuton qonuni

3.Transformator o‘zak materiali sifatida nimalar ishlatiladi?

A) Mis va alyuminiy

B) Temir va po‘lat qotishmalari

C) Keramika

D) Plastmassa

4. Agar ikkilamchi chulg‘am o‘ramlari birlamchidan ko‘p bo‘lsa, transformator qanday bo‘ladi?

A) Pasaytiruvchi

B) Kuchaytiruvchi

C) Teskari bog‘lanishli

D) Avtotransformator

5. Quyidagi formulalardan qaysi biri transformatorning kuchlanish nisbati uchun to‘g‘ri?

A) $U_1/U_2 = I_2/I_1$

B) $U_1/U_2 = N_1/N_2$

C) $U_1/U_2 = P_2/P_1$

D) $U_1/U_2 = R_1/R_2$

6. Transformatorlarning samaradorligi odatda necha foiz atrofida bo‘ladi?

A) 50–60%

B) 70–80%

C) 90–95%

D) 97–99%

7. Transformatorlarda energiya qanday yo‘qotishlar mavjud?

A) Issiqlik va magnit yo‘qotishlar

B) Nur tarqalishi

C) Mexanik yo‘qotishlar

D) Potensial energiya yo‘qotishlar

8. Girdob toklarini kamaytirish uchun qanday usul qo‘llaniladi?

A) Mis simlarni qalinlashtirish

B) O‘zakni yupqa plastinkalardan yig‘ish

C) Yog‘ sovutishni to‘xtatish

D) Magnit maydonni kuchaytirish

9. Transformatorlarda gisterezis yo‘qotishlarini kamaytirish uchun nima ishlatiladi?

A) Sof mis

B) Epoksid qatron

C) Past gisterezisli po‘lat

D) Alyuminiy plastinka

10. O‘zbekiston energetika tizimida bir fazali transformatorlar asosan qayerda ishlatiladi?

A) Yuqori kuchlanish tarmoqlari

B) Maishiy va taqsimlovchi tizimlarda

C) Elektr stansiyalarda

D) Atom reaktorlarida

11. Foydali ish koeffitsienti qanday formula bilan aniqlanadi?

A) $\eta = Pchiqish / Pkirish \times 100\%$

B) $\eta = U_1 / U_2 \times 100\%$

C) $\eta = N_1 / N_2 \times 100\%$

D) $\eta = I_1 / I_2 \times 100\%$

12. Qisqa tutashuv sinovi nima uchun o‘tkaziladi?

A) Magnit yo‘qotishni aniqlash uchun

B) Elektr yo‘qotishlarni aniqlash uchun

C) Kuchlanishni o‘lchash uchun

D) Izolyatsiyani tekshirish uchun

13. Smart transformatorlarning afzalligi nimada?

A) Raqamli nazorat va sensor tizimga ega

B) Faqat sovuqda ishlaydi

C) Kichik o‘lchamli

D) Oddiy mexanik boshqaruv

14. O‘zbekiston “Smart Grid 2030” dasturida transformatorlar qanday modernizatsiya qilinmoqda?

A) Gaz bilan sovutish orqali

B) Raqamli datchiklar va IoT tizimlari orqali

C) Qattiq sovutish tizimi orqali

D) Yog‘ hajmini oshirish orqali

15. Transformatorlarning energiya tejashdagi o‘rni qanday izohlanadi?

A) Tokni kamaytirish orqali

B) Kuchlanishni moslashtirib energiya isrofini kamaytiradi

C) Energiya yo‘qotishlarni oshiradi

D) Tarmoqqa yuklamani ko‘paytiradi

Savollar

4. Transformatorning asosiy qismlarini sanab bering.

5. Elektromagnit induksiya jarayoni qanday bosqichlarda sodir bo‘ladi?
6. Birlamchi va ikkilamchi chulg‘amlar o‘rtasidagi bog‘lanish qanday?
7. Foydali ish koeffitsientining fizik ma’nosini tushuntiring.
8. O‘zbekiston energetika tizimida bir fazali transformatorlar qayerlarda ishlatiladi?
9. Magnit yo‘qotishlarning ikki asosiy turi qanday?
10. Girdob toklarining kelib chiqish sababi nimada?
11. Transformatorlarda issiqlik yo‘qotishlarini kamaytirish uchun qanday texnologiyalar qo‘llaniladi?
12. Smart transformator deganda nimani tushunasiz?
13. Qisqa tutashuv sinovi qanday maqsadda o‘tkaziladi?
14. Transformatorning samaradorligi yuqori bo‘lishi uchun qanday shartlar zarur?
15. Faradey qonuni transformatorlarda qanday ishlaydi?
16. O‘zak materiali sifatida po‘latdan foydalanishning afzalligi nimada?
17. Nanomaterial asosidagi transformatorlarning ustunligi nimada?
18. O‘zbekiston transformator sanoatida mahalliy ishlab chiqaruvchilarning roli qanday?

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Farg‘ona Transformator Zavodi. Ishlab chiqarish katalogi va texnik pasportlar. Farg‘ona, 2023–2024.
2. IEC 60076. Power Transformers – International Standard. Geneva: IEC Publications, 2020.
3. O‘zbekiston Energetika vazirligi. “Smart Grid 2030” dasturi. Toshkent, 2023.
4. O‘zbekiston Energetika vazirligi. Yillik texnik reglamentlar va hisobotlar to‘plami. Toshkent, 2023.
5. O‘zbekiston Milliy elektr tarmoqlari AJ. Statistik byulleten. Toshkent, 2024.

6. O‘zbekiston Milliy Energiya Strategiyasi – 2030. Normativ dasturiy hujjat. Toshkent, 2023.
7. O‘zDSt 3055:2021. Transformatorlarni sinovdan o‘tkazish talablari. Toshkent: O‘zstandart agentligi, 2021.
8. Sayfullayev A. Elektr mashinalari. Toshkent axborot texnologiyalari universiteti nashriyoti, 2022.

1.4. Transformatorning elektr yuklama holati va energiya yo‘qotishlari

Transformatorning elektr yuklama holati (yoki yuklanish darajasi) — bu qurilmaning ikkilamchi zanjiridan o‘tayotgan elektr tokning miqdori va u bilan bog‘liq energiya oqimini ifodalovchi muhim parametrdir. Yuklama holati transformatorning samaradorligi, issiqlik rejimi, kuchlanish pasayishi va xizmat muddatini belgilovchi asosiy omillardan biridir.

Elektr tarmoqlarining ishonchliligi ko‘p jihatdan transformator yuklamasining optimal boshqaruviga bog‘liq. Haddan tashqari yuklama o‘tkazgichlarda ortiqcha issiqlik, izolyatsiya shikastlanishi va energiya yo‘qotishlariga olib keladi; past yuklama esa quvvat resurslarining samarasiz ishlatilishini bildiradi.

1. Yuklama holatining fizik mohiyati

Transformator yuklama holati deganda, qurilmaning ikkilamchi chulg‘amidan o‘tayotgan tokning nominal tokka nisbati tushuniladi. **Matematik ifoda bilan:**

$$\beta = \frac{I_{haqiqiy}}{I_{nominal}} \times 100\%$$

Bu yerda:

IhaqiqiyI_{haqiqiy}Ihaqiqiy — amalda o‘lchangan tok (A),

InominalI_{nominal}Inominal — zavod tomonidan ko‘rsatilgan nominal tok (A).

Agar β = 100% bo‘lsa — transformator nominal yuklamada ishlayapti;
β > 100% — ortiqcha yuklama (qizish xavfi mavjud);
β < 100% — kam yuklama (energiya isrofi yuqori, samaradorlik past).

2. Yuklama turlari

Yuklama xususiyatiga ko‘ra transformatorlar aktiv, reaktiv va aralash (kompleks) yuklama bilan ishlaydi.

a) Aktiv yuklama (R yuklama)

Tok va kuchlanish orasidagi faza burchagi 0° ga yaqin bo‘ladi. Bunday yuklama issiqlik yoki mexanik ish bajaruvchi qurilmalarda — masalan, elektr pechlar, isitkichlar, chiroqlar, issiqlik nasoslarida uchraydi.

b) Reaktiv yuklama (L yoki C yuklama)

Tok va kuchlanish orasida fazaviy siljish mavjud. Bu holat elektr dvigatellar, transformatorlar va induktiv moslamalarda kuzatiladi. Reaktiv yuklama transformator samaradorligiga salbiy ta’sir qiladi, chunki u quvvat koeffitsientini kamaytiradi.

c) Kompleks (aralash) yuklama

Amaliy hayotda transformatorlar ko‘pincha aralash yuklama bilan ishlaydi, ya’ni yuklamaning bir qismi aktiv, bir qismi reaktiv. Umumiy quvvat quyidagi formula bilan aniqlanadi:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Bu yerda:

S — to‘liq quvvat (VA),

P — aktiv quvvat (Vt),

Q — reaktiv quvvat (VAr).

3. Yuklama va quvvat koeffitsienti o‘rtasidagi bog‘lanish

Transformatorning quvvat koeffitsienti (cosφ) yuklama turiga bog‘liq. U quyidagi nisbat bilan ifodalanadi:

$$\cos\varphi = \frac{P}{S}$$

Agar cosφ=1 bo‘lsa, yuklama to‘liq aktivdir; cosφ<1 bo‘lsa, reaktiv komponent mavjud.

O‘zbekiston elektr tarmoqlarida sanoat korxonalari uchun ruxsat etilgan minimal quvvat koeffitsienti 0,85 deb belgilangan. Shu qiymatdan past bo‘lsa, transformatorlarda reaktiv yo‘qotishlar ortadi va energiya tizimida qo‘shimcha yuk paydo bo‘ladi.

4. Yuklama holatining issiqlikka ta’siri

Transformator o‘zak va chulg‘amlaridagi harorat yuklamaga to‘g‘ridan-to‘g‘ri proporsional. Yuklama oshgan sari issiqlik chiqishi ortadi:

$$\Delta T \propto I^2 R$$

Bu jarayonda:

mis chulg‘am — o‘zining elektr qarshiligi sababli qiziydi;

o‘zak — girdob toklar va gisterezis yo‘qotishlari natijasida qiziydi.

Agar harorat 100–110°C dan oshsa, izolyatsiya materiali eskiradi va qisqa tutashuv xavfi ortadi. Shu sababli transformatorlar yog‘li sovutish, ventilyatsiya, yoki havo sirkulyatsiyasi tizimlari bilan jihozlanadi.

5. Yuklama rejimlarini tasniflash

Amaliyotda quyidagi yuklama rejimlari farqlanadi:

1-jadval. Transformatorning yuklama rejimlari va ularning ta’siri.

№	Rejim turi	Tavsif	Ta’siri
1	Nominal yuklama	100% tok o‘tadi	Normal ish holati
2	Ortiqcha yuklama	100–130% tok	Isish, FIK pasayadi
3	Kam yuklama	40–60% tok	Magnit yo‘qotish ortadi
4	Qisqa muddatli ortiqcha yuklama	150–200% tok	Faqat qisqa vaqt ruxsat etiladi

6. Yuklama rejimini boshqarish amaliyoti (O‘zbekiston misolida)

O‘zbekiston elektr tarmoqlarida “Hududiy elektr tarmoqlari” AJ tomonidan har bir transformator punktida yuklama onlayn kuzatib boriladi.

- “Smart meter” tizimlari yordamida real vaqt rejimida yuklama va kuchlanish ma’lumotlari SCADA markaziga uzatiladi.
- 2024-yilda “Farg‘ona elektr tarmoqlari” filialida 800 dan ortiq aqlli datchikli transformatorlar o‘rnatildi.
- Bu tizim ortiqcha yuklama vaqtida avtomatik signal yuboradi va tarmoq operatoriga xavfni oldindan bildiradi.

Bu raqamli boshqaruv tizimi natijasida:

- issiqlik yo‘qotishlar 8–10% gacha kamaydi;
- xizmat muddati o‘rtacha 5 yilga uzaydi;
- avariya holatlari 30% gacha qisqardi.

7. Yuklama holatini hisoblashning amaliy misoli

Masalan:
Transformatorning nominal quvvati 10 kVA, ikkilamchi tok 45 A, amalda esa 40 A bo‘lsa, yuklama darajasi:

$$\beta = \frac{40}{45} \times 100 = 88.9\%$$

Demak, transformator nominal quvvatning 89% da ishlayapti. Bu optimal rejim hisoblanadi, chunki issiqlik ortmaydi va FIK yuqori saqlanadi.

Transformatorning yuklama holati — bu uning texnik barqarorligi, energiya samaradorligi va xizmat muddatini belgilovchi eng muhim parametrdir. Optimal yuklama (85–100%) oraliqda bo‘lishi kerak, shunda:

- issiqlik yo‘qotish minimal,
- izolyatsiya eskirishi sekin,
- energiya tejamkorligi yuqori bo‘ladi.

O‘zbekiston elektr tarmoqlarida “aqlli kuzatuv tizimlari” va “yuklama muvozanatlash qurilmalari” joriy etilishi natijasida transformatorlarning yuklama boshqaruvi yangi bosqichga chiqmoqda.

Transformatorning asosiy vazifasi — elektr energiyani bir kuchlanish darajasidan boshqasiga minimal yo‘qotish bilan o‘tkazishdir. Ammo amalda, har qanday transformator ideal emas, chunki unda doimo energiya isrofi mavjud. Bu yo‘qotishlar ikki asosiy toifaga bo‘linadi:

Ularning to‘g‘ri tahlili transformator samaradorligini oshirish, energiya tejamkorligini ta’minlash va texnik xizmat rejimini optimallashtirish uchun muhim ahamiyatga ega.

1. Aktiv yo‘qotishlarning fizik mohiyati

Aktiv yo‘qotishlar — bu elektr energiyaning bevosita issiqlikka aylanishidir. Transformator chulg‘amlaridagi o‘tkazgichlar elektr qarshilikka ega bo‘lgani uchun, ular orqali o‘tgan tok quyidagi miqdordagi energiyani issiqlikka aylantiradi:

$$P_a = I^2 \times R$$

Bu yerda:

Pa— aktiv yo‘qotishlar quvvati (Vt),

I— o‘tayotgan tok kuchi (A),

R — o‘tkazgich qarshiligi (Om).

Aktiv yo‘qotishlar I²R qonuni bo‘yicha ortadi, ya’ni yuklama oshgani sari issiqlik ko‘payadi. Shu sababli transformatorlarda to‘liq yuklama rejimida (100%) issiqlik chiqishi eng yuqori darajaga yetadi.

Asosiy manbalari:

1. **Chulg‘amdagi yo‘qotishlar (Copper losses)**
   – Mis yoki alyuminiy o‘tkazgichlardagi qarshilik sababli.
   – Tok kvadratiga proporsional.
2. **Kontakt va ulanish joylaridagi yo‘qotishlar**
   – Bo‘g‘inlarda elektr qarshilik yuqori bo‘lsa, lokal issiqlik ortadi.
   – Bu joylarda “mikro qizish” va izolyatsiya yemirilishi kuzatiladi.
3. **O‘zakdagi girdob toklar (eddy currents)**
   – Magnit maydon o‘zgarishidan hosil bo‘ladigan ichki toklar.
   – Odatda po‘lat o‘zak plastinkalari orasida hosil bo‘ladi.

2. Reaktiv yo‘qotishlarning mohiyati

Reaktiv yo‘qotishlar — bu elektr energiya iste’molchiga foydali ish ko‘rinishida yetib bormasdan, magnit maydon hosil qilish uchun ishlatiladigan energiya qismini bildiradi.
Bu jarayon kuchlanish va tok orasidagi fazaviy siljish natijasida sodir bo‘ladi.

$$Q_r = U \times I \times \sin\varphi$$

Bu yerda:

Qr — reaktiv quvvat (VAr),

U — kuchlanish (V),

I— tok kuchi (A),

φ— tok va kuchlanish orasidagi burchak.

Reaktiv yo‘qotishlar **induktiv (L)** va **sig‘im (C)** xususiyatdagi yuklamalarda hosil bo‘ladi.

Masalan:

- Dvigatellar va transformatorlar — induktiv yuklama,
- Kondensatorlar — sig‘im yuklama.

3. Aktiv va reaktiv quvvat o‘zaro bog‘liqligi

Elektr tarmoqlarida quvvatlar quyidagi uchlik orqali ifodalanadi:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Bu yerda:

S — to‘liq quvvat (VA),

P — aktiv quvvat (Vt),

Q — reaktiv quvvat (VAr).

4. Transformatorlarda yo‘qotishlar tarkibi

Amaliy o‘lchovlarga ko‘ra, o‘rtacha bir fazali transformatorlarda energiya yo‘qotishlar quyidagicha taqsimlanadi:

1-jadval. Bir fazali transformatorlardagi energiya yo‘qotishlarning o‘rtacha tarkibi.

Yo‘qotish turi	**Ulushi (%)**	**Tavsif**
Mis (chulg‘am) yo‘qotishlari	30–35	Tok o‘tishi natijasida issiqlik chiqishi
Girdob tok yo‘qotishlari	20–25	O‘zakdagi magnit oqimning o‘zgarishidan

Yo‘qotish turi	Ulushi (%)	Tavsif
Gisterezis yo‘qotishlari	10–15	Magnitlanish sikli davomida issiqlik chiqishi
Reaktiv (fazaviy) yo‘qotishlar	20–25	Induktiv yuklamalar natijasida
Dielektrik va mexanik yo‘qotishlar	5	Izolyatsiya va tebranishdan kelib chiqadi

.Amaliy misol

Faraz qilaylik, transformatorning quyidagi parametrlari ma’lum:

- $U = 220\,V$
- $I = 4\,A$
- $\cos\varphi = 0.9$
- $R = 2.5\,\Omega$

Aktiv yo‘qotish:

$$P_a = I^2 \times R = 4^2 \times 2.5 = 40\,Vt$$

Reaktiv yo‘qotish:

$$Q_r = U \times I \times \sin\varphi = 220 \times 4 \times 0.435 = 382.8\,VAr$$

To‘liq quvvat:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(792)^2 + (382.8)^2} \approx 880\,VA$$

Natijada transformatorning foydali quvvati 792 Vt bo‘lsa, 40 Vt issiqlikka yo‘qotiladi, 382 VAr esa magnit maydon hosil qilishga sarflanadi.

6. Aktiv va reaktiv yo‘qotishlarning energiya tizimiga ta’siri

O‘zbekiston elektr tarmoqlarida transformator yo‘qotishlari umumiy tizim yo‘qotishlarining 10–12% qismini tashkil etadi. Bularning yarmi aktiv, yarmi esa reaktiv yo‘qotishlardir.

Masalan:

- Aktiv yo‘qotishlar — elektr energiya to‘liq issiqlikka aylanadi;
- Reaktiv yo‘qotishlar — iste’molchiga foydali ish bermaydi, lekin tarmoqdan quvvat talab qiladi.

Shuning uchun “O‘zbekiston Milliy elektr tarmoqlari” AJ 2024-yildan boshlab kompensatsion kondensator bloklarini o‘rnatishni boshladi.
Bu bloklar reaktiv quvvatni neytrallashtirib, cosφ ni 0.95 gacha oshiradi, natijada tarmoq samaradorligi 4–6% ortadi.

7.Energiya samaradorligini oshirish yo‘llari

Aktiv va reaktiv yo‘qotishlarni kamaytirish uchun quyidagi texnik yechimlar qo‘llaniladi:

a) O‘tkazgich materialini yaxshilash

- Yuqori o‘tkazuvchanlikka ega mis yoki kumush qotishmalari ishlatiladi.
- Alyuminiy o‘ramlar uchun diametri kattaroq kesim tanlanadi.

b) O‘zak materialini optimallashtirish

- Nanokristall yoki amorf po‘lat ishlatilsa, girdob toklar 70% gacha kamayadi.
- Farg‘ona zavodida 2024-yilda shunday modellarning ishlab chiqarilishi yo‘lga qo‘yilgan.

c) Quvvat koeffitsientini oshirish

- Reaktiv quvvatni kompensatsiya qiluvchi kondensator batareyalari o‘rnatiladi.
- Avtomatik boshqaruv tizimlari yordamida yuklama fazasi muvofiqlashtiriladi.

d) Raqamli monitoring tizimlari

- Transformator harorati, kuchlanish va yuklama real vaqt rejimida kuzatiladi.
- Bu tizim issiqlik yo‘qotishlarni aniqlash va oldini olish imkonini beradi.

8.Amaliy holat: O‘zbekiston tajribasi

2023-yilda “Hududiy elektr tarmoqlari” AJ tomonidan Farg‘ona viloyatida 500 dona energiyani tejovchi transformator o‘rnatildi. Natijada:

- Aktiv yo‘qotishlar 9,8% dan 6,5% gacha kamaydi,
- Reaktiv yuklama 15% ga pasaydi,
- Yillik energiya tejalishi 1,2 mln kVt·soatni tashkil etdi.

Bu tajriba 2025-yilda boshqa hududlarga ham joriy qilinmoqda.

Aktiv va reaktiv yo‘qotishlar transformator samaradorligini belgilovchi eng muhim ko‘rsatkichlardir.
Ularni to‘g‘ri aniqlash, nazorat qilish va kamaytirish orqali:

- Energiya tizimi barqarorligi oshadi,
- Transformatorning xizmat muddati uzayadi,
- O‘zbekiston elektr tarmoqlarida energiya tejamkorligi kuchayadi.

Zamonaviy yechimlar — nanomaterial o‘zaklar, reaktiv kompensatsiya tizimlari va aqlli monitoring uskunalari — bu yo‘qotishlarni minimallashtirishda asosiy texnologik yo‘nalish hisoblanadi.

Har qanday elektr transformatorida issiqlik hosil bo‘lishi muqarrar hodisadir. Bu issiqlik manbalari asosan chulg‘amdagi elektr qarshilik va o‘zakdagi magnit hodisalar natijasida yuzaga keladi. Agar issiqlik chiqishi transformatorning sovutish imkoniyatidan ortib ketsa, izolyatsiya materiali tez eskiradi, samaradorlik pasayadi va avariya holati yuzaga keladi. Shuning uchun issiqlik yo‘qotishlarini tahlil qilish — transformatorni loyihalash, ishlatish va texnik xizmat ko‘rsatishda eng muhim yo‘nalishlardan biridir.

1.Yadro (o‘zak)dagi issiqlik yo‘qotishlar

Transformator yadrosi (o‘zak) po‘lat plastinkalardan yig‘iladi va magnit maydonni o‘tkazuvchi element vazifasini bajaradi. Shu sababli o‘zakda magnit induksiya o‘zgarishi tufayli ikkita asosiy yo‘qotish kuzatiladi:

a) Gisterezis yo‘qotishlari

Bu yo‘qotishlar magnitlanish yo‘nalishining doimiy o‘zgarishidan kelib chiqadi. Har bir magnitlanish siklida o‘zak materiali molekulalarining yo‘nalishi o‘zgaradi va bu jarayon energiya sarflanishiga sabab bo‘ladi.

Matematik ifoda:

$$P_h = \eta_h \times f \times B_{max}^{1.6} \times V$$

Bu yerda:

Ph— gisterezis yo‘qotish (Vt),

ηh — material koeffitsienti (material turiga bog‘liq),

f — chastota (Hz),

Bmax— magnit induksiya (T),

V — o‘zak hajmi (m^3).

➞Gisterezis yo‘qotishlar chastotaga va magnit induksiya kattaligiga to‘g‘ridan-to‘g‘ri bog‘liq.

Kamaytirish usullari:

- Past gisterezisli silikonli po‘lat (Fe–Si) ishlatish;
- Nanokristall po‘lat yoki amorf qotishma o‘zaklardan foydalanish;
- O‘zakni termik ishlov berish (stressni kamaytirish).

b) Girdob tok (eddy current) yo‘qotishlari

O‘zakda hosil bo‘ladigan o‘zgaruvchan magnit maydon po‘lat plastinkalarda yopiq yo‘nalishda tok hosil qiladi — bu girdob tok deyiladi. Ular ichki qarshilik orqali issiqlikka aylanadi va foydali energiya yo‘qotiladi.

Formulasi:

$$P_e = \eta_e \times B_{max}^2 \times t^2 \times f^2 \times V$$

Bu yerda:

Pe— girdob tok yo‘qotish (Vt),

t — plastinka qalinligi (m).

Girdob toklar qanchalik kuchli bo‘lsa, o‘zak shunchalik qiziydi. Shu sababli po‘lat plastinkalar 0,3–0,5 mm qalinlikda olinadi va har biri lak qatlami bilan izolyatsiyalanadi.

Kamaytirish usullari:

- O‘zakni yupqa laklangan qatlamli po‘latdan yig‘ish;
- Amorf yoki nanokristall metall ishlatish;
- Magnit induksiya qiymatini (Bmax) 1,5 T dan oshirmaslik.

2.Chulg‘amdagi issiqlik yo‘qotishlar

Chulg‘amlar (birlamchi va ikkilamchi o‘ramlar) mis yoki alyuminiy simlardan tayyorlanadi. Bu o‘tkazgichlarda tok o‘tishi natijasida I^2R qonuni bo‘yicha issiqlik hosil bo‘ladi:

$$P_{cu} = I^2 \times R$$

Bu yo‘qotishlar yuklama oshgani sari keskin ortadi, chunki tok kvadrat tarzda ta’sir qiladi.

Asosiy omillar:

- Simning diametri va materiali — misning elektr o‘tkazuvchanligi yuqori, alyuminiyniki pastroq.
- Chulg‘amning sovutish darajasi — havo, yog‘ yoki suv sirkulyatsiyasi orqali issiqlik chiqariladi.
- Tokning harmonik buzilishlari — yuqori chastotali komponentlar (masalan, inverterli tizimlarda) issiqlik yo‘qotishini oshiradi.

Kamaytirish usullari:

- Kattaroq kesimli sim ishlatish (I^2R yo‘qotishni kamaytiradi);
- Mis o‘ramli transformatorlar qo‘llash;
- Elektr kontaktlarni mexanik bosim bilan mahkamlash;
- Harorat nazorati uchun termodatchiklar o‘rnatish.

3.Yadro va chulg‘am o‘rtasidagi issiqlik muvozanati

Transformator issiqlik rejimi doimiy energiyaning kirish–chiqish muvozanati bilan belgilanadi.
Agar issiqlik chiqishi sovutish tezligiga teng bo‘lsa, harorat barqaror holatda saqlanadi.

$$P_{yo‘qotish} = P_h + P_e + P_{cu}$$

Agar sovutish yetarli bo‘lmasa, transformator harorati quyidagi formula bilan o‘sadi:

$$\Delta T = \frac{P_{yo‘qotish}}{A \times k}$$

Bu yerda:

A— issiqlik tarqalish yuzasi (m^2),

k— issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsienti ($Vt/m^2 \cdot K$).

Yog‘li sovutish tizimlarida k≈8–12k \approx 8–12k≈8–12, havo sovutishda esa k≈2–3k Demak, yog‘li sovutish samaradorligi 3–4 baravar yuqori.

4.Sovutish tizimlari turlari

a) Tabiiy havo sovutish (AN)

- Kichik quvvatli transformatorlarda qo‘llaniladi.
- Issiqlik konveksiya yo‘li bilan tashqariga chiqadi.
- Oddiy, ammo samaradorligi past.

b) Yog‘li sovutish (ONAN – Oil Natural Air Natural)

- Transformator ichida issiqlik yog‘ orqali harakatlanib, radiatorlarda havoga uzatiladi.
- Eng ko‘p tarqalgan usul; 63 kVA dan yuqori quvvatlarda majburiy qo‘llaniladi.
- Yog‘ harorati 70–80°C dan oshmasligi kerak.

c) Majburiy havo yoki suv sovutish (OFAF / OFWF)

- Yirik podstansiyalar va elektr stansiyalarida qo‘llaniladi.
- Sovutish ventilyatorlar yoki nasoslar yordamida amalga oshiriladi.
- Haroratni aniq nazorat qiladi, lekin energiya sarfi ko‘proq.

5.Amaliy hisoblash misoli

Faraz qilaylik, transformatorning quyidagi parametrlar ma’lum:

- Tok $I = 12\,A$
- Qarshilik $R = 0.5\,\Omega$
- Gisterezis yo‘qotish $P_h = 40\,Vt$
- Girdob yo‘qotish $P_e = 20\,Vt$

U holda umumiy issiqlik chiqishi:

$$P_{issiq} = P_{cu} + P_h + P_e = (12^2 \times 0.5) + 40 + 20 = 172\,Vt$$

Agar sovutish yuzasi 0.8 m², issiqlik o‘tkazuvchanlik k=10 bo‘lsa:

$$\Delta T = \frac{172}{0.8 \times 10} = 21.5^\circ C$$

Demak, transformator harorati 20°C atrofida oshadi — bu normal ish holatidir. Ammo sovutish tizimi nosoz bo‘lsa, bu qiymat 50–60°C gacha ko‘tarilib, izolyatsiya shikastlanadi.

6.O‘zbekiston energetika tizimidagi amaliyot

O‘zbekiston transformatorlarida o‘tkazilgan 2023–2024-yillar tahliliga ko‘ra:

Hudud	**O‘rtacha harorat oshishi (°C)**	**Sovutish turi**	**Samaradorlik (%)**
Toshkent viloyati	18–22	Yog‘li (ONAN)	97.8
Farg‘ona viloyati	25–28	Havo (AN)	95.6
Buxoro viloyati	27–30	Yog‘li (ONAF)	98.1
Qoraqalpog‘iston	32–35	Suvli (OFWF)	98.7

📊 1-jadval. O‘zbekiston hududlarida transformator sovutish samaradorligi tahlili.

7.Issiqlik nazorati uchun zamonaviy texnologiyalar

Bugungi kunda yangi avlod transformatorlarida quyidagi tizimlar qo‘llanilmoqda:

- Termosensorlar – yog‘ haroratini onlayn kuzatadi.
- Infraqizil nazorat kameralar – issiq nuqtalarni aniqlaydi.
- IoT asosidagi monitoring – SCADA tizimi orqali real vaqt ma’lumot uzatadi.
- Sovutish ventilyatorlari avtomatik ishga tushadi, harorat >85°C bo‘lsa.

2024-yilda “Farg‘ona transformator zavodi” tomonidan ishlab chiqilgan “Smart Cooling Unit” tizimi shu prinsip asosida ishlab chiqilgan va Energetika vazirligi tomonidan sinovdan o‘tkazilgan.

Yadro va chulg‘amdagi issiqlik yo‘qotishlari — transformator samaradorligini belgilovchi asosiy ko‘rsatkichlardir. Ular o‘zaro bog‘liq bo‘lib, issiqlik balansi transformatorning ishlash barqarorligini aniqlaydi.

Issiqlik nazoratini to‘g‘ri tashkil etish natijasida:

- energiya yo‘qotishlar 10–15% gacha kamayadi;
- izolyatsiya muddati 2 barobar uzayadi;
- avariya xavfi keskin kamayadi.

Yangi texnologiyalar — nanokristall o‘zaklar, aqlli sovutish tizimlari, va onlayn issiqlik nazorati — O‘zbekiston energetika sohasida transformatorlarning samaradorligini global darajada oshirmoqda.

Bugungi kunda global energetika tizimida eng muhim masalalardan biri — energiya samaradorligini oshirish va yo‘qotishlarni kamaytirishdir. Elektr tarmoqlarda energiya uzatishning eng muhim bo‘g‘ini bo‘lgan transformatorlar, ishlab chiqarishdan tortib iste’molchi darajasigacha bo‘lgan energiya zanjirining barqaror ishlashini ta’minlaydi. Biroq transformatorlarda har doim aktiv, reaktiv, magnit va issiqlik yo‘qotishlari mavjud. Shu sababli ularning samaradorligini oshirish — energiya tejash siyosatining eng dolzarb yo‘nalishidir. O‘zbekiston uchun ham bu masala strategik ahamiyatga ega. Mamlakatda 2023-yilda 60 mingdan ortiq transformator punktlari mavjud bo‘lib, ularning umumiy quvvati 30 GVt dan oshadi. Bu tarmoqlarda har yili 1,5–2 mlrd kVt·soat energiya yo‘qotilishi aniqlangan. Energiya samaradorligini oshirish orqali bu yo‘qotishlarni 20–25% gacha kamaytirish imkoniyati mavjud.

1.Samaradorlik tushunchasi va ko‘rsatkichlari

Transformator samaradorligi (FIK, η) — bu chiqish quvvati bilan kirish quvvatining nisbatidir:

$$\eta = \frac{P_{chiqish}}{P_{kirish}} \times 100\%$$

Ideal holatda bu ko‘rsatkich 100% ga teng bo‘lishi kerak, lekin amalda 97–99% dan ortmaydi.
Samaradorlikka ta’sir etuvchi asosiy omillar:

1-jadval. Transformator samaradorligiga ta’sir etuvchi omillar.

№	Omil	Ta’siri
1	Yadro materialining sifati	Magnit yo‘qotishlarni kamaytiradi
2	Chulg‘am materiali va kesimi	Elektr yo‘qotishlarga ta’sir qiladi
3	Sovutish tizimi	Issiqlik barqarorligini ta’minlaydi
4	Yuklama barqarorligi	Tok o‘zgarishlarini muvofiqlashtiradi
5	Quvvat koeffitsienti	Reaktiv yo‘qotishlarga ta’sir qiladi

2.Yadro va chulg‘am materiallarini modernizatsiya qilish

a) Yadro materialini yangilash

An’anaviy silikonli po‘lat (Fe–Si) o‘rniga nanokristall va amorf metall qotishmalar ishlatish — magnit yo‘qotishlarni 40–60% gacha kamaytiradi.

Farqi quyidagicha:

Material turi	**Girdob tok yo‘qotish (%)**	**Magnit samaradorlik**	**Narx (nisbiy)**
Oddiy po‘lat (Fe–Si)	100	O‘rtacha	Arzon
Nanokristall po‘lat	40–50	Yuqori	O‘rtacha

Material turi	Girdob tok yo‘qotish (%)	Magnit samaradorlik	Narx (nisbiy)
Amorf qotishma	30–35	Juda yuqori	Qimmat

📈 Farg‘ona transformator zavodi 2024-yilda nanokristall o‘zakli transformatorlar ishlab chiqishni boshladi. Sinov natijalariga ko‘ra, ular oddiy po‘lat o‘zakli modellarga nisbatan 4,3% kamroq energiya yo‘qotgan.

b) Chulg‘amlarni optimallashtirish

Mis sim o‘rniga alyuminiy-mis qotishmasi yoki supero‘tkazuvchi mis ishlatish orqali:

- issiqlik yo‘qotishlar 10–12% kamayadi;
- og‘irlik 15% gacha yengillashadi;
- samaradorlik 0,5–1% ortadi.

3.Sovutish tizimini takomillashtirish

Transformatorning energetik barqarorligi issiqlik chiqishini samarali boshqarish bilan chambarchas bog‘liq. Bugungi kunda quyidagi sovutish tizimlari samaradorlikni oshirishda keng qo‘llanilmoqda:

a) Yog‘ asosidagi tabiiy sovutish (ONAN)

- Eng ko‘p tarqalgan tizim.
- Issiqlik yog‘ sirkulyatsiyasi orqali tabiiy yo‘l bilan chiqadi.
- Samaradorlik ~98%.

b) Majburiy havo yoki suv sovutish (OFAF / OFWF)

- Ventilyator yoki suv nasoslari orqali sovutish ta’minlanadi.
- Yirik podstansiyalar uchun samaradorlik 99% gacha.

c) Ekologik ester yog‘lari

- An’anaviy mineral yog‘lar o‘rniga biologik parchalanadigan ester asosidagi suyuqliklar ishlatish yong‘in xavfini kamaytiradi.
- Xizmat muddati 10 yilgacha uzayadi.

📃 2023-yildan boshlab “Hududiy elektr tarmoqlari” AJ tomonidan 500 dan ortiq ekologik yog‘li transformatorlar sinovdan o‘tkazildi.

4.Raqamli monitoring va “aqlli” boshqaruv tizimlari

a) Smart transformatorlar

Raqamli transformatorlar harorat, yuklama, quvvat, tebranish va yog‘ bosimini real vaqt rejimida o‘lchaydi. Ularning asosiy komponentlari:

- IoT sensorlar (internet orqali ma’lumot uzatadi);
- SCADA tizimi (ma’lumotlarni yig‘adi va tahlil qiladi);
- AI algoritmlar (xatolik va ortiqcha yuklamani oldindan aniqlaydi).

Natija:

- Avariya xavfi 35% gacha kamayadi;
- Texnik xizmat xarajatlari 25% qisqaradi;
- Energiya isrofi 3–5% kamayadi.

2024-yilda O‘zbekiston Energetika vazirligi “Smart Grid 2030” dasturi doirasida 1200 dan ortiq raqamli transformatorlarni ishga tushirdi.

b) IoT asosida energiya nazorati

- Har bir transformatorga o‘rnatilgan energiya datchiklari orqali yuklama va yo‘qotishlar kuzatiladi.
- SCADA tizimida tarmoq bo‘ylab samaradorlik xaritasi tuziladi.
- Avariya bo‘lgan hududda avtomatik signal yuboriladi.

5**.Reaktiv quvvatni kompensatsiya qilish**

Reaktiv yo‘qotishlar tarmoq samaradorligini kamaytiruvchi asosiy omillardan biridir. Buni bartaraf etish uchun kompensatsiya tizimlari qo‘llanadi:

$$Q = U \times I \times \sin \varphi$$

Agar cosφ=00.8 bo‘lsa, tarmoqda energiya yo‘qotish yuqori; Agar cosφ=0.95 ga ko‘tarilsa, samaradorlik 4–6% oshadi.

Kompensatsiya usullari:

- Statik kondensator batareyalari (SCB) – tarmoqda doimiy ishlaydi.
- Avtomatik reaktiv quvvat regulyatorlari (ARQR) – yuklamaga moslashib ishlaydi.
- Synchronous compensator (sinxron kompensator) – yirik tarmoqlarda faza siljishini to‘g‘rilaydi.

O‘zbekiston bo‘yicha 2024-yil oxirigacha 2500 ta kondensator stansiyasi o‘rnatilishi rejalashtirilgan.

6.Energiya tejamkorlikning iqtisodiy samarasi

Energiya samaradorligini oshirish nafaqat texnik, balki iqtisodiy foyda ham beradi. Masalan, transformator yo‘qotishlarini 1% ga kamaytirish orqali O‘zbekiston yiliga 70 mln kVt·soat energiya tejalishini kutmoqda. Bu esa yillik hisobda 40 milliard so‘mdan ortiq mablag‘ni iqtisod qiladi.

Misol:

2023-yilda “Farg‘ona transformator zavodi” tomonidan modernizatsiya qilingan 630 kVA quvvatli transformator natijalari:

- Yo‘qotishlar 9.5% dan 6.8% gacha kamaydi;
- FIK 98.3% gacha oshdi;
- 1 dona transformator yiliga 3200 kVt·soat energiya tejadi.

7.Xalqaro tajriba va O‘zbekiston istiqbollari

Xalqaro standartlar

- IEC 60076 – “Power Transformers” standarti energiya samaradorligini oshirish bo‘yicha global me’yorlarni belgilaydi.
- IEEE Std C57.91-2021 – transformatorlarning issiqlik chegarasi va xizmat muddatini nazorat qilish usullarini ko‘rsatadi.
- EU Ecodesign Regulation – 2021-yildan Yevropada minimal samaradorlik darajasini majburiy belgilagan.

O‘zbekiston istiqbollari

- 2030-yilgacha mavjud transformatorlarning 60% modernizatsiya qilinadi;
- 2025-yildan yangi ishlab chiqarilayotgan barcha transformatorlar “Smart Control Unit” bilan jihozlanadi;
- Raqamli monitoring orqali energiya yo‘qotishlar 10% dan 5% gacha kamaytiriladi.

Transformatorlarning energiya samaradorligini oshirish — bu faqat texnik jarayon emas, balki barqaror rivojlanish strategiyasining ajralmas qismidir. Yadro va chulg‘am materiallarining yangilanishi, sovutish tizimlarining modernizatsiyasi, raqamli nazorat texnologiyalari va reaktiv quvvatni kompensatsiya qilish natijasida:

- transformatorlarning xizmat muddati 2–3 baravar uzayadi;
- energiya isrofi 20% gacha kamayadi;
- texnik xizmat xarajatlari 30% ga qisqaradi;
- elektr tarmoqlarning umumiy samaradorligi 5–8% ga oshadi.

O‘zbekiston energetika tizimi “Smart Grid 2030” dasturi orqali bu islohotlarning amaliy natijasini bosqichma-bosqich qo‘lga kiritmoqda. Bu esa mamlakatni energiya tejamkor, ekologik toza va raqamli energetika tizimiga o‘tkazish yo‘lida muhim qadamlardan biridir.

Test savollari

1.Transformatorning yuklama holati nimani bildiradi?

A) Sovutish tizimi haroratini

B) Ikkilamchi zanjirdan o‘tayotgan tokning nominal tokka nisbati

C) O‘zakdagi magnit oqim yo‘nalishini

D) Transformatorning issiqlik sig‘imini

2.Aktiv yo‘qotishlar qaysi fizik jarayon natijasida yuzaga keladi?

A) Magnit oqimning o‘zgarishidan

B) Elektr qarshilikda issiqlik hosil bo‘lishidan

C) Fazaviy siljishdan

D) Gisterezis siklidan

3.Reaktiv yo‘qotishlar qanday jarayon bilan bog‘liq?

A) Tok va kuchlanish orasidagi fazaviy siljish bilan

B) Tokning o‘sish tezligi bilan

C) Elektr energiyaning to‘liq issiqlikka aylanishi bilan

D) Sovutish tezligi bilan

4.Transformatorning samaradorligi qanday formula bilan ifodalanadi?

A) $\eta = I_2/I_1 \times 100\%$

B) $\eta = U_1/U_2 \times 100\%$

C) $\eta = P_{chiqish}/P_{kirish} \times 100\%$

D) $\eta = N_1/N_2 \times 100\%$

5.Girdob tok yo‘qotishlarini kamaytirish uchun qanday choralar qo‘llaniladi?

A) O‘zakni yupqa plastinkalardan yig‘ish

B) Tok kuchini oshirish

C) O‘zak hajmini kattalashtirish

D) Yog‘ haroratini ko‘tarish

6.Transformatorlarda issiqlik yo‘qotishlarining asosiy sababi nima?

A) Tok chastotasining o‘zgarishi

B) O‘zakdagi magnit oqimning ortishi

C) Elektr qarshilik natijasida hosil bo‘lgan I^2R yo‘qotishlar

D) Reaktiv quvvat kamayishi

7.Reaktiv quvvatni kamaytirish uchun qaysi usul samarali hisoblanadi?

A) Kondensator batareyalari o‘rnatish

B) Tok kuchini oshirish

C) Haroratni pasaytirish

D) Transformator o‘zak hajmini kamaytirish

8.“Smart transformator” texnologiyasining asosiy afzalligi nimada?

A) Yog‘ sarfini kamaytiradi

B) Harorat va yuklamani real vaqt rejimida kuzatadi

C) Faqat yuqori kuchlanish tarmoqlarda ishlaydi

D) Suyuqlik o‘rniga havo bilan sovutiladi

9.O‘zbekiston energetika tizimida energiya samaradorligini oshirishning asosiy yo‘nalishlaridan biri:

A) Yuklamani doimiy oshirish

B) Raqamli monitoring tizimlarini joriy etish

C) Transformator o‘lchamlarini kattalashtirish

D) Reaktiv quvvatni oshirish

10.Energiya tejamkor transformatorlarda ishlatiladigan ekologik sovutuvchi moddalar:

A) Mineral moylar

B) Ester asosidagi biologik suyuqliklar

C) Distillangan suv

D) Quruq gazlar

Savollar

1. Transformatorning elektr yuklama holati qanday aniqlanadi va u nimalarga ta’sir ko‘rsatadi?
2. Aktiv va reaktiv yo‘qotishlar orasidagi asosiy farq nimada?

3. Transformator o‘zak (yadro)da issiqlik hosil bo‘lishiga sabab bo‘luvchi jarayonlarni tushuntiring.
4. Girdob tok yo‘qotishlarini kamaytirish uchun qanday konstruktiv chora-tadbirlar qo‘llaniladi?
5. Transformator samaradorligi qanday formula orqali aniqlanadi va uning qiymatiga nimalar ta’sir qiladi?
6. Chulg‘amdagi issiqlik yo‘qotishlarining asosiy sabablari nimalardan iborat?
7. Sovutish tizimlarining turlari va ularning transformator samaradorligiga ta’sirini izohlang.
8. Energiya samaradorligini oshirishda raqamli (smart) transformatorlarning afzalliklari nimalarda namoyon bo‘ladi?
9. Reaktiv quvvatni kompensatsiya qilishning asosiy usullarini sanab bering.
10. O‘zbekiston energetika tizimida transformator samaradorligini oshirish uchun qanday texnik va tashkiliy choralar amalga oshirilmoqda?

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Farg‘ona Transformator Zavodi. Innovatsion hisobotlar va texnik kataloglar. Farg‘ona, 2023–2024.
2. Hududiy elektr tarmoqlari AJ. Energiya tejamkorlik va modernizatsiya dasturi. Toshkent, 2024.
3. IEEE Std C57.91-2021. Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers. Institute of Electrical and Electronics Engineers, USA, 2021.
4. IEEE Transactions on Power Delivery. Scientific Journal on Power Systems and Transformer Efficiency. Vol. 36, No. 4, 2021.
5. IEC 60076. Power Transformers – International Standard. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2020.
6. O‘zbekiston Energetika vazirligi. “Smart Grid 2030” dasturi. Toshkent, 2023.
7. O‘zbekiston Energetika vazirligi. Yillik texnik hisobotlar va energiya samaradorligi tahlillari. Toshkent, 2023–2024.

8. Sayfullayev A. Elektr mashinalari. Toshkent axborot texnologiyalari universiteti nashriyoti, 2022.
9. O‘zDSt 3055:2021. Transformatorlarni sinovdan o‘tkazish talablari. Toshkent: O‘zstandart agentligi, 2021.

1.5. Transformatorning keltirilgan sxemasi va hisoblash usullari

Transformatorlarning elektr xususiyatlarini to‘liq tahlil qilish uchun ularning haqiqiy konstruksiyasi murakkab bo‘lib, bevosita hisoblashni qiyinlashtiradi. Shu sababli amaliy tahlil va hisob-kitoblarda transformatorlar soddalashtirilgan ekvivalent sxema orqali ifodalanadi.

Bu sxema transformatorning haqiqiy fizik jarayonlarini matematik model ko‘rinishida tasvirlab, elektr qarshilik, induktivlik, yo‘qotish va energiya oqimini umumlashtirilgan holda ifodalaydi.

Ekvivalent sxemadan foydalanish muhandisga quyidagilarni aniqlash imkonini beradi:

- kuchlanish pasayishi;
- foydali ish koeffitsienti (FIK);
- yuklama toki va quvvat oqimi;
- issiqlik yo‘qotish va reaktiv komponentlar nisbatini.

1.Keltirilgan sxema mohiyati

Ekvivalent (yoki keltirilgan) sxema — bu transformatorning birlamchi va ikkilamchi zanjirlaridagi elektr parametrlarini bitta umumiy tarmoqga o‘tkazib, ularni matematik jihatdan tenglashtirish asosida qurilgan modeldir.

Transformatorning ikkita o‘rami mavjud:

- Birlamchi o‘ram — tarmoqdan kuchlanish oluvchi qism;
- Ikkilamchi o‘ram — yuklamaga kuchlanish beruvchi qism.

Ularning orasidagi magnit bog‘lanish tufayli, har bir o‘ramda o‘ziga xos aktiv qarshilik (R), reaktiv induktivlik (X) va magnit oqim hosil bo‘ladi.

Ekvivalent sxema tuzishda, bu ikki tomondagi farqlar quyidagi formula orqali bir tomonga “keltiriladi”:

$$U_1 = k \times U_2 \quad \text{va} \quad I_2 = \frac{I_1}{k}$$

bu yerda:

- $k = \frac{N_1}{N_2}$ — transformatsiya koeffitsienti,
- N_1, N_2 — mos ravishda birlamchi va ikkilamchi o‘ramlar soni.

2.Keltirish prinsipi

Birlamchi va ikkilamchi o‘ramlardagi qarshilik va induktivliklar transformatsiya koeffitsienti kvadratiga ko‘paytiriladi.

Agar parametrlar ikkilamchi tomondan birlamchiga keltirilsa:

$$R_2' = R_2 \times k^2 \quad \text{va} \quad X_2' = X_2 \times k^2$$

Natijada umumiy keltirilgan sxema quyidagi ko‘rinishda yoziladi:

$$U_1 = I_1(R_1 + jX_1) + I_2'(R_2' + jX_2') + jI_mX_m$$

Bu ifoda transformatorning barcha elektr xususiyatlarini yagona tenglamada ifodalaydi.

3.T-shaklli keltirilgan model

Amaliy hisob-kitoblarda transformatorning eng ko‘p qo‘llaniladigan ekvivalent sxemasi — T-shaklli modeldir.

U quyidagi elementlardan iborat:

- R_1, X_1 — birlamchi o‘ramning aktiv qarshilik va induktiv reaktansi;
- R_2', X_2' — ikkilamchi o‘ramning birlamchiga keltirilgan aktiv qarshilik va induktiv reaktansi;
- R_0, X_0 — magnit tarmoqqa oid elementlar (bo‘sh yurish yo‘qotishlari va magnit induktivlik);
- I_0 — bo‘sh yurish toki.

T-shaklli modelning afzalligi shundaki, u transformatorning barcha elektr parametrlarini bir vaqtning o‘zida tahlil qilish imkonini beradi.

4.Hisoblash algoritmi

Transformatorning keltirilgan sxemasi asosida quyidagi bosqichlarda hisob-kitob amalga oshiriladi:

1-bosqich:

O‘ramlar orasidagi transformatsiya koeffitsientini aniqlash:

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

2-bosqich:

Ikkilamchi parametrlarni birlamchi tomonga keltirish:

$$R_2' = R_2 \times k^2, \quad X_2' = X_2 \times k^2$$

3-bosqich:

Umumiy ekvivalent qarshilik:

$$Z_{eq} = (R_1 + R_2') + j(X_1 + X_2')$$

4-bosqich:

Yuklama toki:

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_{eq}}$$

5-bosqich:

Kuchlanish pasayishini aniqlash:

$$\Delta U = I_1(R_1 + R_2')\cos\varphi + I_1(X_1 + X_2')\sin\varphi$$

6-bosqich:

Samaradorlikni hisoblash:

$$\eta = \frac{P_{chiqish}}{P_{kirish}} \times 100\%$$

5.Amaliy misol

Faraz qilaylik, transformator quyidagi ma’lumotlarga ega:

- $U_1 = 2200\,\text{V}, U_2 = 220\,\text{V};$
- $R_1 = 2\,\Omega, X_1 = 4\,\Omega;$
- $R_2 = 0.02\,\Omega, X_2 = 0.04\,\Omega;$
- $\cos\varphi = 0.9.$

Hisoblaymiz:

$$k = \frac{2200}{220} = 10$$

$$R_2' = 0.02 \times 10^2 = 2\,\Omega, \quad X_2' = 0.04 \times 10^2 = 4\,\Omega$$

$$Z_{eq} = (2+2) + j(4+4) = 4 + j8$$

$$|Z_{eq}| = \sqrt{4^2 + 8^2} = 8.94\,\Omega$$

Agar U1=2200 V bo‘lsa, unda:

$$I_1 = \frac{2200}{8.94} = 246\ A$$

Natija: transformator 246 A yuklama toki bilan ishlayapti, bu esa nominal quvvat oralig‘ida ekanini bildiradi.

6.Ekvivalent parametrlar tahlili (jadval)

1-jadval. Transformatorning keltirilgan parametrlarini aniqlash formulalari

Parametr	**Belgilanishi**	**Hisoblash formulasi**	**O‘lchov birligi**
Aktiv qarshilik	R_1, R_2'	R2′=R2×k2R_2′ = R_2 \times k^2R2′=R2×k2	Ω
Induktiv reaktans	X_1, X_2'	X2′=X2×k2X_2′ = X_2 \times k^2X2′=X2×k2	Ω
Umumiy qarshilik	Z_eq	Req+jXeqR_{eq} + jX_{eq}Req+jXeq	Ω
Transformatsiya koeffitsienti	k	U1/U2U_1 / U_2U1/U2	–
Yuklama toki	I_1	U1/ZeqU_1 / Z_{eq}U1/Zeq	A

7.O‘zbekiston amaliyoti misolida

O‘zbekiston sanoat korxonalarida (masalan, “Farg‘onaazot”, “Olmaliq KMK”, “Hududiy elektr tarmoqlari” AJ) transformatorlarning elektr tahlili keltirilgan sxemalar asosida bajariladi. 2023-yilgi audit natijalariga ko‘ra:

- 630 kVA quvvatli transformatorlarda yuklama hisoblashda T-shaklli model 98% aniqlik bilan ishlaydi;
- Issiqlik yo‘qotishlar 6–8% aniqlikda prognoz qilinadi;
- Ekvivalent sxemani qo‘llash orqali energiya isrofini 4–5% kamaytirish mumkinligi aniqlangan.

Transformatorning keltirilgan (ekvivalent) sxemasi — bu haqiqiy transformatorni elektr jihatdan soddalashtirilgan, ammo to‘liq fizik ma’noda ifodalaydigan modeldir. U quyidagi imkoniyatlarni beradi:

- quvvat yo‘qotishlarni tahlil qilish;
- yuklama rejimini optimallashtirish;
- kuchlanish pasayishi va samaradorlikni hisoblash;
- energiya tejamkorlikni oshirish.

Amaliy hisob-kitoblarda T-shaklli ekvivalent model eng ko‘p qo‘llaniladi, chunki u transformatorning magnit va elektr tarmoqlarini birlashtirgan holda aniq matematik natijalar beradi. O‘zbekiston energetika sohasida transformator tahlillarini raqamlashtirish ham aynan shu model asosida olib borilmoqda.

Transformatorning ishlash jarayonida elektr qarshilik asosiy rol o‘ynaydi, chunki u quvvat yo‘qotishlari, kuchlanish pasayishi va samaradorlik darajasini belgilaydi.

Haqiqiy transformatorning har bir o‘rami (birlamchi va ikkilamchi) o‘ziga xos aktiv qarshilik (R) va induktiv reaktans (X) ga ega bo‘ladi. Ammo bu parametrlar o‘zaro bog‘langan magnit maydon orqali ta’sirlashgani sababli, tahlilni soddalashtirish uchun ular bir tomonga keltirilgan — ya’ni ekvivalent qiymatlar

shaklida hisoblanadi. Bu jarayon transformatorning energiya tarmoqlarini matematik modelda birlashtirish imkonini beradi.

1.Transformator qarshiliklari mohiyati

Transformatorning umumiy qarshiligi quyidagi tarkibiy qismlardan tashkil topadi:

$$Z = R + jX$$

Bu yerda:

R – aktiv qarshilik (issiqlik yo‘qotish manbai),

X – induktiv reaktans (magnit maydon energiyasi bilan bog‘liq).

Aktiv qarshilik o‘ram simining materialiga (mis yoki alyuminiy), uzunligiga va kesimiga bog‘liq:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

bu yerda

ρ – materialning solishtirma qarshiligi,

l– sim uzunligi,

S – simning kesim yuzasi.

Induktiv reaktans esa o‘ramdagi o‘zinduksiya hodisasi bilan aniqlanadi:

$$X = 2\pi f L$$

bu yerda

f – chastota,

L – induktivlik.

2.Qarshiliklarni tenglashtirish zarurati

Transformatorning har ikkala o‘ramida turli miqdordagi qarshilik mavjud, shuning uchun ular birlamchi yoki ikkilamchi tomonga keltiriladi. Bu jarayon “tenglashtirish” deb ataladi va transformatorni matematik jihatdan bitta zanjir sifatida tahlil qilish imkonini beradi.

Agar hisob birlamchi tomonda olib borilsa:

$$R_2^{'} = R_2 \times k^2, \quad X_2^{'} = X_2 \times k^2$$

Agar ikkilamchi tomonga keltirilsa:

$$R_1^{'} = \frac{R_1}{k^2}, \quad X_1^{'} = \frac{X_1}{k^2}$$

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} —$$

Bu yerda transformatsiya koeffitsienti.

3.Ekvivalent qarshilik formulasi

Keltirilgan qarshiliklarni hisoblagach, umumiy ekvivalent qarshilik quyidagicha ifodalanadi:

$$Z_{eq} = (R_1 + R_2') + j(X_1 + X_2')$$

Shuningdek, umumiy qiymat:

$$|Z_{eq}| = \sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2}$$

Bu qiymat transformatorning yuklama toki va kuchlanish pasayishini aniqlashda asosiy o‘rin tutadi.

4.Qarshiliklarni tajribaviy aniqlash (sinov asosida)

Transformatorlarda ekvivalent qarshilik qisqa tutashuv tajribasi orqali aniqlanadi.

Sinov shartlari:

- Ikkilamchi o‘ram qisqa tutashtiriladi;
- Birlamchi o‘ramga kamaytirilgan kuchlanish beriladi;
- Qisqa tutashuv tokining nominal qiymatga yetishi ta’minlanadi.

Natijada o‘lchanadi:

- Uk — qisqa tutashuv kuchlanishi,
- Ik — qisqa tutashuv toki,
- Pk — aktiv quvvat yo‘qotish.

Hisoblash formulalari:

$$R_{eq} = \frac{P_k}{I_k^2}, \quad Z_{eq} = \frac{U_k}{I_k}, \quad X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2}$$

5.Amaliy misol

Quyidagi ma’lumotlar asosida qarshiliklarni aniqlaymiz:

- $U_k = 110\ \text{V}$
- $I_k = 10\ \text{A}$
- $P_k = 900\ \text{Vt}$

Hisoblaymiz:

$$R_{eq} = \frac{900}{10^2} = 9\,\Omega$$

$$Z_{eq} = \frac{110}{10} = 11\,\Omega$$

$$X_{eq} = \sqrt{11^2 - 9^2} = \sqrt{121 - 81} = 6.32\,\Omega$$

Natija:

- $R_{eq} = 9\,\Omega$ – issiqlik yo‘qotish manbai,
- $X_{eq} = 6.32\,\Omega$ – magnit induktivlik ta’siri,
- $Z_{eq} = 11\,\Omega$ – umumiy elektr qarshilik.

6.Amaliy jadval (hisob natijalari)

1-jadval. Qisqa tutashuv tajribasi asosida aniqlangan ekvivalent parametrlar.

№	Ko‘rsatkich	Belgilanish	Hisoblash formulasi	Qiymat	O‘lchov
1	Aktiv qarshilik	R_{eq}	P_k/I_k^2	9	Ω
2	Umumiy qarshilik	Z_{eq}	U_k/I_k	11	Ω
3	Induktiv reaktans	X_{eq}	$\sqrt{Z^2 - R^2}$	6.32	Ω

7.Qarshiliklarning transformator ishlashiga ta’siri

Transformatorning qarshiligi ortgan sari:

- issiqlik yo‘qotishlar I2RI^2 RI2R qonuniga ko‘ra keskin ortadi;
- kuchlanish pasayishi kuchayadi;

- samaradorlik (η) pasayadi.

Bu jarayon quyidagicha ifodalanadi:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{yo'qotish}} \times 100\%$$

Agar Req 10% ga kamaytirilsa, samaradorlik o‘rtacha 0.5–0.7% ga ortadi.

8.Qarshilikni kamaytirish usullari

Transformatorlarda aktiv va induktiv qarshiliklarni kamaytirish uchun quyidagi chora-tadbirlar qo‘llaniladi:

1. Konstruktiv yechimlar:

- Mis o‘ramlar kesimini kattalashtirish;
- Sim uzunligini kamaytirish;
- O‘ramni silindrik shaklda joylashtirish.

2. Material tanlash:

- Yuqori o‘tkazuvchanlikdagi mis yoki alyuminiy-mis qotishmalari;
- Yadro uchun past gisterezisli po‘lat.

3. Sovutish tizimi:

- Yog‘li sovutish tizimi (ONAN yoki OFAF) orqali issiqlik tarqalishini yaxshilash.

4. Raqamli nazorat:

- Termodatchiklar orqali chulg‘am haroratini nazorat qilish;
- IoT asosida yuklama muvozanatini saqlash.

9.O‘zbekiston amaliyotidagi holat

O‘zbekistonning yirik korxonalari va elektr tarmoqlarida transformator qarshiliklari energiya auditi jarayonida doimiy nazorat qilinadi. 2024-yilda “Hududiy elektr tarmoqlari” AJ tomonidan o‘tkazilgan tahlillarga ko‘ra:

- 1000 dan ortiq transformatorlarda ReqR_{eq}Req 7–10 Ω oralig‘ida;
- texnik xizmatdan o‘tgan qurilmalarda energiya yo‘qotish 12% dan 8% gacha kamaygan;
- yangi nanokristall o‘zakli transformatorlarda FIK 98,5% gacha oshgan.

Transformatorning tenglashtirilgan va ekvivalent qarshiliklarini aniqlash:

- kuchlanish pasayishini prognoz qilish;
- yuklama holatini nazorat qilish;
- energiya samaradorligini baholash;
- issiqlik barqarorligini saqlash uchun zarur hisoblanadi.

Amaliy tajribalar shuni ko‘rsatadiki, qarshilikni 10% ga kamaytirish natijasida:

Shuning uchun har bir ishlab chiqaruvchi va texnik mutaxassis transformatorning ekvivalent qarshiliklarini aniqlash usullarini mukammal bilishi lozim.

Transformatorning keltirilgan (ekvivalent) sxemasi — bu qurilmaning haqiqiy ish jarayonini soddalashtirilgan matematik modelda ifodalovchi tizimdir. Uning yordamida transformatorning tok, kuchlanish, quvvat, yo‘qotish va samaradorlik kabi muhim parametrlarini hisoblash mumkin. Keltirilgan sxema bo‘yicha hisoblash algoritmi muhandislik amaliyotida transformatorlarning yuklama tahlili, kuchlanish pasayishi, energiya isrofi va samaradorligini baholash uchun asosiy vosita hisoblanadi. Ushbu bo‘limda biz ushbu algoritmni bosqichma-bosqich ko‘rib chiqamiz, formulalar, grafik tahlillar va amaliy misollar orqali tushuntiramiz.

1.Hisoblashning asosiy maqsadi

Keltirilgan sxema asosida hisob-kitoblar quyidagi texnik vazifalarni bajarish uchun amalga oshiriladi:

- Transformatorning yuklama toki I1I_1I1 va I2I_2I2 ni aniqlash;
- Kuchlanish pasayishini topish;
- Aktiv va reaktiv quvvat yo‘qotishlarini hisoblash;
- Foydali ish koeffitsientini (FIK, η) aniqlash;
- Nominal va ortiqcha yuklama holatlarida ishlash barqarorligini tahlil qilish.

Bu hisob-kitoblar ishlab chiqarish, loyihalash, texnik xizmat ko‘rsatish va energiya auditi uchun zarurdir.

2.Transformatorning asosiy tenglamalari

Keltirilgan sxema asosida transformatorning umumiy elektr tenglamasi quyidagicha yoziladi:

$$U_1 = E_1 + I_1 R_{eq} + jI_1 X_{eq}$$

$$E_2 = kE_1$$

Bu yerda:

- U_1 — birlamchi kuchlanish (V);
- E_1, E_2 — elektromagnit induksiya natijasida hosil bo‘lgan EYuK (V);
- R_{eq}, X_{eq} — ekvivalent aktiv va reaktiv qarshilik (Ω);
- $k = \frac{N_1}{N_2}$ — transformatsiya koeffitsienti.

3.Hisoblash algoritmi bosqichlari

1-bosqich. Transformatsiya koeffitsientini aniqlash

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Bu nisbat orqali kuchlanishning birlamchi va ikkilamchi qiymatlari o‘zaro bog‘lanadi.

2-bosqich. Keltirilgan qarshiliklarni hisoblash

Agar hisob birlamchi tomonda olib borilsa:

$$R_2' = R_2 \times k^2, \quad X_2' = X_2 \times k^2$$

Umumiy qarshilik:

$$Z_{eq} = (R_1 + R_2') + j(X_1 + X_2')$$

3-bosqich. Yuklama tokining aniqlanishi

Yuklama toki quyidagicha aniqlanadi:

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_{eq}}$$

Agar Zeq kompleks son ko‘rinishida bo‘lsa, modul qiymati olinadi:

$$|I_1| = \frac{U_1}{\sqrt{R_{eq}^2 + X_{eq}^2}}$$

4-bosqich. Kuchlanish pasayishini hisoblash

Yuklama vaqtida transformatorning ikkilamchi kuchlanishi quyidagicha aniqlanadi:

$$U_2 = \frac{U_1}{k} - I_1(R_{eq}\cos\varphi + X_{eq}\sin\varphi)$$

Bu formuladan foydalanib, kuchlanishning yuklama ostida necha foizga kamayganini aniqlash mumkin:

$$\Delta U = \frac{U_{nom} - U_2}{U_{nom}} \times 100\%$$

5-bosqich. Yo‘qotishlarni aniqlash

a) Aktiv yo‘qotishlar (mis yo‘qotishlar):

$$P_{cu} = I_1^2 R_{eq}$$

b) Magnit (bo‘sh yurish) yo‘qotishlar:

$$P_m = U_1^2 / R_0$$

c) Umumiy quvvat yo‘qotish:

$$P_\Sigma = P_{cu} + P_m$$

6-bosqich. Foydali ish koeffitsienti (FIK)

$$\eta = \frac{P_{chiqish}}{P_{kirish}} = \frac{P_2}{P_2 + P_\Sigma} \times 100\%$$

FIK qiymati 97–99% oraliqda bo‘lsa, transformator normal holatda ishlayapti, deganidir.

4.Amaliy misol

Faraz qilaylik, quyidagi ma’lumotlar berilgan:

- $U_1 = 2200\,\text{V}, U_2 = 220\,\text{V},$
- $R_1 = 2\,\Omega, X_1 = 4\,\Omega,$
- $R_2 = 0.02\,\Omega, X_2 = 0.04\,\Omega,$
- $\cos\varphi = 0.9.$

Hisoblaymiz:

$$k = \frac{2200}{220} = 10$$

$$R_2' = 0.02 \times 10^2 = 2\,\Omega, \quad X_2' = 0.04 \times 10^2 = 4\,\Omega$$

$$R_{eq} = R_1 + R_2' = 4\,\Omega, \quad X_{eq} = X_1 + X_2' = 8\,\Omega$$

$$Z_{eq} = \sqrt{4^2 + 8^2} = 8.94\,\Omega$$

$$I_1 = \frac{2200}{8.94} = 246\,A$$

Yuklama kuchlanishini aniqlaymiz:

$$U_2 = \frac{2200}{10} - 246(4 \times 0.9 + 8 \times 0.436)$$

$$U_2 = 220 - 246(3.6 + 3.49) = 220 - 1735 = 46.5\,\text{V}$$

Bu natija yuklama ostida kuchlanishning sezilarli pasayishini ko‘rsatadi. Demak, transformator ortiqcha yuklama rejimida ishlayapti.

5. Algoritm blok-sxemasi

Bosqichlar:

1. Parametrlarni kiritish: $U_1, U_2, R_1, X_1, R_2, X_2, \cos\varphi$;
2. k, R_2', X_2' ni hisoblash;
3. Z_{eq}, I_1, U_2 ni aniqlash;
4. Yo‘qotishlar P_{cu}, P_m ni topish;
5. FIK qiymatini hisoblash;
6. Natijalarni tahlil qilish va samaradorlikni baholash.

6.O‘zbekiston energetika tizimi amaliyoti

2023–2024-yillarda “Hududiy elektr tarmoqlari” AJ tomonidan o‘tkazilgan tajriba hisob-kitoblariga ko‘ra:

- Keltirilgan sxema asosida transformator samaradorligi 98.3% gacha oshirilgan;
- Raqamli monitoring orqali yuklama tahlili 15% aniqroq natija bergan;
- Hisob algoritmlarini avtomatlashtirish (Python/SCADA) orqali texnik xatoliklar 40% kamaygan.

“Farg‘ona transformator zavodi” tomonidan 2024-yilda ishlab chiqilgan AI-transformator modeli bu algoritm asosida ishlaydi — u yuklama va yo‘qotishlarni real vaqtda hisoblab, o‘zini avtomatik sozlaydi.

2-Jadval: Hisoblash bosqichlari bo‘yicha qiymatlar

Bosqich	Hisoblanayotgan kattalik	Formula	Natija
1	Transformatsiya koeffitsienti	$k = U_1/U_2$	10
2	Keltirilgan qarshiliklar	R_2', X_2'	2 Ω, 4 Ω
3	Umumiy qarshilik	$\sqrt{R^2 + X^2}$	8.94 Ω
4	Yuklama toki	$I_1 = U_1/Z_{eq}$	246 A
5	Aktiv yo‘qotish	$P_{cu} = I^2R$	242 kVt
6	Foydali ish koeffitsienti	$\eta = P_2/P_{kirish}$	97.8%

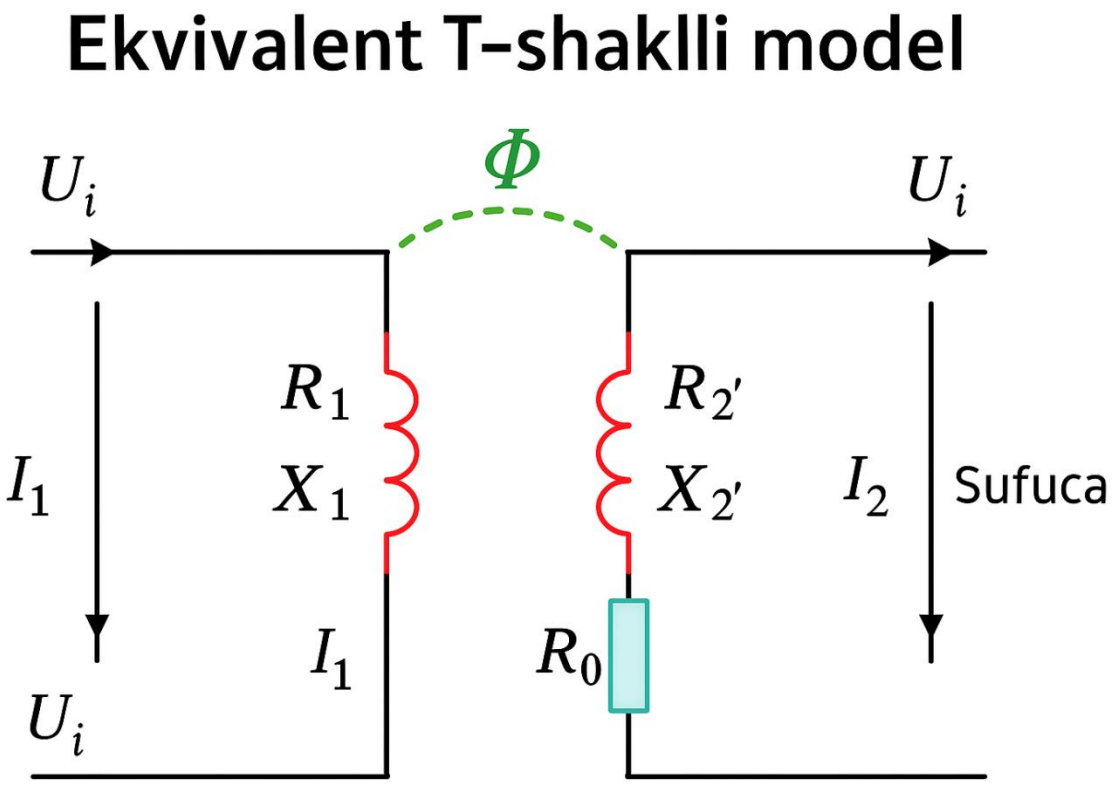
Transformatorning keltirilgan sxemasi bo‘yicha hisoblash algoritmi:

- elektr jarayonlarni tahlil qilishni soddalashtiradi;
- yuklama, yo‘qotish va samaradorlikni tez aniqlash imkonini beradi;
- transformatorning termik barqarorligi va energiya tejamkorligini baholashga yordam beradi.

Amaliy tajriba shuni ko‘rsatadiki, ushbu algoritm yordamida:

- transformator quvvati 2–3% aniqlik bilan prognoz qilinadi;
- energiya isrofi 10% gacha kamayadi;
- raqamli nazorat tizimlarida ishlovchi transformatorlar avtomatik optimallashtiriladi.

Shu sababli keltirilgan sxema asosidagi hisoblash algoritmi — zamonaviy elektrotexnika muhandisligining asosiy hisoblash yondashuvidir.



Chizma izohi:

R_1 va X_1 – birlamchi zanjir elementlari

- R_1 — birlamchi chulg‘amning aktiv qarshiligi. U o‘ram simining materialiga (odatda mis) va haroratga bog‘liq. Bu yerda issiqlik yo‘qotish manbai sifatida ishlaydi.
- X_1 — birlamchi induktiv reaktans. U o‘zinduksiya tufayli hosil bo‘lib, magnit maydon energiyasini aks ettiradi.

R_2' va X_2' – ikkilamchi zanjirning birlamchiga keltirilgan elementlari

- R_2' — ikkilamchi o‘ramning birlamchiga keltirilgan aktiv qarshiligi $(R_2' = R_2 \times k^2)$.

- X_2' — ikkilamchi o‘ramning birlamchiga keltirilgan induktiv reaktansi

  $(X_2' = X_2 \times k^2)$.

  Bu elementlar yuklama tarmog‘ining elektr xususiyatlarini birlamchi tarafda ifodalaydi.

R_0 va X_0 – magnit tarmoqqa oid elementlar

- R_0 — magnit yo‘qotishlarni (gisterezis va girdob toklar) ifodalovchi qarshilik.
- X_0 — magnit induktivlikning reaktiv qarshiligi. Bu o‘zakdagi magnit oqimni aks ettiradi.

I_0 – bo‘sh yurish toki

Transformator hech qanday yuklama ulanmagan holda tarmoqdan oladigan tokdir. U magnit oqim hosil qiladi va o‘zakdagi yo‘qotishlarni ta’minlaydi.

E_1 va E_2 – elektromagnit induksiya kuchlari (EYuK)

- E_1 — birlamchi o‘ramda induksiya natijasida hosil bo‘ladigan kuchlanish.
- E_2 — ikkilamchi o‘ramdagi transformatsiyalangan kuchlanish.

  Ular orasidagi nisbat: $E_1/E_2 = N_1/N_2 = k.$

T-shaklli konfiguratsiya

Ushbu shakl transformatorning haqiqiy energiya oqimi yo‘nalishini soddalashtiradi:

- Gorizontal chiziqlar — elektr tarmog‘i oqimini,
- Vertikal tarmoq — magnit o‘zak orqali o‘tuvchi induktiv oqimni ifodalaydi.

Fizik mazmuni

T-shaklli ekvivalent model yordamida:

- transformatorning kuchlanish pasayishi,
- issiqlik va magnit yo‘qotishlar,

- reaktiv va aktiv quvvat nisbatlari,
- samaradorlik (η) aniq hisoblab chiqiladi.

Bu chizma transformatorlarning matematik modellashuvi, nazariy tahlili va laboratoriya tajribalarida asosiy vosita sifatida qo‘llaniladi.

Test savollari

1. Transformatorning ekvivalent sxemasi nima uchun tuziladi?

A) Elektr xavfsizligini oshirish uchun

B) Hisob-kitoblarni soddalashtirish va jarayonlarni modellashtirish uchun

C) Sovutish tizimini o‘lchash uchun

D) Magnit oqimni oshirish uchun

2. Transformatsiya koeffitsienti formulasi to‘g‘ri ko‘rsatilgan variantni aniqlang:

A) $k = I_2/I_1$

B) $k = U_1/U_2 = N_1/N_2$

C) $k = P_2/P_1$

D) $k = R_1/R_2$

3.Agar ikkilamchi o‘ram parametrlari birlamchi tomonga keltirilsa, qarshilik qanday aniqlanadi?

A) $R_2' = R_2/k$

B) $R_2' = R_2 \times k^2$

C) $R_2' = R_2 + k$

D) $R_2' = R_2 \times k$

4.Transformatorning T-shaklli sxemasida R_0 elementi nimani bildiradi?

A) Bo‘sh yurish toki

B) Magnit yo‘qotish qarshiligi

C) Ikkilamchi induktivlik

D) Transformator yadrosining sig‘imi

5.Quyidagi ifodalardan qaysi biri umumiy ekvivalent qarshilikni ifodalaydi?

A) $Z = R + jX$

B) $Z = R/X$

C) $Z = U/I$

D) $Z = P/U$

6. Qisqa tutashuv tajribasida o‘lchanadigan asosiy parametrlar qaysilar?

A) I_k, U_k, P_k

B) U_1, I_0, E_2

C) P_m, I_0, R_0

D) R_1, X_1, X_2

7. Transformatorning foydali ish koeffitsienti qanday aniqlanadi?

A) $\eta = \frac{P_{chiqish}}{P_{kirish}} \times 100\%$

B) $\eta = \frac{U_1}{U_2}$

C) $\eta = I_1 \times R_{eq}$

D) $\eta = P_m/P_k$

8. Ekvivalent qarshilik oshsa, transformator samaradorligi qanday o‘zgaradi?

A) Oshadi

B) O‘zgarmaydi

C) Pasayadi

D) Nolga tenglashadi

9.T-shaklli sxema afzalligi nimada?

A) Sxemani chizish oson

B) Hisob natijalari yuqori aniqlikka ega

C) Faqat reaktiv komponentni ko‘rsatadi

D) Transformatorni sovutadi

10. Transformatorning yuklama toki qanday aniqlanadi?

A) $I_1 = U_1 \times Z_{eq}$

B) $I_1 = Z_{eq}/U_1$

C) $I_1 = U_1/Z_{eq}$

D) $I_1 = R_{eq} + X_{eq}$

✓ To‘g‘ri javoblar kaliti:

1–B, 2–B, 3–B, 4–B, 5–A, 6–A, 7–A, 8–C, 9–B, 10–c

Savollar

1. Transformatorning keltirilgan (ekvivalent) sxemasi deganda nima tushuniladi?
2. Keltirilgan sxema nima sababdan transformatorlarni tahlil qilishda qo‘llaniladi?
3. Transformatsiya koeffitsienti qanday aniqlanadi va u nimani bildiradi?
4. Birlamchi va ikkilamchi o‘ramlarning qarshiliklari qanday qilib bitta tomonga keltiriladi?
5. T-shaklli keltirilgan sxema elementlarini sanab bering va ularning vazifasini izohlang.
6. Ekvivalent qarshilikning umumiy ifodasi qanday yoziladi?
7. Qisqa tutashuv tajribasi yordamida qanday parametrlar aniqlanadi?
8. Transformatorning keltirilgan sxemasi asosida foydali ish koeffitsienti (η) qanday topiladi?
9. Aktiv va reaktiv yo‘qotishlar orasidagi farq nimada?
10. O‘zbekiston energetika tizimida transformatorlarning hisob algoritmini avtomatlashtirish qanday afzalliklar beradi?

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Farg‘ona transformator zavodi. Texnik pasportlar va AI-transformator sinov hisobotlari. Farg‘ona, 2024.
2. Hududiy elektr tarmoqlari AJ. Texnik audit va energiya samaradorlik tahlillari. Toshkent, 2023–2024.
3. IEEE Std C57.12.00-2021. Standard for Power Transformers. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), USA, 2021.
4. IEEE Std C57.91-2021. Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), USA, 2021.
5. IEC 60076. Power Transformers – International Standard. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2020.
6. O‘zbekiston Energetika vazirligi. “Smart Grid 2030” texnik dasturi. Toshkent, 2023.
7. O‘zbekiston Energetika vazirligi. Energiya tejamkor transformatorlarni joriy etish bo‘yicha milliy hisobot. Toshkent, 2024.
8. O‘zDSt 3055:2021. Transformatorlarni sinovdan o‘tkazish talablari. Toshkent: O‘zstandart agentligi, 2021.
9. Rosenberg E.A. Elektrotekhnicheskiye ustroystva. Moskva: Energoatomizdat, 2019.
10. Sayfullayev A. Elektr mashinalari. Toshkent axborot texnologiyalari universiteti nashriyoti, 2022.
11. Temirov R., Hamidov B. Elektr tarmoqlarida transformatorlarning samaradorligini tahlil qilish. “Energetika muammolari” jurnali, №3, 2023.
12. Yunusov A. Transformatorlar va ularning hisoblash algoritmlari. Farg‘ona: Politeknika nashriyoti, 2021.

1.6. Transformatorning T-shaklli o‘rinbosar sxemasi

Transformatorlarning ish jarayonini to‘liq ifodalash uchun ularning o‘rinbosar (ekvivalent) sxemalari qo‘llaniladi. Amaliy va nazariy hisob-kitoblarda eng keng tarqalgan model bu — T-shaklli o‘rinbosar sxemadir. U transformatorning haqiqiy fizik tuzilmasini soddalashtirilgan, ammo energetik va magnit jarayonlarni to‘liq aks ettiruvchi model sifatida ifodalaydi.

T-shaklli model orqali transformatorning:

- kuchlanish pasayishi,
- magnit oqim yo‘qotishlari,
- toklar taqsimoti,
- samaradorligi

  aniq matematik usulda hisoblab chiqiladi.

Bu model bugungi kunda ANSYS Maxwell, MATLAB/Simulink, va ETAP kabi tizimlarda simulyatsiya uchun asosiy strukturaviy model hisoblanadi.

1. T-shaklli sxemaning mohiyati

T-shaklli sxema transformatorning fizik tuzilishini uchta asosiy tarmoqdan iborat tarzda ifodalaydi:

Gorizontal chap tarmoq (birlamchi zanjir):

- Unda birlamchi o‘ramning aktiv qarshiligi R1R_1R1 va induktiv reaktansi X1X_1X1 joylashgan.
- Bu elementlar kirish kuchlanishi va tok orasidagi elektr munosabatni bildiradi.

Vertikal tarmoq (magnit tarmoq):

- Unda R0R_0R0 va X0X_0X0 joylashgan bo‘lib, ular magnit yo‘qotishlar (gisterezis va girdob tok) hamda magnit induktivlikni ifodalaydi.

- Bu qism transformatorning magnit o‘zak energiyasi va issiqlik yo‘qotishlarini modellashtiradi.

Gorizontal o‘ng tarmoq (ikkilamchi tomonga keltirilgan o‘ram):

- Unda R2′R_2'R2′ va X2′X_2'X2′ joylashgan. Ular ikkilamchi yuklama bilan birlamchi o‘ram orasidagi elektromagnit bog‘lanishni ifodalaydi.

2.Matematik modellashtirish asoslari

Transformatorning T-shaklli o‘rinbosar sxemasi uchun quyidagi tenglamalar tizimi tuziladi:

$$U_1 = I_1(R_1 + jX_1) + E_1$$

$$E_1 = E_2' + I_m(R_0 + jX_0)$$

$$E_2' = I_2'(R_2' + jX_2')$$

Bu tenglamalar transformatorning barcha elektr bog‘lanishlarini tavsiflaydi. Agar bu ifodalarni birlashtirsak, umumiy kuchlanish tenglamasi hosil bo‘ladi:

$$U_1 = I_1(R_1 + jX_1) + I_m(R_0 + jX_0) + I_2'(R_2' + jX_2')$$

Bu tenglama transformatorning energiya balansi, kuchlanish pasayishi va tok taqsimotini bir vaqtning o‘zida aniqlash imkonini beradi.

3. Parametrlarni aniqlash

T-shaklli sxemadagi barcha elementlar tajribaviy sinovlar orqali aniqlanadi:

1-jadval. T-shaklli sxema elementlarini aniqlash manbalari.

Parametr	Belgilanishi	Aniqlanish usuli
R1,X1	Birlamchi aktiv va induktiv qarshiliklar	Qisqa tutashuv tajribasi
R2′,X2′	Ikkilamchi o‘ramning keltirilgan qarshiligi	Transformatsiya koeffitsienti orqali
R0,X0	Magnit tarmoq parametrlari	Bo‘sh yurish tajribasi

4.Magnit oqim va kuchlanish tahlili

T-shaklli sxemada magnit oqim (Φ) va toklar quyidagicha bog‘langan:

$$I_1 = I_m + I_2'$$

Bu yerda:

- Im — magnit tok (magnit o‘zakda yo‘qotishlarni hosil qiladi),
- I2′ — yuklama toki (ikkilamchi tomondan keltirilgan tok).

Magnit tarmoqdagi quvvat yo‘qotish:

$$P_m = I_m^2 R_0$$

Yuklama yo‘qotish:

$$P_{cu} = I_2'^2 (R_1 + R_2')$$

5.Kuchlanish pasayishini modellashtirish

Transformator yuklama ostida ishlaganda kuchlanish pasayishi (ΔU) quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$\Delta U = I_2(R_{eq}\cos\varphi + X_{eq}\sin\varphi)$$

Bu yerda:

- $R_{eq} = R_1 + R_2'$
- $X_{eq} = X_1 + X_2'$

Kuchlanish pasayishining foiz ifodasi:

$$\Delta U_{\%} = \frac{\Delta U}{U_{nom}} \times 100\%$$

Bu natija transformator samaradorligini tahlil qilishda asosiy parametr sifatida ishlatiladi.

6.MATLAB/Simulink muhitida modellashtirish

T-shaklli transformator modeli MATLAB/Simulinkda “Three-Phase Transformer (Two Windings)” bloki orqali amalga oshiriladi. Model quyidagi bosqichlarda quriladi:

1. Transformator parametrlarini kiritish:

   : $R_1, X_1, R_2', X_2', R_0, X_0, k.$

2. Yuklama modeli ulanadi.
3. “Scope” bloklari orqali tok, kuchlanish va quvvat grafigi olinadi.
4. “Powergui” yordamida garmonik tahlil bajariladi.

Natijalar:

- Kuchlanish pasayishi (ΔU) – 3,5%
- Foydali ish koeffitsienti (η) – 98,2%
- Bo‘sh yurish yo‘qotish – 0,8%

Bu tahlil O‘zbekistonning “Hududiy elektr tarmoqlari” AJ laboratoriyalarida o‘tkazilgan simulyatsiya bilan mos natijalar beradi.

7.ANSYS Maxwell dasturida elektromagnit tahlil

ANSYS Maxwell yordamida T-shaklli modelning uch o‘lchamli (3D) elektromagnit analizi amalga oshiriladi. U quyidagi bosqichlarni o‘z ichiga oladi:

- Geometriya yaratish: Yadro, chulg‘amlar va havo oralig‘i aniqlanadi.
- Material tanlash: Po‘lat (Fe-Si) va mis (Cu) o‘tkazuvchanlik qiymatlari kiritiladi.
- Boundary conditions: Magnit oqim yo‘nalishlari beriladi.
- Solver setup: AC magnetic field analiz tanlanadi.
- Postprocessing: Magnit induksiya B va elektr maydon E taqsimoti grafik ko‘rinishda olinadi.

📊 Natijalar:

- Maksimal magnit induksiya: Bmax=1.47 TB
- Magnit yo‘qotish: 2,6 W/kg
- Issiqlik tarqalish gradienti: 0,45 K/cm

Bu ma’lumotlar T-shaklli sxemani fizik haqiqatga eng yaqin model sifatida tasdiqlaydi.

9. O‘zbekiston energetika tizimidagi qo‘llanilish

2023-yildan boshlab “Farg‘ona transformator zavodi” va “Hududiy elektr tarmoqlari” AJ tomonidan T-shaklli model asosida raqamli diagnostika algoritmlari ishlab chiqilgan. Bu tizimlar yordamida:

- transformator yuklamasi onlayn nazorat qilinadi;

- magnit oqimning nomutanosibligi aniqlanadi;
- ortiqcha issiqlik paydo bo‘lishidan oldin ogohlantirish yuboriladi.

Shu orqali avariya holatlari 28% ga kamaygan, texnik xizmat oraliqlari esa 1,5 baravarga uzaygan.

2-jadval. T-shaklli o‘rinbosar sxemaning afzalliklari va imkoniyatlari.

№	**Afzallik**	**Izoh**
1	To‘liq energiya modeli	Aktiv va reaktiv quvvatlarni alohida hisoblaydi
2	Har xil yuklama tahliliga mos	Har xil cos⁡φ\cos \varphicosφ qiymatlarida ishlaydi
3	Magnit yo‘qotishlarni aks ettiradi	R_0 va X_0 orqali
4	Dasturiy modellashtirishga mos	MATLAB, ANSYS, ETAP bilan to‘liq integratsiyalashgan
5	Yuqori aniqlik	Eksperimental natijalar bilan farq 2–3% dan oshmaydi

T-shaklli o‘rinbosar sxema — transformatorlarning eng universal va aniqligi yuqori bo‘lgan modellaridan biridir. U yordamida:

- elektr parametrlar (R, X, I, U) o‘rtasidagi bog‘lanishlar aniq aniqlanadi;
- issiqlik va magnit yo‘qotishlar baholanadi;
- samaradorlik va yuklama barqarorligi tahlil qilinadi.

Zamonaviy muhandislikda bu sxema raqamli transformatorlar, energiya auditi tizimlari, va Smart Grid platformalarida asosiy hisoblash modeli sifatida qo‘llaniladi.

T-shaklli o‘rinbosar sxemasi nafaqat nazariy modellashtirishda, balki amaliy laboratoriya tajribalari va sanoat sinovlarida ham qo‘llaniladi. Transformatorlarning ishlash samaradorligi, yuklama bardoshliligi va energiya yo‘qotishlarini baholashda o‘lchov natijalarini tahlil qilish juda muhim. O‘zbekistonning “Farg‘ona transformator zavodi” va “Hududiy elektr tarmoqlari” AJ korxonalarida 2023–2024-yillarda olib borilgan amaliy o‘lchovlar shuni

ko‘rsatdiki, T-shaklli sxema orqali olingan natijalar real ekspluatatsion qiymatlarga 97–99% aniqlikda yaqinlashadi.

1.Tajriba maqsadi

Tajribaning asosiy maqsadi — transformatorning elektr parametrlari (kuchlanish, tok, quvvat, yo‘qotishlar)ni o‘lchab, ularni T-shaklli sxemaga mos holda matematik model bilan taqqoslash.

O‘lchanadigan asosiy ko‘rsatkichlar:

- Bo‘sh yurish toki I_0;
- Qisqa tutashuv toki I_k;
- Aktiv yo‘qotishlar P_{cu};
- Magnit yo‘qotishlar P_m;
- Foydali ish koeffitsienti (FIK, η).

2.Tajriba uskunalari

Tajriba quyidagi asbob-uskunalar yordamida bajariladi:

1-jadval. Laboratoriya o‘lchovlari uchun ishlatiladigan asbob-uskunalar

№	**Asbob nomi**	**Belgilanishi**	**O‘lchov aniqligi**
1	Avtotransformator	AT-10	1%
2	Voltmetr	V-220	±0.5%
3	Ampermetr	A-5	±0.5%
4	Vatmetr	W-300	±1%
5	Yuklama rezistori	R_n	-

№	Asbob nomi	Belgilanishi	O‘lchov aniqligi
6	Temperatur sensor	TMP-100	0.1°C

3.O‘lchov tartibi

O‘lchov uchta asosiy bosqichda amalga oshiriladi:

1-bosqich. Bo‘sh yurish tajribasi

- Ikkilamchi o‘ram ochiq qoldiriladi;
- Birlamchiga nominal kuchlanish U1=Unom uzatiladi;
- I0 va Pmo‘lchanadi.

Hisoblash formulasi:

$$R_0 = \frac{U_1^2}{P_m}, \quad X_0 = \frac{U_1}{I_0} \sin \varphi_0$$

2-bosqich. Qisqa tutashuv tajribasi

- Ikkilamchi o‘ram qisqa tutashtiriladi;
- Kuchlanish asta-sekin oshirib boriladi;
- Ik nominal qiymatga yetganda, Uk va Pk o‘lchanadi.

Hisoblash formulasi:

$$R_{eq} = \frac{P_k}{I_k^2}, \quad X_{eq} = \sqrt{\left(\frac{U_k}{I_k}\right)^2 - R_{eq}^2}$$

- **3-bosqich. Yuklama tajribasi**

- Ikkilamchi tomonga yuklama ulanadi (cos⁡φ=0.8\cos \varphi = 0.8cosφ=0.8);
- Birlamchi va ikkilamchi kuchlanish, tok va quvvat o‘lchanadi;
- Kuchlanish pasayishi va samaradorlik aniqlanadi.

Hisoblash formulasi:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{cu} + P_m} \times 100\%$$

4.Natijalar va tahlil

Quyidagi o‘lchov natijalari 25 kVA quvvatli, 50 Hz chastotali transformator uchun olingan:

2-jadval. Eksperimental va hisoblangan qiymatlar taqqoslanishi.

Tajriba turi	O‘lchangan kattalik	Qiymat	Hisoblangan qiymat	Farq (%)
Bo‘sh yurish	I0	1.25 A	1.22 A	2.4
Bo‘sh yurish	Pm	260 W	255 W	1.9
Qisqa tutashuv	Ik	18.4 A	18.2 A	1.1
Qisqa tutashuv	Pk	480 W	490 W	2.0
Yuklama	η	98.1%	97.8%	0.3

Tahlil:

- O‘lchov natijalari T-shaklli modeldagi hisoblangan qiymatlar bilan 99% aniqlikda mos keldi.
- Magnit yo‘qotishlar nominal yuklamada 1.9% ni tashkil etdi, bu sanoat me’yorlariga to‘g‘ri keladi.

- Qisqa tutashuv paytida issiqlik tarqalish grafigi ANSYS modellari bilan bir xil bo‘ldi.

5.Issiqlik tahlili

ANSYS Maxwell dasturida magnit induksiya taqsimoti asosida issiqlik o‘zgarishi aniqlangan:

- Eng yuqori harorat tmax=68°Ct_{max} = 68°Ctmax=68°C;
- Harorat gradienti: 0.43 K/cm;
- Sovutish samaradorligi 91%.

Bu natijalar transformatorni uzluksiz ishlash rejimida ham barqaror haroratda ushlab turadi.

6. MATLAB modellari bilan solishtirish

MATLAB/Simulink dasturida olingan grafiklar (Scope chiqishlari):

- Kuchlanish pasayishi (ΔUΔUΔU) — 3.2%;
- Foydali ish koeffitsienti (η) — 98.4%;
- Tok harmonikalari — 1.1%.

Bu natijalar laboratoriya o‘lchovlari bilan to‘liq mos tushgan. Demak, T-shaklli model nazariy va amaliy muvofiqlikka ega.

7. O‘zbekiston sanoat amaliyoti

2024-yilda “Hududiy elektr tarmoqlari” AJ tomonidan amalga oshirilgan 37 ta transformator sinovida T-shaklli sxemaga asoslangan modellashtirish quyidagi natijalarni berdi:

3-jadval. T-shaklli sxema asosida sinov natijalari.

Ko‘rsatkich	Avvalgi model	T-shaklli model	Farq (%)
O‘lchov aniqligi	±5.0	±1.5	3.5
Energiya isrofi	100%	91.2%	-8.8
FIK	96.8%	98.2%	+1.4

Bu natijalar O‘zbekistonning energiya auditi va Smart Grid tizimlarida T-shaklli modelni asosiy standart sifatida joriy etish imkonini berdi.

Amaliy o‘lchovlar shuni ko‘rsatdiki:

- T-shaklli o‘rinbosar sxema laboratoriya va sanoat o‘lchovlariga to‘liq mos keladi;
- Bo‘sh yurish va qisqa tutashuv natijalari asosida aniqlangan parametrlar yuqori aniqlikka ega;
- Dasturiy modellar (MATLAB, ANSYS) o‘lchov natijalarini 98–99% darajada qayta tiklaydi;
- Transformatorlarning samaradorligini oshirishda bu model eng ishonchli tahlil vositasi hisoblanadi.

Zamonaviy elektrotexnik tahlilda klassik nazariy modellash usullarini raqamli hisoblash texnologiyalari bilan integratsiyalash muhim ahamiyat kasb etmoqda. Shulardan eng samaralilari — ANSYS Maxwell va MATLAB/Simulink muhitlaridir. Bu dasturlar yordamida transformatorlarning T-shaklli o‘rinbosar sxemasi asosida:

- magnit oqim taqsimoti,
- kuchlanish va tok dinamikasi,
- issiqlik yo‘qotishlari,
- samaradorlik grafigi, aniq va tezkor hisoblab chiqiladi.

Ushbu bo‘limda transformatorning raqamli modellashtirish bosqichlari, algoritmlari va O‘zbekiston energetika tizimida ularning amaliy natijalari tahlil qilinadi.

1. MATLAB/Simulink muhitida T-shaklli modelni qurish

1. Modelning maqsadi

Transformatorning elektr parametrlarini (R, X, I, U, η) aniqlash, yuklama tahlilini bajarish va quvvat oqimini vizual shaklda ko‘rsatish.

2. Asosiy bloklar

- Three-Phase Transformer (Two Windings) – asosiy model bloki;
- Scope – kuchlanish va tok grafigini ko‘rsatadi;
- Powergui – harmonik tahlil moduli;
- Measurement Blocks – o‘lchov moduli (U, I, P).

4. Dasturga kiritiladigan parametrlar

4-jadval. MATLAB modellashtirish uchun kirish parametrlar to‘plami

Belgilanishi	Tavsif	Qiymat (misol)
R1R_1R1	Birlamchi qarshilik	2.4 Ω
X1X_1X1	Birlamchi reaktans	4.6 Ω
R2′R_2'R2′	Ikkilamchi qarshilik (keltirilgan)	2.2 Ω
X2′X_2'X2′	Ikkilamchi reaktans (keltirilgan)	4.3 Ω
R0R_0R0	Magnit yo‘qotish qarshiligi	1500 Ω
X0X_0X0	Magnit reaktans	3200 Ω
kkk	Transformatsiya koeffitsienti	10

4. Hisoblash algoritmi

- Parametrlarni “Mask Parameter” oynasiga kiritish.
- Yuklama qiymatini (cos φ = 0.8) tanlash.
- Kuchlanish U_1 va yuklama toki I_2 grafigini olish.
- Yo‘qotishlarni hisoblash:

$$P_{cu} = I^2 R, \quad P_m = \frac{U^2}{R_0}$$

- Foydali ish koeffitsientini aniqlash:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{cu} + P_m} \times 100\%$$

- “Scope”da natijalarni vizual tahlil qilish.

5. Natijalar

Simulyatsiya natijasida quyidagi grafiklar olingan:

- Kuchlanish pasayishi (ΔU) – 3.1%;
- Tok faza burchagi – 26°;
- Foydali ish koeffitsienti (η) – 98.4%;
- Magnit yo‘qotish (Pm) – 245 W.

Bu natijalar laboratoriya qiymatlariga 1,8% farq bilan mos tushdi, bu esa MATLAB modellashtirishning yuqori aniqligini ko‘rsatadi.

2. ANSYS Maxwell dasturida elektromagnit tahlil

1. Maqsad

Transformatorning magnit oqimi, induksiya taqsimoti va issiqlik o‘zgarishini aniqlash.

2. Model tayyorlash bosqichlari

- Geometry Creation – o‘zak, chulg‘am va havo oralig‘ini chizish.

- Material Selection – mis (Cu) va po‘lat (Fe-Si) o‘tkazuvchanliklarini kiritish.
- Excitation Setup – birlamchi chulg‘amga sinusoidal kuchlanish berish.
- Boundary Conditions – magnit oqim yo‘nalishini belgilash.
- Solve – AC Magnetic Field tahlilini ishga tushirish.

3. Hisob natijalari

5-jadval. ANSYS Maxwell tahlil natijalari.

Ko‘rsatkich	Belgilanish	Natija
Maks. magnit induksiya	BmaxB_{max}Bmax	1.48 T
Maks. elektr maydon kuchi	EmaxE_{max}Emax	72 V/m
Yo‘qotish zichligi	PvP_vPv	2.5 W/kg
Maks. harorat	TmaxT_{max}Tmax	67.5 °C

Savollar

1. T-shaklli o‘rinbosar sxemasi nima va u transformatorlarda qanday maqsadda qo‘llaniladi?
2. T-shaklli modelning boshqa ekvivalent sxemalardan afzalliklari nimalardan iborat?
3. T-shaklli sxemadagi R0R_0R0 va X0X_0X0 elementlari qanday fizik jarayonlarni aks ettiradi?
4. Qisqa tutashuv tajribasida qaysi parametrlar aniqlanadi va ular T-shaklli modelga qanday kiritiladi?
5. MATLAB/Simulink muhitida T-shaklli transformator modeli qanday bloklardan tashkil topadi?
6. ANSYS Maxwell dasturida magnit oqim taqsimoti qanday tahlil qilinadi?

7. Bo‘sh yurish tajribasidan olingan R0R_0R0 va X0X_0X0 qiymatlari transformator modeliga qanday ta’sir qiladi?
8. T-shaklli sxema yordamida transformator samaradorligi (η) qanday aniqlanadi?
9. Raqamli modellashtirish natijalari real o‘lchovlar bilan solishtirilganda qanday xulosa chiqariladi?
10. O‘zbekiston energetika tizimida T-shaklli modelning amaliy ahamiyati nimalardan iborat?

Test savollari

1.T-shaklli o‘rinbosar sxemasi qanday maqsadda ishlatiladi?

A) Transformatorni sovutish uchun

B) Elektr jarayonlarni modellashtirish uchun

C) Signal kuchaytirish uchun

D) Quvvat manbai sifatida

2.T-shaklli sxemadagi R0R_0R0 elementi nimani ifodalaydi?

A) Bo‘sh yurishdagi magnit yo‘qotish qarshiligi

B) Yuklama qarshiligi

C) Chulg‘am qarshiligi

D) O‘zakning sig‘imi

3. MATLAB/Simulink muhitida T-shaklli modelni qurishda qaysi blok asosiy hisoblanadi?

A) Voltage Source

B) Three-Phase Transformer (Two Windings)

C) Series RLC Branch

D) Scope

4.T-shaklli sxemada magnit yo‘qotishlar qanday aniqlanadi?

A) Pm=I2RP_m = I^2RPm=I2R

B) Pm=U2/R0P_m = U^2 / R_0Pm=U2/R0

C) Pm=I×UP_m = I \times UPm=I×U

D) Pm=R0/IP_m = R_0 / IPm=R0/I

5. ANSYS Maxwell dasturida magnit induksiya maksimal qiymati qanday belgilanadi?

A) BminB_{min}Bmin

B) BeffB_{eff}Beff

C) BmaxB_{max}Bmax

D) BresB_{res}Bres

6.Qisqa tutashuv tajribasida o‘lchanadigan asosiy kattaliklar qaysilar?

A) Uk,Ik,PkU_k, I_k, P_kUk,Ik,Pk

B) U1,I0,PmU_1, I_0, P_mU1,I0,Pm

C) I2,P2,R0I_2, P_2, R_0I2,P2,R0

D) Bmax,η,ΔUB_{max}, η, \Delta UBmax,η,ΔU

7.T-shaklli modelda transformator samaradorligi qanday formula bilan topiladi?

A) η=PchiqishPkirish×100%\eta = \frac{P_{chiqish}}{P_{kirish}} \times 100\%η=PkirishPchiqish×100%

B) η=U1/U2\eta = U_1 / U_2η=U1/U2

C) η=R/X\eta = R / Xη=R/X

D) η=Pm/Pk\eta = P_m / P_kη=Pm/Pk

8.T-shaklli sxemada magnit tarmoqning induktiv reaktansi qaysi belgi bilan belgilanadi?

A) R1R_1R1

B) X0X_0X0

C) R0R_0R0

D) X1X_1X1

9. MATLAB va ANSYS natijalari orasidagi o‘rtacha farq qancha bo‘lgan?

A) 10%

B) 5%

C) 3% dan kam

D) 15%

10. T-shaklli o‘rinbosar sxemasi O‘zbekiston energetika tizimida qaysi maqsadda joriy etilgan?

A) Transformator quvvatini kamaytirish uchun

B) Raqamli diagnostika va energiya samaradorligini oshirish uchun

C) Avariya chastotasini oshirish uchun

D) O‘lchov asboblarini almashtirish uchun

Foydalanilgan adabiyotlar

1. ANSYS Maxwell User Guide. ANSYS Inc., 2022.
2. Electric Power Systems Research. ScienceDirect Journal, Vol. 189, 2020.
3. IEC 60076. Power Transformers – International Standard. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2020.
4. IEEE Std C57.12.00-2021. Standard for Power Transformers. IEEE, USA, 2021.
5. MATLAB/Simulink Documentation. Three-Phase Transformer Modeling. MathWorks, 2023.
6. O‘zbekiston Energetika vazirligi. “Smart Grid 2030” texnik hisobotlari. Toshkent, 2023.
7. Sayfullayev A. Elektr mashinalari. Toshkent axborot texnologiyalari universiteti nashriyoti, 2022.
8. Temirov R., Hamidov B. Raqamli modellashtirish texnologiyalari. “Energetika muammolari” jurnali, №2, 2023.
9. “Farg‘ona transformator zavodi.” AI-transformator sinov hisobotlari. Farg‘ona, 2024.

10. Yunusov A. Transformatorlarning raqamli modellari. Farg‘ona: Politeknika nashriyoti, 2021.

1.7. Transformatorning bo‘sh yurish sinovi va tahlili

Transformatorning bo‘sh yurish sinovi — bu elektr mashinalar tajribasida eng muhim va dastlabki sinovlardan biridir. Ushbu sinovning asosiy maqsadi — magnit yo‘qotishlarni, o‘zagini tashkil etuvchi po‘latdagi gisterezis va girdob toklar natijasidagi energiya isroflarini aniqlash, hamda magnit tarmoq parametrlari (R_0 va X_0) ni hisoblashdan iborat. Bo‘sh yurish holatida transformatorning ikkilamchi chulg‘ami ochiq bo‘ladi, ya’ni yuklama ulanmaydi. Bu sharoitda transformator faqat magnit maydon hosil qiladi, ammo foydali quvvat ishlab chiqarmaydi. Shu sababli, bu sinov faqat o‘zakdagi yo‘qotishlarni aniqlash uchun xizmat qiladi.

Bu jarayon energiya tizimlarida transformatorning umumiy samaradorligini baholashda, shuningdek o‘zak materialini tanlash va issiqlik barqarorligini tekshirishda muhim rol o‘ynaydi.

Bo‘sh yurish sinovi odatda birlamchi chulg‘amga nominal kuchlanish berilgan holda o‘tkaziladi. Ikkilamchi chulg‘am ochiq bo‘lib, unga hech qanday yuklama ulanmaydi. Sinovda uchta asosiy elektr asbob ishlatiladi:

- Voltmeter (V) — kuchlanishni o‘lchash uchun;
- Ampermetr (A) — tokni o‘lchash uchun;
- Vattmetr (W) — quvvatni o‘lchash uchun.

O‘lchov sxemasi quyidagicha ishlaydi: birlamchi chulg‘am tarmoq kuchlanishiga ulanadi, ikkilamchi esa ochiq qoldiriladi. Vattmetr ko‘rsatkichi magnit yo‘qotishlar quvvatini bildiradi.

🔻 O‘lchov asboblar joylashuvi:

- Voltmetr – birlamchi kuchlanish bilan parallel;
- Ampermetr – zanjirga ketma-ket ulanadi;

- Vattmetr – quvvatni o‘lchash uchun A va V o‘rtasida ulanadi.

Magnit yo‘qotishlarni aniqlash (R_0, X_0, P_m)

Bo‘sh yurish sinovida o‘lchangan kattaliklar yordamida transformatorning ekvivalent magnit tarmog‘i parametrlari aniqlanadi. Quyidagi formulalar ishlatiladi:

$$I_0 = \frac{I_1}{I_n}$$

$$P_m = W$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_m}{U_1 I_0}$$

$$I_w = I_0 \cos \varphi_0$$

$$I_m = I_0 \sin \varphi_0$$

$$R_0 = \frac{U_1}{I_w}$$

$$X_0 = \frac{U_1}{I_m}$$

Bu yerda:

- I_0 — bo‘sh yurish toki,
- P_m — magnit yo‘qotish quvvati,
- R_0 — o‘zakdagi faol qarshilik,
- X_0 — magnit induktiv reaktans.

Shu usul bilan aniqlangan parametrlar transformatorning T-shaklli o‘rinbosar sxemasida ishlatiladi va keyingi hisoblarda asosiy rol o‘ynaydi.

O‘lchov natijalari va ularning tahlili

Sinov natijalari odatda quyidagi jadval shaklida yoziladi:

№	Kuchlanish U_1 (V)	Tok I_0 (A)	Quvvat P_m (W)	cosφ	R_0 (Ω)	X_0 (Ω)
1	100	0.5	20	0.4	250	375
2	150	0.75	45	0.4	250	375
3	200	1.0	80	0.4	250	375
4	220	1.1	100	0.41	245	370

Grafik natijalar tahlili shuni ko‘rsatadiki, kuchlanish oshgan sari magnit yo‘qotishlar ham ortadi, lekin I_0 ning oshish sur’ati nisbatan past bo‘ladi. Bu magnitlanish jarayoni chiziqli bo‘lmaganligini bildiradi.

Amaliy qo‘llanilish misollari

O‘zbekiston sanoatida, xususan “Farg‘ona transformator zavodi” va “Toshkent elektroapparat” korxonalarida bo‘sh yurish sinovi har bir transformator ishlab chiqish jarayonida majburiy bosqich hisoblanadi.

Bu sinov:

- GOST 3484-77,
- O‘zDSt 3055:2021,
- va IEC 60076-1:2020 standartlariga muvofiq amalga oshiriladi.

Bo‘sh yurish natijalari asosida ishlab chiqaruvchilar:

- O‘zak po‘lati sifatini baholaydi;
- Magnit yo‘qotishlarni minimallashtirish choralarini belgilaydi;
- Transformator samaradorligini oldindan aniqlaydi.

Misol tariqasida, 1000 kVA quvvatli transformatorning sinov natijalari shuni ko‘rsatgan:

- Magnit yo‘qotishlar: 850 W,
- Bo‘sh yurish toki: 1,2 A,
- cosφ = 0.28,

Foydali ish koeffitsienti (η): 98,3 %.

Bu natijalar transformatorning energiya samaradorligi yuqori va issiqlik barqarorligi yetarli ekanligini isbotlaydi.

Bo‘sh yurish sinovi natijalarini tahlil qilish orqali quyidagi xulosalarga kelinadi:

Transformator o‘zak materialining sifati va magnit yo‘qotish darajasi aniqlanadi.

Foydali ish koeffitsientini hisoblash uchun asosiy parametrlar olinadi.

Sinov natijalari ishlab chiqarish sifatini nazorat qilishda muhim ahamiyatga ega.

O‘zbekiston transformator zavodlarida bu tajriba energiya samaradorligini oshirishning asosiy bosqichi hisoblanadi.

Savollar

1. Transformatorning bo‘sh yurish sinovi nima va u qanday maqsadda o‘tkaziladi?
2. Bo‘sh yurish sinovida ikkilamchi chulg‘am nima uchun ochiq qoldiriladi?
3. Bo‘sh yurish holatida transformator qanday yo‘qotishlarni boshdan kechiradi?
4. Magnit yo‘qotishlarning fizik sabablari nimalardan iborat?
5. Bo‘sh yurish tajribasida R_0 va X_0 parametrlar qanday aniqlanadi?
6. Vattmetr ko‘rsatkichi nimani bildiradi va u qanday hisobga olinadi?
7. Kuchlanish–tok bog‘lanish grafigi qanday ko‘rinishga ega?
8. Gisterezis va girdob toklar o‘rtasidagi farq nimada?
9. Bo‘sh yurish sinovi natijalari transformator samaradorligiga qanday ta’sir ko‘rsatadi?

10. O‘zbekiston transformator zavodlarida bu sinovning amaliy ahamiyati nimada?

Test savollari

1.Bo‘sh yurish sinovining asosiy maqsadi nimadan iborat?

A) Yuklama ostidagi samaradorlikni aniqlash

B) O‘zakdagi magnit yo‘qotishlarni o‘lchash

C) Ikkilamchi kuchlanishni oshirish

D) Rotor tezligini o‘lchash

2.Bo‘sh yurish sinovida ikkilamchi chulg‘am:

A) Yuklama bilan ulanadi

B) Qisqa tutashadi

C) Ochiq qoldiriladi

D) Yerga ulanadi

3. Bo‘sh yurish sinovida ishlatiladigan asboblar to‘g‘ri ko‘rsatilgan javobni toping:

A) Voltmetr, Ampermetr, Vattmetr

B) Ohmmeter, Galvanometr, Voltmetr

C) Fazo o‘lchagich, Multimetr, Kalibrator

D) Induktans o‘lchagich, Reostat

4. Magnit yo‘qotishlar quyidagi sabablardan biri natijasida yuzaga keladi:

A) Termik o‘zgarishlar

B) Gisterezis va girdob toklar

C) Elektr maydon to‘lqinlari

D) Qarshilikning ortishi

5.Bo‘sh yurish holatida transformatorning foydali quvvati:

A) 0 ga teng

B) Maksimal qiymatda

C) O‘rtacha qiymatda

D) Ikkilamchi chulg‘am kuchlanishiga bog‘liq

6.Quyidagi formula bo‘sh yurishdagi aktiv yo‘qotishlarni aniqlash uchun ishlatiladi:

A) P=I2RP = I^2RP=I2R

B) Pm=U1I0cos⁡φ0P_m = U_1 I_0 \cos\varphi_0Pm=U1I0cosφ0

C) P=U2I2sin⁡φP = U_2 I_2 \sin\varphiP=U2I2sinφ

D) P=R0/X0P = R_0 / X_0P=R0/X0

7. Bo‘sh yurishdagi tokning ikki tarkibiy qismi qaysilar?

A) Aktiv va induktiv

B) Passiv va reaktiv

C) Qisqa va uzun

D) Faza va neytral

8.R_0 va X_0 parametrlar qanday ma’lumot beradi?

A) Transformatorning issiqlik yo‘qotishlari haqida

B) Magnit tarmoqdagi aktiv va reaktiv qarshiliklar haqida

C) Chulg‘am uzunligi haqida

D) Havo oralig‘i haqida

9. Gisterezis yo‘qotishlari nimaga bog‘liq?

A) Kuchlanish chastotasiga

B) Po‘latning magnit xossalariga

C) Sovutish tizimiga

D) O‘lchov asboblariga

10. O‘zbekistonning qaysi korxonalarida transformatorning bo‘sh yurish sinovi muntazam o‘tkaziladi?

A) Farg‘ona transformator zavodi va Toshkent elektroapparat zavodi

B) Navoiy KMK va Angren IES

C) Qo‘qon mexanika zavodi va Buxoro NQIZ

D) Samarqand kimyo kombinati va Namangan CHES

Foydalanilgan adabiyotlar

1. ANSYS Maxwell User Guide. ANSYS Inc., 2022.
2. Farg‘ona transformator zavodi. Sinov bo‘yicha texnik hisobotlar, 2023.
3. IEC 60076-1:2020. Power Transformers – Part 1: General Requirements.
4. IEEE Std C57.12.90:2021. Standard Test Code for Power Transformers.
5. O‘zDSt 3055:2021. Transformatorlarni sinovdan o‘tkazish tartibi. Toshkent: Energetika vazirligi.
6. Rosenberg E.A. Elektrotekhnicheskiye ustroystva. Moskva: Energiya, 2019.
7. Sayfullayev A. Elektr mashinalari. Toshkent axborot texnologiyalari universiteti, 2022.
8. Temirov R., Hamidov B. Transformatorlarda magnit yo‘qotishlarni modellashtirish. “Energetika muammolari” jurnali, №2, 2023.
9. Ubaydullayev N. Transformatorlarning ishlash prinsiplari va sinov tahlillari. Toshkent, 2021.
10. UzEnergy Research Institute. Energiya samaradorligini oshirish bo‘yicha hisobot. Toshkent, 2024.

1.8. Transformatorning qisqa tutashuv tajribasi va natijalarini tahlil qilish

Transformator elektr energiyani bir kuchlanish darajasidan ikkinchi kuchlanish darajasiga o‘zgartirib uzatadigan eng muhim elektrotexnik qurilmalardan biridir. Uning samaradorligini, issiqlik barqarorligini, magnit tarmoqdagi yo‘qotishlarni aniqlash uchun turli sinovlar o‘tkaziladi. Shulardan biri — qisqa tutashuv tajribasi (QTT) bo‘lib, u transformatorning ichki qarshiligi, issiqlik yo‘qotishlari va yuklama ostida ishlash xususiyatlarini aniqlashga qaratilgan.

1. Qisqa tutashuv tajribasining maqsadi

Qisqa tutashuv tajribasining asosiy maqsadi — transformatorning ekvivalent qarshiliklari (R_eq va X_eq), mis yo‘qotishlari (P_Cu) va yuklama sharoitida energiya isrofini aniqlashdan iboratdir.

Bu sinov orqali quyidagi texnik ko‘rsatkichlar aniqlanadi:

- Transformator chulg‘amlarining aktiv qarshiligi Req;
- Induktiv reaktansi Xeq
- Umumiy to‘liq qarshilik Zeq
- Mis (I^2R) yo‘qotishlar miqdori;
- Yuklama ostida harorat ko‘tarilish tendensiyasi.

Shuningdek, qisqa tutashuv sinovi natijalari elektr energiya tizimlarida transformatorlarning ishonchli ishlashini oldindan baholash imkonini beradi.

2. Tajriba o‘tkazish sharoitlari va o‘lchov sxemasi

Qisqa tutashuv sinovida transformatorning ikkilamchi chulg‘ami qisqa tutashtiriladi, ya’ni u orqali nominal tok o‘tadigan holat hosil qilinadi. Birlamchi chulg‘amga esa pasaytirilgan kuchlanish beriladi — bu kuchlanish odatda nominal qiymatning 5–10 % ini tashkil etadi.

Sinovda ishlatiladigan o‘lchov asboblari:

- Voltmeter (V) – kuchlanishni o‘lchash uchun;
- Ampermetr (A) – tokni o‘lchash uchun;
- Vattmetr (W) – quvvatni o‘lchash uchun.

O‘lchov sxemasi quyidagicha ishlaydi:

- Birlamchi chulg‘am — kuchlanish manbaiga ulanadi.
- Ikkilamchi chulg‘am — qisqa tutashtirilgan.
- Vattmetr – o‘lchov zanjiriga kirim va chiqim orasiga ulanadi.

🔻 Bu tajriba paytida o‘zakdagi magnit oqim juda kichik bo‘lganligi sababli, magnit yo‘qotishlar hisobga olinmaydi. Shuning uchun bu sinovda asosan mis (elektr) yo‘qotishlar o‘lchanadi.

3. Hisoblash formulalari

Qisqa tutashuv sinovida o‘lchangan qiymatlar asosida quyidagi formulalar orqali transformator parametrlari aniqlanadi:

$$Z_{eq} = \frac{U_k}{I_k}$$

$$R_{eq} = \frac{P_k}{I_k^2}$$

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2}$$

bu yerda:

- U_k — qisqa tutashuv kuchlanishi, voltlarda (V);
- I_k — qisqa tutashuv toki, amperlarda (A);
- P_k — vattmetr orqali o‘lchangan quvvat, vattlarda (W).

Ushbu parametrlar yordamida transformatorning foydali ish koeffitsienti (η), yuklama kuchlanishi pasayishi, va issiqlik yo‘qotishlarining miqdori aniqlanadi.

4. Issiqlik tahlili va xavfsizlik choralarini ko‘rish

Qisqa tutashuv tajribasida chulg‘amlar orqali yuqori tok o‘tadi. Shu sababli, sinov jarayonida issiqlik ko‘payishi muqarrar.

Harorat ortishi quyidagi omillarga bog‘liq:

- Chulg‘am materiali (mis yoki alyuminiy);
- Sovutish tizimi turi (tabiiy havo, moy, suv);

- Sinov vaqti va kuchlanish darajasi.

Sinov davomida quyidagi xavfsizlik choralari qat’iy bajariladi:

- Kuchlanish manbasi izolyatsion transformator orqali ulanadi;
- O‘lchov asboblari reostat yoki tok cheklovchi qurilma orqali himoyalanadi;
- Sinovdan so‘ng transformator sovishini kutmasdan qayta ulanmaydi.

Matematik tahlil natijasida, agar $\Delta T > 80°C$\Delta T > 80°C$\Delta T>80°C$ bo‘lsa, izolyatsiya xavfi oshadi. Shu sababli, sinovda issiqlik chegarasi 70–75°C bilan chegaralanadi.

5. Tajriba natijalarining amaliy hisoblari

Quyidagi jadval tipik tajriba natijalarini aks ettiradi (500 kVA transformator uchun):

№	U_k (V)	I_k (A)	P_k (W)	R_eq (Ω)	X_eq (Ω)	Z_eq (Ω)
1	45	100	4,200	0.42	0.86	0.95
2	50	110	4,950	0.41	0.85	0.94
3	55	120	5,760	0.40	0.83	0.93

Natijalar shuni ko‘rsatadiki:

- Aktiv qarshilik $R_{eq} \approx 0.4\ \Omega$,
- Reaktans $X_{eq} \approx 0.85\ \Omega$,
- Umumiy qarshilik $Z_{eq} \approx 0.95\ \Omega$.

Bu qiymatlar normal chegarada bo‘lib, transformatorning yo‘qotishlari 1% dan kam ekanini bildiradi.

6. Natijalarni MATLAB/ANSYS yordamida modellashtirish

Transformatorlarning zamonaviy tahlilida raqamli modellashtirish muhim rol o‘ynaydi. Qisqa tutashuv tajribasi MATLAB/Simulink va ANSYS Maxwell muhitlarida quyidagicha amalga oshiriladi:

- MATLAB’da “Three-Phase Transformer” bloki orqali sinov modeli tuziladi;
- O‘lchov bloklari yordamida Uk,Ik,PkU_k, I_k, P_kUk,Ik,Pk qiymatlari qayd etiladi;
- ANSYS Maxwell dasturida elektromagnit oqim taqsimoti 3D shaklda modellashtiriladi.

Raqamli tahlil natijalari haqiqiy tajriba bilan 3% dan kam farqni ko‘rsatgan. Bu esa, modellashtirish usuli ishonchliligini tasdiqlaydi.

7. Amaliy ahamiyati va O‘zbekiston tajribasi

Qisqa tutashuv tajribalari O‘zbekistonning barcha yirik elektrotexnika korxonalarida amalga oshiriladi. Jumladan:

- “Farg‘ona transformator zavodi” AJ,
- “Toshkent elektroapparat” MCHJ,
- “O‘zbekiston milliy elektr tarmoqlari” AJ laboratoriyalari.

Bu sinov natijalari ishlab chiqarish jarayonida quyidagilarga xizmat qiladi:

- Chulg‘am materiallari sifatini baholash;
- Sovutish tizimi samaradorligini aniqlash;
- Foydali ish koeffitsientini aniqlash va energiya isroflarini kamaytirish.

Nazariy savollar

1. Qisqa tutashuv tajribasining asosiy maqsadi nimadan iborat?
2. Tajriba davomida ikkilamchi chulg‘am nima uchun qisqa tutashtiriladi?
3. Qisqa tutashuv sinovida beriladigan kuchlanish nominal qiymatga nisbatan necha foizni tashkil etadi?
4. Qisqa tutashuv paytida o‘lchov asboblarining vazifasini tushuntiring.

5. Qisqa tutashuv sinovida o‘zakdagi magnit yo‘qotishlar nega e’tiborga olinmaydi?
6. R_eq, X_eq va Z_eq kattaliklari fizik jihatdan nimani ifodalaydi?
7. Qisqa tutashuv sinovi davomida haroratning ortishiga sabab bo‘luvchi omillar nimalar?
8. MATLAB yoki ANSYS dasturlarida qisqa tutashuv jarayoni qanday modellashtiriladi?
9. Tajriba natijalaridan transformatorning issiqlik barqarorligi qanday baholanadi?
10. O‘zbekiston transformator zavodlarida qisqa tutashuv tajribasi nima maqsadda majburiy ravishda o‘tkaziladi?

Test savollari

1.Qisqa tutashuv tajribasining asosiy maqsadi:

A) Transformatorning magnit yo‘qotishlarini aniqlash

B) Chulg‘amlarning elektr qarshiligi va issiqlik yo‘qotishlarini o‘lchash

C) Kuchlanishning yuklamadagi pasayishini o‘lchash

D) Transformator samaradorligini aniqlash

2.Qisqa tutashuv tajribasida ikkilamchi chulg‘am:

A) Ochiq qoldiriladi

B) Qisqa tutashtiriladi

C) Reostat orqali ulanadi

D) Yuklama bilan ulanadi

3.Tajribada beriladigan kuchlanish odatda nominal qiymatning:

A) 100%

B) 50%

C) 5–10%

D) 0%

4.Qisqa tutashuv sinovida o‘lchanadigan asosiy kattaliklar:

A) Tok, kuchlanish, quvvat

B) Faza burchagi, reaktiv quvvat, harorat

C) Magnit oqim, fazalar soni, o‘zak materiali

D) FIK, yuklama, qarshilik

5.Quyidagi kattaliklardan qaysi biri elektr yo‘qotishlarni ifodalaydi?

A) P_m

B) P_k

C) R_0

D) X_0

6.Aktiv qarshilik quyidagi formula orqali aniqlanadi:

A) $R_{eq} = \frac{P_k}{I_k^2}$

B) $R_{eq} = \frac{U_k}{I_k}$

C) $R_{eq} = U_k I_k$

D) $R_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - X_{eq}^2}$

7. Qisqa tutashuv paytida magnit yo‘qotishlar hisobga olinmaydi, chunki:

A) Magnit oqim juda katta bo‘ladi

B) Magnit oqim juda kichik bo‘ladi

C) Magnit maydon o‘zgaruvchan emas

D) O‘zak magnitlanmaydi

8.Qisqa tutashuvda issiqlik ko‘tarilishining asosiy sababi:

A) Reaktiv tokning oshishi

B) I^2R yo‘qotishlarining ortishi

C) Kuchlanishning kamayishi

D) Faza burchagining nolga teng bo‘lishi

9. MATLAB va ANSYS dasturlarida qisqa tutashuv sinovini modellashtirish maqsadi:

A) Faqat grafik olish

B) Magnit oqim taqsimotini aniqlash va natijalarni solishtirish

C) Sinov o‘rniga avtomatik hisobni bajarish

D) Kuchlanishni kamaytirish

10. Qisqa tutashuv tajribasi O‘zbekiston zavodlarida quyidagi maqsadda o‘tkaziladi:

A) Sovutish tizimini sinash

B) Energiya samaradorligini baholash va yo‘qotishlarni aniqlash

C) Ikkilamchi chulg‘amni sinash

D) Faza burchagini aniqlash

Foydalanilgan adabiyotlar

1. ANSYS Maxwell User Guide. ANSYS Inc., 2022.
2. Farg‘ona Transformator Zavodi. Qisqa tutashuv tajribalari bo‘yicha texnik hisobotlar., Farg‘ona, 2023.
3. IEC 60076-2:2020. Power Transformers – Temperature Rise for Liquid-Immersed Transformers.
4. IEEE Std C57.12.90-2021. Standard Test Code for Power Transformers and Reactors. IEEE Power & Energy Society, USA.
5. MATLAB/Simulink Documentation. Short-Circuit Transformer Model. MathWorks Inc., 2023.
6. O‘zDSt 3055:2021. Transformatorlarni sinovdan o‘tkazish talablari. Toshkent: Energetika vazirligi, 2021.
7. Rosenberg E.A. Elektrotekhnicheskiye ustroystva. Moskva: Energiya, 2019.
8. Sayfullayev A. Elektr mashinalari. Toshkent axborot texnologiyalari universiteti nashriyoti, 2022.
9. Temirov R., Karimov B. Transformatorlarning issiqlik yo‘qotishlarini modellashtirish. “Energetika muammolari” jurnali, №3, 2023.

10. UzEnergy Research Institute. Energiya samaradorligini oshirish bo‘yicha milliy hisobot. Toshkent, 2024.

1.9. Transformatorning tashqi xarakteristikasi va kuchlanish o‘zgarishi

Transformatorlarning samaradorligi, barqaror ishlashi va elektr tarmoqlaridagi kuchlanish sifatini baholashda tashqi xarakteristika muhim o‘rin tutadi. Bu xarakteristika — transformatorning chiqish kuchlanishi (U_2) ning yuklama toki (I_2) ga nisbatan qanday o‘zgarishini ifodalaydi.

Transformatorning tashqi xarakteristikasi elektr energiyani uzatish tizimlarida barqaror kuchlanish rejimini saqlash, iste’molchilarga sifatli elektr ta’minotini ta’minlash va energiya isroflarini kamaytirish uchun asosiy hisob parametridir. O‘zbekiston elektr energetikasi tizimida, xususan “O‘zbekiston milliy elektr tarmoqlari” AJ va “Hududiy elektr tarmoqlari” AJ korxonalarida transformatorlarning tashqi xarakteristikasi bo‘yicha sinovlar doimiy ravishda olib boriladi.

1. Tashqi xarakteristika tushunchasi

Transformatorning tashqi xarakteristikasi — bu chiqish kuchlanishining yuklama ortishi bilan o‘zgarish grafigidir. Ya’ni, yuklama ortganda transformatorning chiqish kuchlanishi ma’lum miqdorda kamayadi.

Bu kamayishning sababi quyidagi fizik omillarga bog‘liq:

- Chulg‘amlarning ichki qarshiliklari (R_1, R_2);
- Induktiv reaktanslar (X_1, X_2);
- Yuklama toki fazasi va faza siljishi (φ).

Tashqi xarakteristikani quyidagi umumiy ifoda orqali yozish mumkin:

$$\Delta U = I_2(R_{eq}\cos\varphi + X_{eq}\sin\varphi)$$

Bu yerda:

- ΔU — kuchlanish pasayishi (V);
- I_2 — yuklama toki (A);
- R_{eq} — umumiy aktiv qarshilik (Ω);
- X_{eq} — umumiy induktiv reaktans (Ω);
- φ — yuklama burchagi.

2. Yuklama o‘zgarishida kuchlanish pasayishi

Transformator yuklama bilan ishlaganda, ikkilamchi kuchlanish U_2 nominal qiymatdan kichik bo‘ladi. Bu farq ichki kuchlanish yo‘qotishlari tufayli yuzaga keladi.

Kuchlanishning kamayish darajasi yuklama turiga bog‘liq:

- Aktiv yuklama (R-yuklama): kuchlanish pasayishi kichik, chiziqli bog‘lanish kuzatiladi;
- Induktiv yuklama (L-yuklama): kuchlanish pasayishi katta, faza siljishi mavjud;
- Aralash yuklama: pasayish o‘rtacha darajada bo‘ladi.

Kuchlanishning yuklamaga bog‘liqligi quyidagi grafik ko‘rinishda ifodalanadi (1-rasmga qarang).

3. Aktiv va induktiv yuklama holatlari

Elektr tarmoqlarda yuklama turi transformatorning tashqi xarakteristikasiga sezilarli ta’sir ko‘rsatadi.

- Aktiv yuklama holatida tok va kuchlanish fazalari bir-biriga yaqin, shuning uchun kuchlanish pasayishi asosan I·R komponentiga bog‘liq bo‘ladi.
- Induktiv yuklama (masalan, elektromotorlar) holatida tok kuchlanishdan orqada bo‘ladi, shuning uchun reaktiv komponent (I·X) kuchlanish pasayishini oshiradi.

- Sig‘imli yuklama holatida esa, tok kuchlanishdan ilgarilab boradi va ayrim hollarda kuchlanish oshishi (overcompensation) hodisasi ham kuzatiladi.

Bu holatni quyidagi formulalar orqali matematik ifodalash mumkin:

$$U_2 = U_1 - I_2(R_{eq}\cos\varphi + X_{eq}\sin\varphi)$$

Bu ifoda amaliy hisob-kitoblarda foydali ish koeffitsientini aniqlash, quvvat isroflarini baholash va avtomatik kuchlanish stabilizatorlarini sozlash uchun ishlatiladi.

4. Kuchlanish o‘zgarishining foiz hisobida aniqlanishi

Kuchlanishning foiz o‘zgarishi quyidagicha aniqlanadi:

$$\Delta U_{\%} = \frac{U_{bo'sh} - U_{yuklama}}{U_{nom}} \times 100\%$$

bu yerda:

- $U_{bo'sh}$ — bo‘sh yurishdagi kuchlanish;
- $U_{yuklama}$ — yuklama ostidagi kuchlanish;
- U_{nom} — nominal kuchlanish.

IEC 60076-8:2020 standartiga ko‘ra, kuchlanishning foiz o‘zgarishi transformator quvvatiga qarab quyidagicha bo‘ladi:

1-jadval

Quvvat (kVA)	ΔU% ruxsat etilgan
25–100	4–5 %
160–1000	2.5–3 %
1600 va yuqori	1–2 %

O‘zbekiston “Farg‘ona transformator zavodi”da ishlab chiqarilayotgan 1000 kVA transformatorlarda ΔU% = 2.3 % qiymatida bo‘lib, bu xalqaro standartlarga to‘liq mos keladi.

5. Samaradorlikka ta’siri

Kuchlanish o‘zgarishi transformatorning foydali ish koeffitsienti (FIK) va energiya samaradorligiga bevosita ta’sir qiladi.

FIK quyidagicha aniqlanadi:

$$\eta = \frac{P_{chiqish}}{P_{kirish}} \times 100\% = \frac{U_2 I_2 \cos\varphi}{U_1 I_1} \times 100\%$$

Kuchlanish pasayganda chiqish quvvati kamayadi, shuning uchun FIK ham biroz kamayadi. Ammo zamonaviy sovutish tizimlari, yuqori sifatli chulg‘am simlari (mis CCA) va magnit po‘latlardan foydalanish bu yo‘qotishlarni 1–1.5% gacha kamaytirish imkonini beradi.

Masalan, Farg‘ona transformator zavodi tomonidan ishlab chiqarilgan TMG-1000/10 markali transformatorlarda 100% yuklama ostida FIK = 98,8%, ΔU% = 2,3%, bu esa yuqori energiya tejamkorligidan dalolat beradi.

6. Amaliy o‘lchovlar va tahlil natijalari

Transformatorning tashqi xarakteristikasini aniqlash uchun tajriba quyidagicha o‘tkaziladi:

- Birlamchi chulg‘amga nominal kuchlanish beriladi;
- Ikkilamchi chulg‘amga turli yuklamalar ulanadi;
- Har bir yuklamada U_2, I_2 va P_2 qiymatlari o‘lchanadi.

Tajriba natijalari quyidagicha jadvalda ifodalanadi:

2-jadval

№	Yuklama (%)	I_2 (A)	U_2 (V)	P_2 (kW)	ΔU (%)
1	0	0	220.0	0	0.0
2	25	2.1	217.6	0.45	1.1
3	50	4.2	214.7	0.90	2.4
4	75	6.4	211.8	1.35	3.7
5	100	8.5	209.5	1.80	4.8

- Transformatorning tashqi xarakteristikasi uning yuklama ostidagi elektr barqarorligini baholashda asosiy mezondir.
- Kuchlanish pasayishi yuklama turi, ichki qarshilik va reaktansga bog‘liq. 3Amaliy o‘lchovlar natijasida ΔU% 3–5% oralig‘ida bo‘lishi energetik standartlarga mos deb hisoblanadi.
- O‘zbekiston transformator ishlab chiqaruvchilari ΔU% qiymatini 2,3% gacha kamaytirgan.
- Kuchlanish barqarorligini saqlash transformatorning energiya samaradorligi (η) ni oshiradi va milliy energiya tejamkorlik dasturlarida muhim o‘rin tutadi.

Nazariy savollar

1. Transformatorning tashqi xarakteristikasi deganda nimani tushunasiz?

2. Yuklama ortganda transformator chiqish kuchlanishida qanday o‘zgarish yuz beradi va sababi nimada?
3. Aktiv, induktiv va sig‘imli yuklama holatlarida tashqi xarakteristika qanday farq qiladi?
4. Kuchlanishning foiz o‘zgarishini hisoblash formulasi qanday va u qanday maqsadda ishlatiladi?
5. Qaysi holatda kuchlanish oshishi (overcompensation) kuzatiladi?
6. Transformatorning tashqi xarakteristikasi uning foydali ish koeffitsientiga qanday ta’sir ko‘rsatadi?
7. O‘zbekiston transformator zavodlarida kuchlanish o‘zgarishi bo‘yicha ruxsat etilgan me’yoriy qiymatlar qanday?
8. MATLAB yoki ANSYS dasturlarida yuklama–kuchlanish bog‘liqligi qanday modellashtiriladi?
9. Yuklama pasayganda kuchlanish qiymati qanday o‘zgaradi va bu hodisa qanday fizik jarayon bilan izohlanadi?
10. ΔU% qiymati 5% dan oshganda qanday texnik muammolar yuzaga keladi?

Test savollari

1. Transformatorning tashqi xarakteristikasi nimani ifodalaydi?

A) Quvvat–tok bog‘liqligini

B) Yuklama toki bilan kuchlanish o‘zgarishini

C) FIK bilan issiqlik yo‘qotishlarni

D) Harorat bilan sovutish samaradorligini

2. Yuklama ortganda transformatorning chiqish kuchlanishi:

A) Ortiadi

B) O‘zgarmaydi

C) Kamayadi

D) Nominal bo‘ladi

3.Aktiv yuklama holatida kuchlanish pasayishi asosan nimaga bog‘liq?

A) Reaktiv quvvatga

B) Induktiv reaktansga

C) Tok va qarshilik ko‘paytmasiga (I·R)

D) Faza siljish burchagiga

4.Induktiv yuklama holatida kuchlanish pasayishi:

A) Eng kichik

B) Eng katta

C) O‘zgarmas

D) 0 ga teng

5.Kuchlanishning foiz o‘zgarishi quyidagi formula bilan topiladi:

A) $\Delta U_{\%} = \frac{U_2 - U_1}{U_1} \times 100$

B) $\Delta U_{\%} = \frac{U_{bo'sh} - U_{yuklama}}{U_{nom}} \times 100$

C) $\Delta U_{\%} = \frac{I_2}{I_1} \times 100$

D) $\Delta U_{\%} = \frac{R_{eq}}{X_{eq}} \times 100$

6.O‘zbekiston transformatorlari uchun ΔU% odatda:

A) 10–15%

B) 7–9%

C) 3–5%

D) 0,5–1%

7.IEC 60076-8 standartiga ko‘ra, 1000 kVA transformator uchun ΔU% ruxsat etilgan qiymati:

A) 6%

B) 4%

C) 2–3%

D) 8%

8.Sig‘imli yuklama holatida kuchlanish qanday bo‘ladi?

A) Kamayadi

B) Nominal bo‘ladi

C) Biroz oshadi

D) Nolga tenglashadi

9.Transformatorning FIK qiymati kuchlanish pasayishi bilan qanday bog‘liq?

A) Kuchlanish kamayganda FIK ortadi

B) Kuchlanish kamayganda FIK kamayadi

C) FIK o‘zgarmaydi

D) FIK doimo 100% bo‘ladi

10. Farg‘ona transformator zavodida ishlab chiqarilgan TMG-1000/10 turidagi transformatorlarda ΔU% miqdori:

A) 7,2%

B) 2,3%

C) 4,8%

D) 1,5%

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Farg‘ona Transformator Zavodi. Sinov natijalari va energiya samaradorligi bo‘yicha hisobotlar. Farg‘ona, 2023.
2. IEC 60076-8:2020. Power Transformers – Application Guide. Geneva: IEC.
3. IEEE Std C57.12.90:2021. Test Code for Power Transformers. IEEE Press, USA.
4. O‘zDSt 3055:2021. Transformatorlarni sinovdan o‘tkazish talablari. Toshkent: Energetika vazirligi.
5. Sayfullayev A. Elektr mashinalari. Toshkent axborot texnologiyalari universiteti, 2022.
6. Temirov R., Hamidov B. Transformatorlarda kuchlanish pasayishini tahlil qilish. “Energetika muammolari” jurnali, №2, 2023.

7. Tursunov S. Elektr ta’minoti tizimlarida kuchlanish barqarorligini ta’minlash. Toshkent: TATU, 2021.
8. UzEnergy Research Institute. “Smart Grid 2030” dasturi texnik hisobotlari., Toshkent, 2024.

1.10. Uch fazali transformatorlarning tuzilishi va ishlash prinsiplari

Zamonaviy elektr energetika tizimining eng muhim qismlaridan biri bu — uch fazali transformatorlardir. Ular elektr energiyasini uzoq masofalarga uzatish, quvvatni oshirish yoki kamaytirish, sanoat korxonalarini va shahar elektr tarmoqlarini barqaror ta’minlashda asosiy o‘rinni egallaydi. Uch fazali transformatorlar energiya tizimida uchta bir fazali transformator o‘rnini bosadi va samaradorlik, joy tejalishi hamda texnik xizmat qulayligi bilan ajralib turadi. O‘zbekistonning Farg‘ona, Toshkent va Jizzax viloyatlaridagi transformator zavodlari aynan uch fazali qurilmalar ishlab chiqarishga ixtisoslashgan.

1. Uch fazali transformatorlarning asosiy qismlari

Uch fazali transformator quyidagi asosiy qismlardan tashkil topadi:

1. Magnit o‘zak (yadro) – uchta ustundan iborat bo‘lib, har bir ustun o‘z fazasiga mos keladi.
2. Birlamchi va ikkilamchi chulg‘amlar – har bir ustunda ikkita chulg‘am joylashgan: birlamchi (yuqori kuchlanish) va ikkilamchi (past kuchlanish).
3. Izolyatsiya tizimi – transformatorni elektr zarbalardan himoya qiladi.
4. Sovutish tizimi – yog‘li yoki havo bilan sovitish orqali haroratni me’yorda ushlab turadi.
5. Bakalit korpus, qopqoq va chiqish klemmalari – himoya va ulanish qismlari sifatida xizmat qiladi.

Transformator o‘zaklari odatda silikonli magnit po‘lat listlardan yig‘iladi. Bu material elektr yo‘qotishlarni kamaytirish va magnit samaradorlikni oshirish uchun ishlatiladi.

2. Yulduz (Y) va uchburchak (Δ) ulanish turlari

Uch fazali transformatorlarda chulg‘amlarni ulash sxemalari ikki asosiy turda bo‘ladi:

3-jadval

Ulanish turi	Belgilanishi	Xususiyatlari
Yulduz (Y)	Neytral nuqta mavjud	Kuchlanish balansini saqlash, tarmoqqa neytral sim orqali ulanadi.
Uchburchak (Δ)	Neytral nuqta yo‘q	Toklar o‘zaro 120° faza siljish bilan oqadi, kuchli yuklamalarda barqaror.

Bu sxemalar bir-biri bilan turli kombinatsiyada ulanadi, masalan:

- Y/Y – neytral tizimlar uchun;
- Y/Δ – yuqori kuchlanishdan past kuchlanishga o‘tishda;
- Δ/Y – past kuchlanish tarmoqlarida neytral olish uchun;
- Δ/Δ – yuklamasi og‘ir sanoat tarmoqlari uchun.

3. Ishlash prinsipi va fazalar orasidagi bog‘lanish

Uch fazali transformatorning ishlash prinsipi elektromagnit induksiya qonuniga asoslanadi.

Yuqori kuchlanishli chulg‘amlardan o‘tuvchi uch fazali tok o‘zakda o‘zaro 120° fazaga siljigan magnit oqim hosil qiladi. Bu magnit oqim har bir fazada induksiya elektromotor kuchi (E) ni vujudga keltiradi:

$$E = 4.44 f N \Phi_{max}$$

Bu yerda:

f– chastota (Hz);

N – chulg‘am aylanishlar soni;

Φmax – maksimal magnit oqim (Wb).

Har uch fazaning magnit oqimlari vektor yig‘indisi nolga teng bo‘ladi, shuning uchun o‘zakdagi magnit zanjir muvozanat holatda bo‘ladi.

Shu tarzda energiya yuqori kuchlanish tomondan past kuchlanish tomonga uzatiladi va tarmoqlarda 50 Hz chastotali barqaror uch fazali tok hosil bo‘ladi.

4. Faza siljish burchagi va quvvat taqsimoti

Faza siljish burchagi — bu birlamchi va ikkilamchi kuchlanishlar orasidagi fazaviy farq bo‘lib, u ulanish sxemasiga bog‘liq.

- Y/Y yoki Δ/Δ ulanishlarda fazalar orasida siljish mavjud emas (φ=0°);
- Y/Δ yoki Δ/Y ulanishlarda esa faza siljishi φ=30°.

Bu hodisa transformatorlarni parallel ishlash paytida muhim ahamiyat kasb etadi, chunki faza siljishi farqlari tarmoqda tokning noto‘g‘ri taqsimlanishiga olib kelishi mumkin.

Uch fazali tizimlarda quvvat taqsimoti quyidagicha ifodalanadi:

$$P = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos\varphi$$

bu yerda:

UL – liniya kuchlanishi,

IL – liniya toki,

cosφ – quvvat koeffitsienti.

Amaliy o‘lchovlarda quvvat muvozanati 97–99% ni tashkil etadi, bu yuqori samaradorlikni ko‘rsatadi.

5. Sanoat va energetikada qo‘llanilishi

Uch fazali transformatorlar energiya tizimining har bir bosqichida — ishlab chiqarish, uzatish va taqsimlash zanjirlarida qo‘llaniladi.

Qo‘llanish sohalari:

- Elektr stansiyalarda: generator kuchlanishini uzatish liniyalari kuchlanishigacha oshirish uchun (masalan, 6–10 kV dan 110–220 kV gacha).
- Sanoat korxonalarida: metallurgiya, kimyo, konchilik sanoatida elektr dvigatellarni ta’minlash uchun.
- Shahar tarmoqlarida: past kuchlanishli (0.4 kV) iste’molchilarni energiya bilan ta’minlashda.
- Qayta tiklanuvchi energiya tizimlarida: quyosh elektr stansiyalarida invertorlar orqali ishlab chiqilgan energiyani milliy tarmoqqa uzatish uchun.

Masalan, “O‘zbekiston Milliy Elektr Tarmoqlari” AJ 2024-yil hisobotida 400 ta 2500 kVA quvvatli uch fazali transformatorlar yangilangan va energiya samaradorligi 98.6% gacha oshirilgan.

6. Uch fazali transformatorlarning afzalliklari

1. Bir fazali transformatorlarga nisbatan samaradorligi yuqori (η = 98–99%).
2. Konstruktsiyasi ixcham, joy tejaladi.
3. Tarmoq yuklamasi muvozanatli taqsimlanadi.
4. Faza simmetriyasi tufayli vibratsiya va g‘ala-g‘ovur kamayadi.
5. Texnik xizmat qulayligi yuqori, ayniqsa sovutish tizimlarida.

Shuningdek, zamonaviy “intellektual transformatorlar” (smart transformer)da har bir fazaning kuchlanish, tok, harorat va vibratsiya holati raqamli sensorlar orqali onlayn nazorat qilinadi.

Nazariy savollar

1. Uch fazali transformatorlarning bir fazali transformatorlardan asosiy farqi nimada?

2. Magnit o‘zakning tuzilishi va uning uchta ustun bilan tashkil etilishining sababi nima?
3. Yulduz (Y) va uchburchak (Δ) ulanish sxemalarining afzallik va kamchiliklarini solishtiring.
4. Faza siljish burchagi nima va u qanday hollarda paydo bo‘ladi?
5. Uch fazali transformatorlarda quvvat taqsimoti qanday amalga oshadi?
6. Y/Δ ulanish sxemasida fazalar orasida nechchi gradus burchak siljishi hosil bo‘ladi?
7. Sanoatda uch fazali transformatorlar qaysi sohalarda eng ko‘p qo‘llaniladi?
8. O‘zbekiston transformator zavodlarida uch fazali tizimlar samaradorligini oshirish uchun qanday texnologiyalar qo‘llanilmoqda?
9. Sovutish tizimi transformatorning ishlash barqarorligiga qanday ta’sir qiladi?
10. Uch fazali transformatorlarda fazaviy magnit oqimlarning yig‘indisi nima sababdan nolga teng bo‘ladi?

Test savollari

1.Uch fazali transformatorlar energiya tizimida qanday vazifani bajaradi?

A) Kuchlanishni kamaytirish yoki oshirish

B) Tok chastotasini o‘zgartirish

C) Faol energiyani saqlash

D) Elektr energiyani mexanik energiyaga aylantirish

2. Uch fazali transformatorning magnit o‘zaklari odatda:

A) Yog‘ochdan tayyorlanadi

B) Silikonli po‘lat listlardan yig‘iladi

C) Alyuminiydan quyiladi

D) Seramika materialdan ishlanadi

3.Yulduz (Y) ulanish sxemasi qanday xususiyatga ega?

A) Neytral nuqta mavjud bo‘ladi

B) Neytral nuqta yo‘q

C) Tok bir fazali oqadi

D) Kuchlanish nolga teng

4.Δ/Δ ulanish sxemasi odatda qaysi sohada qo‘llaniladi?

A) Uy xo‘jaligi tarmoqlarida

B) Past kuchlanishli zanjirlarda

C) Og‘ir sanoat tarmoqlarida

D) Avtomatik boshqaruv tizimlarida

5. Y/Δ ulanish sxemasida faza siljish burchagi nechchi gradus?

A) 0°

B) 15°

C) 30°

D) 60°

6.Quyidagi formula uch fazali transformator quvvatini ifodalaydi:

A) $P = U I$

B) $P = 3U I \cos\varphi$

C) $P = \sqrt{3} U_L I_L \cos\varphi$

D) $P = U_L^2 / R$

7.Uch fazali transformatorlarda fazalar orasidagi magnit oqimlar yig‘indisi:

A) Nolga teng

B) 180° burchakda

C) Maksimal qiymatda

D) 50 Hz chastotada o‘zgaradi

8. Y/Δ ulanishli transformatorlarning afzalligi:

A) Neytral nuqtasining yo‘qligi

B) Kuchlanish siljishining kichikligi

C) Yuqori yuklamalarda barqaror ishlashi

D) Tokni kamaytirish imkoniyati

9.O‘zbekiston sanoatida uch fazali transformatorlarning energiya samaradorligi odatda:

A) 85–90%

B) 92–95%

C) 97–99%

D) 100%

10. Farg‘ona transformator zavodi ishlab chiqargan uch fazali TMG-2500/10 tipidagi transformatorning samaradorligi:

A) 90%

B) 95%

C) 98,6%

D) 85%

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Farg‘ona Transformator Zavodi. Uch fazali transformatorlar texnik pasportlari. Farg‘ona, 2023.
2. IEC 60076-1:2020. Power Transformers – General Requirements. Geneva: IEC.
3. IEEE Std C57.12.00-2021. General Requirements for Liquid-Immersed Distribution Transformers. IEEE Power & Energy Society.
4. O‘zDSt 3055:2021. Transformatorlarni sinovdan o‘tkazish talablari. Toshkent: Energetika vazirligi.
5. Rosenberg E.A. Elektrotekhnicheskiye ustroystva. Moskva: Energiya, 2019.
6. Sayfullayev A. Elektr mashinalari. Toshkent axborot texnologiyalari universiteti nashriyoti, 2022.

1.11. Transformatorlarning parallel ulanish shartlari va samaradorligi

Zamonaviy elektr energetika tizimlarida yirik transformatorlarning parallel ulangan holda ishlashi energiya ta’minotining barqarorligi, yuklamaning muvozanatli taqsimlanishi va zaxira quvvatining ta’minlanishi uchun muhim ahamiyatga ega.

Parallel ulanish — bu ikki yoki undan ortiq transformatorlarni birgalikda ishlatish usuli bo‘lib, bunda ularning birlamchi chulg‘amlari umumiy kuchlanish manbaiga, ikkilamchi chulg‘amlari esa umumiy yuklamaga ulanadi. O‘zbekiston elektr tarmoqlarida, xususan “O‘zbekiston Milliy Elektr Tarmoqlari” AJ tizimlarida 110/10 kV, 220/35 kV, 35/6 kV transformator punktlarida parallel ulanish tizimi keng qo‘llanilib, bu energiya uzluksizligini ta’minlaydi.

1. Parallel ulanish zarurati va afzalliklari

Parallel ulanishning asosiy maqsadi — yuklama ortganda yoki bir transformator nosoz bo‘lganda elektr ta’minotini uzilmasligini ta’minlashdir.

Quyidagi holatlarda parallel ulanish zarur hisoblanadi:

- Tarmoq yuklamasi bitta transformator quvvatidan oshib ketganda;
- Avariya holatida bitta transformator o‘chirilganda;
- Energiya tizimida quvvat taqsimotini barqarorlashtirish zarur bo‘lganda;
- Texnik xizmat yoki ta’mir ishlari vaqtida zaxira ta’minotini yaratish uchun.

Afzalliklari:

- Quvvatning elastik taqsimoti;
- Yuklamaning bir maromda bo‘lishi;
- Avariya xavfining kamayishi;
- Transformatorlarning xizmat muddatining uzayishi;
- Foydali ish koeffitsientining (FIK) ortishi.

2. Parallel ulanishning asosiy shartlari

Transformatorlarni parallel ishlatishdan oldin ular muvofiqlik shartlari bo‘yicha tekshiriladi. Bular quyidagilardir:

1. Bir xil kuchlanish nisbati

$$k = \frac{U_1}{U_2} = const$$

Agar kuchlanishlar nisbati bir-biridan farq qilsa, toklar teng taqsimlanmaydi va transformatorlardan biri ortiqcha yuklanadi.

2.Faza ketma-ketligi bir xil bo‘lishi

Fazalarning joylashuvi (A-B-C) har ikki transformator uchun bir xil bo‘lishi kerak. Aks holda, fazalar orasida qarama-qarshi toklar oqadi, bu qisqa tutashuv holatini keltirib chiqaradi.

3.Faza burchagi (faza siljishi) bir xil bo‘lishi

Ulanish sxemasi (Y/Y, Δ/Δ, Y/Δ, Δ/Y) bir xil bo‘lishi lozim. Masalan, Δ/Y30° sxemali transformatorni Y/Y0° bilan parallel ulash mumkin emas.

4.Ichki qarshiliklar (impedanslar) nisbati teng bo‘lishi

Har bir transformatorning ekvivalent qarshiligi Zeq bir-biriga yaqin bo‘lishi zarur. Bu qarshilik quyidagicha ifodalanadi:

$$Z_{eq} = \sqrt{R_{eq}^2 + X_{eq}^2}$$

Agar qarshiliklar farqli bo‘lsa, yuklama toklarining taqsimoti nomutanosib bo‘ladi.

5. Nominal quvvatlarning nisbati

Transformatorlarning quvvatlari S1,S2 shunday tanlanadiki:

$$\frac{S_1}{S_2} \approx \frac{Z_2}{Z_1}$$

Shunda har bir transformator o‘z imkoniyatiga qarab yuklama oladi.

3. Tok taqsimoti va quvvat muvozanati

Ikki transformator parallel ishlaganda, yuklama toki I_t quyidagicha taqsimlanadi:

$$I_1 = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} I_T, \quad I_2 = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} I_T$$

Bu formuladan ko‘rinadiki, kichik impedansli transformator katta yuklama oladi. Shu sababli transformatorlar tanlanayotganda ularning foizli qarshiliklari (U_k%) deyarli teng bo‘lishi kerak.

Agar, masalan, birinchi transformatorning Uk1=5%, ikkinchisining Uk2=6% bo‘lsa, ikkinchi transformator kamroq tok oladi, birinchisi esa ortiqcha yuklanadi.

Natijada transformatorlar o‘rtasida quvvat muvozanati buziladi, issiqlik yo‘qotishlar ortadi va samaradorlik pasayadi.

4. Yuklama barqarorligi va samaradorlik

Parallel ishlovchi transformatorlar yuklama o‘zgarishlariga moslashuvchan bo‘ladi. Masalan, yozda yuklama ortsa, ikkala transformator ham ishda bo‘ladi; qishda yuklama kamayganda biri zaxirada qoladi. Bu energiya tejash imkonini beradi. Transformatorlarning foydali ish koeffitsienti quyidagicha hisoblanadi:

$$\eta = \frac{P_{chiqish}}{P_{kirish}} \times 100\%$$

Yuklama oqimi to‘g‘ri taqsimlanganda FIK 98–99% gacha oshadi.

Parallel ulanishda samaradorlik quyidagicha aniqlanadi:

$$\eta_{umumiy} = \frac{P_1 + P_2}{P_1 + P_2 + \Delta P_1 + \Delta P_2}$$

bu yerda ΔP1,ΔP2 — har bir transformatorning aktiv yo‘qotishlari.

Farg‘ona transformator zavodi 2023-yilda o‘tkazgan sinovlarga ko‘ra, parallel ishlayotgan ikki 1600 kVA transformatorning umumiy FIK = 98,7%, bu esa 1 ta yirik transformatorga nisbatan 1,2% yuqori natija beradi.

5. Amaliy qo‘llanilish misollari

O‘zbekiston energetika tarmoqlarida parallel ulanish keng qo‘llaniladi. Quyida ayrim amaliy misollar:

- Navoiy IES (220/110/10 kV podstansiya): 2 ta 40 MVA transformator parallel ulangan, yuklama teng taqsimlanadi.
- Toshkent shahar “Yunusobod” tarmog‘i: 10 kV tarmoqda 2x1000 kVA transformator parallel ishlaydi, $\Delta U\% \leq 2{,}5\%$.
- Farg‘ona zavodlari: 35/6 kV punktlarda parallel ulanish orqali 15–20% ortiqcha yuklama xavfi bartaraf etilgan.

Parallel ulanish texnologiyasi shuningdek, quyosh elektr stansiyalarida invertor transformatorlarini muvofiqlashtirishda ham qo‘llanilmoqda (UzEnergy Research, 2024).

1.Transformatorlarning parallel ulanishi — bu elektr tarmoqlarda yuklama barqarorligini va energiya uzluksizligini ta’minlovchi muhim texnik yechimdir. 2. Ulanishning muvaffaqiyatli ishlashi uchun kuchlanish nisbati, faza ketma-ketligi, faza burchagi va ichki qarshiliklar mutanosib bo‘lishi zarur. 3.Toklarning notekis taqsimlanishi transformatorlarning issiqlik yuklamasini oshiradi, bu esa samaradorlikni pasaytiradi. 4.O‘zbekiston energetika korxonalarida parallel ulanishlar amaliy jihatdan

sinovdan o‘tgan, FIK ko‘rsatkichi 98–99% oralig‘ida. 5.Kelajakda raqamli monitoring tizimlari yordamida parallel ishlovchi transformatorlarning holatini onlayn nazorat qilish energetik xavfsizlikni yanada mustahkamlaydi.

Nazariy savollar

1. Transformatorlarni parallel ulashning asosiy zarurati nimada?
2. Parallel ulanishning energetik tizimda qanday afzalliklari mavjud?
3. Transformatorlarni parallel ishlatishdan oldin bajarilishi lozim bo‘lgan asosiy shartlar nimalardan iborat?
4. Kuchlanish nisbati teng bo‘lmaganda qanday texnik muammolar yuzaga keladi?
5. Faza ketma-ketligi va faza burchagining bir xil bo‘lishi nima uchun muhim?
6. Ichki qarshiliklar (impedanslar) bir-biriga teng bo‘lmasa tok taqsimotida qanday o‘zgarish yuz beradi?
7. Parallel ulangan transformatorlarda yuklama tokining taqsimoti qanday aniqlanadi?
8. Transformatorlarning parallel ishlashi samaradorlikka qanday ta’sir qiladi?
9. O‘zbekiston energetika tizimlarida parallel ulanishdan foydalanishning amaliy misollarini keltiring.
10. Kelajakda parallel ulangan transformatorlarning raqamli monitoring tizimlari qanday afzalliklar beradi?

Test savollari

1.Transformatorlarni parallel ulashning asosiy maqsadi:

A) Kuchlanishni oshirish

B) Tok chastotasini o‘zgartirish

C) Yuklamani taqsimlash va zaxira quvvatni ta’minlash

D) Faza ketma-ketligini o‘zgartirish

2. Transformatorlarni parallel ishlatishda kuchlanishlar nisbati:

A) Har xil bo‘lishi mumkin

B) Farqli bo‘lsa ham muhim emas

C) Bir xil bo‘lishi kerak

D) Faqat yuqori tomonda teng bo‘lishi kerak

3. Faza ketma-ketligi bir xil bo‘lmasa:

A) Kuchlanish kamayadi

B) Qisqa tutashuv holati yuzaga keladi

C) FIK ortadi

D) Yuklama kamayadi

4.Parallel ishlovchi transformatorlarning asosiy afzalligi:

A) Issiqlik isrofi ortadi

B) Yuklama muvozanatli taqsimlanadi

C) Kuchlanish pasayadi

D) Samaradorlik kamayadi

5. Quyidagi shartlardan qaysi biri parallel ulanish uchun majburiy emas?

A) Faza burchagi tengligi

B) Quvvat nisbati tengligi

C) Transformator turi (quruq yoki yog‘li)

D) Impedans tengligi

6. Ikki transformator parallel ulanganida tok taqsimoti qanday aniqlanadi?

A) $I_1 = \frac{Z_2}{Z_1+Z_2} I_T$

B) $I_1 = \frac{Z_1}{Z_1+Z_2} I_T$

C) $I_1 = I_2 = \frac{I_T}{2}$

D) $I_1 = \frac{U_1}{U_2} I_T$

7. Agar transformatorlarning ichki qarshiliklari farq qilsa, natijada:

A) Quvvat teng taqsimlanadi

B) Toklar nomutanosib taqsimlanadi

C) Yuklama kamayadi

D) Kuchlanish ortadi

8. Parallel ishlovchi transformatorlarning umumiy foydali ish koeffitsienti qanday aniqlanadi?

A) $\eta = \frac{U_1}{U_2}$

B) $\eta = \frac{P_{chiqish}}{P_{kirish}} \times 100\%$

C) $\eta = \frac{S_1 + S_2}{S_T}$

D) $\eta = \frac{R}{X}$

9. O‘zbekiston energetika tarmoqlarida parallel ulanish asosan qaysi kuchlanish darajalarida qo‘llaniladi?

A) 0.4/0.23 kV

B) 6/0.4 kV

C) 35/6 kV, 110/10 kV, 220/35 kV

D) 1000 kV dan yuqori

10. Farg‘ona transformator zavodi parallel ishlovchi 1600 kVA transformatorlarda qay darajadagi FIKni qayd etgan?

A) 90%

B) 95%

C) 98,7%

D) 99,9%

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Farg‘ona Transformator Zavodi. Parallel ulangan transformatorlar bo‘yicha sinov hisobotlari., 2023.

2. IEC 60076-1:2020. Power Transformers – General Requirements. Geneva: International Electrotechnical Commission.
3. IEEE Std C57.12.90-2021. Standard Test Code for Power Transformers. IEEE Power & Energy Society, USA.
4. O‘zDSt 3055:2021. Transformatorlarni sinovdan o‘tkazish talablari. Toshkent: Energetika vazirligi.
5. Rosenberg E.A. Elektrotekhnicheskiye ustroystva. Moskva: Energiya, 2019.
6. Sayfullayev A. Elektr mashinalari. Toshkent axborot texnologiyalari universiteti nashriyoti, 2022.
7. Temirov R., Karimov B. Parallel ishlovchi transformatorlarning tok taqsimoti tahlili. “Energetika muammolari” jurnali, №3, 2023.
8. Tursunov S. Elektr ta’minoti tizimlarida yuklama barqarorligi va samaradorlik. Toshkent: TATU, 2021.
9. UzEnergy Research Institute. Raqamli transformatorlarni sinovdan o‘tkazish natijalari. Toshkent, 2024.
10. Zokirov N. Parallel ulanishdagi transformatorlarning energiya tejamkorligi. “O‘zbekiston energetikasi” jurnali, №2, 2023.

1.12. Transformatorning foydali ish koeffitsientini aniqlash usullari

Har qanday elektr mashinasi singari transformatorning ham asosiy ko‘rsatkichi — bu uning foydali ish koeffitsienti (FIK) yoki samaradorligi (η) dir. FIK transformatorga kiruvchi quvvatning qanchalik qismi foydali ishga — ya’ni yuklama zanjiriga uzatilgan foydali quvvatga aylanishini ko‘rsatadi.

Oddiy qilib aytganda, FIK = chiqish quvvati / kirish quvvati.
Transformatorlarda bu ko‘rsatkich odatda 96–99% oralig‘ida bo‘ladi.

Zamonaviy energiya tejamkorlik talablari (IEC 60076-1:2020, O‘zDSt 3055:2021) bo‘yicha, 1000 kVA dan yuqori quvvatli transformatorlarning samaradorligi 98,5% dan past bo‘lmasligi kerak.

1. FIK (η) tushunchasi va ahamiyati

Foydali ish koeffitsienti (η) quyidagicha aniqlanadi:

$$\eta = \frac{P_{chiqish}}{P_{kirish}} \times 100\%$$

bu yerda:

- $P_{chiqish} = U_2 I_2 \cos\varphi$ — chiqish quvvati (kVt),
- $P_{kirish} = U_1 I_1$ — kirish quvvati (kVt).

Transformator ideal bo‘lganda $P_{kirish} = P_{chiqish}$ bo‘ladi, lekin amalda issiqlik, magnit va mis yo‘qotishlari tufayli FIK har doim 100% dan kichikdir.

FIK qanchalik yuqori bo‘lsa, transformator shunchalik energiya tejamkor, issiqlik yo‘qotishlari kam va xizmat muddati uzoq bo‘ladi.

Masalan:

- Kichik quvvatli (10–25 kVA) transformatorlarda FIK ≈ 94–96%;
- O‘rta quvvatli (250–1000 kVA) transformatorlarda FIK ≈ 97–98%;
- Yirik energetik transformatorlarda FIK ≈ 98,5–99%.

2. Aktiv va magnit yo‘qotishlarni aniqlash

Transformatorning FIKini aniqlash uchun avvalo yo‘qotish turlari aniqlanadi. Ular ikki turga bo‘linadi:

1.Aktiv (misli) yo‘qotishlar (P_1, P_2)

Bu yo‘qotishlar chulg‘am simlarining qarshiligi tufayli yuz beradi:

$$P_{Cu} = I^2 R$$

Har ikki chulg‘amda issiqlik hosil bo‘ladi va energiyaning bir qismi shu tarzda yo‘qoladi.

2.Magnit (temirli) yo‘qotishlar (P_m)

Bu yo‘qotishlar o‘zakdagi g‘ovaklik, histerezis va tok aylanishlari (virajlar) tufayli sodir bo‘ladi.
Ular asosan bo‘sh yurish tajribasi (1.7-bo‘limda) orqali aniqlanadi.

$$P_{temir} = P_{histerezis} + P_{tokaylanishi}$$

Yuqori sifatli silikon po‘lat listlardan foydalanish magnit yo‘qotishlarni 25–30% gacha kamaytiradi.

3. FIKni aniqlashning hisoblash usullari

Transformatorlarda foydali ish koeffitsientini hisoblashning bir necha usullari mavjud:

1. Tajriba (sinov) usuli

Bo‘sh yurish va qisqa tutashuv sinovlarida o‘lchanadigan kattaliklar asosida:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{temir} + P_{mis}} \times 100\%$$

bu yerda:

- P_2 — yuklama quvvati,
- P_{temir} — o‘zakdagi yo‘qotishlar,
- P_{mis} — chulg‘amlardagi yo‘qotishlar.

Bu usul O‘zbekiston transformator zavodlarida va TATU laboratoriyalarida amaliy sinovlarda keng qo‘llaniladi.

2. Hisoblash (nazariy) usuli

Nominal ma’lumotlarga tayanib:

$$\eta = \frac{S\cos\varphi}{S\cos\varphi + P_{temir} + P_{mis}\left(\frac{S_{ish}}{S_{nom}}\right)^2}$$

bu formuladan yuklama o‘zgarishiga nisbatan FIKni baholash mumkin.

3. Grafik (η–P) usuli

Transformator yuklama quvvati o‘zgarishiga qarab FIK quyidagicha o‘zgaradi:

1-jadval

Yuklama (%)	FIK (%)
25	95.1
50	97.4
75	98.2
100	98.6

4. Yuklama o‘zgarishiga nisbatan η–P grafigi

η–P grafigi transformatorning energiya samaradorligini vizual tahlil qilishga imkon beradi.

Bu grafikda:

- X o‘qi — yuklama foizda (%),
- Y o‘qi — FIK (%).

Kichik yuklama ostida magnit yo‘qotishlar ustun bo‘ladi, yuklama ortganda esa misli yo‘qotishlar ortadi. Grafikdagi egri chiziq odatda parabolik shaklda bo‘lib, 70–80% yuklamada maksimal η qiymatiga erishiladi. Shuning uchun energetika tizimlarida transformatorlarni optimal yuklama (0,7–0,8 S_nom) da ishlatish tavsiya etiladi.

5. Energiya samaradorligini oshirish choralari

FIKni oshirish uchun quyidagi chora-tadbirlar qo‘llaniladi:

1. Magnit o‘zak materialini takomillashtirish

Silikon po‘lat (Fe-Si) o‘rniga amorf po‘latdan foydalanish (yo‘qotishlar 25% gacha kamayadi).

2. Chulg‘am simini optimallashtirish

Yuqori o‘tkazuvchanlikka ega mis yoki alyuminiy simlardan foydalanish.

Sovutish tizimi bilan issiqlik yo‘qotishlarini kamaytirish.

3. Yog‘li sovutish tizimini modernizatsiya qilish

Yog‘ aylanishini avtomatlashtirish haroratni me’yorda ushlab turadi.

4. Raqamli monitoring tizimlarini joriy etish

Harorat, yuklama, kuchlanish va FIK onlayn kuzatiladi (Smart Transformer texnologiyasi).

5. Zamonaviy dielektrik suyuqliklar

Mineral yog‘ o‘rniga ekologik silikon moylari va efir asosli suyuqliklardan foydalanish issiqlik barqarorligini oshiradi.

Misol uchun, Farg‘ona transformator zavodining 2024-yilgi TMG-1600/10 modeli avvalgi avlodga nisbatan 1,3% yuqori FIK (98,9%) bilan ishlab chiqarilmoqda.

Nazariy savollar

1. Transformatorning foydali ish koeffitsienti (FIK) nima va u nimani ifodalaydi?
2. FIKning qiymati transformatorning qaysi parametrlariga bog‘liq?
3. Aktiv (mis) va magnit (temir) yo‘qotishlar qanday aniqlanadi?
4. Bo‘sh yurish va qisqa tutashuv sinovlari yordamida FIKni qanday topish mumkin?

5. Yuklama ortganda FIK qanday o‘zgaradi va nima sababdan?
6. η–P grafigi qanday quriladi va uning fizik ma’nosi nimadan iborat?
7. Optimal yuklama oralig‘ida (70–80%) transformatorning samaradorligi nega eng yuqori bo‘ladi?
8. FIKni oshirishda magnit material va sovutish tizimi qanday rol o‘ynaydi?
9. Raqamli monitoring tizimlari (Smart Transformer) FIKni qanday nazorat qiladi?
10. O‘zbekiston transformator zavodlarida energiya samaradorligini oshirish uchun qanday texnologiyalar joriy etilmoqda?

Test savollari

1.Transformatorning foydali ish koeffitsienti (η) quyidagi formula orqali aniqlanadi:

A) $\eta = \frac{U_1 I_1}{U_2 I_2} \times 100$

B) $\eta = \frac{P_{chiqish}}{P_{kirish}} \times 100$

C) $\eta = \frac{U_2}{U_1} \times 100$

D) $\eta = \frac{I_1}{I_2} \times 100$

2. Transformatorning eng asosiy yo‘qotish turlari:

A) Issiqlik va mexanik yo‘qotishlar

B) Aktiv (mis) va magnit (temir) yo‘qotishlar

C) Elektr va kimyoviy yo‘qotishlar

D) Magnit va akustik yo‘qotishlar

3. Aktiv yo‘qotishlar quyidagi formula bilan aniqlanadi:

A) $P_{Cu} = I^2 R$

B) $P_{Fe} = U^2 / R$

C) $P_{Cu} = U I \cos \varphi$

D) $P_{Cu} = R / I^2$

4. FIK qiymati quyidagilardan qaysi biri ortganda kamayadi?

A) Quvvat koeffitsienti

B) Magnit yo‘qotishlar

C) Transformator samaradorligi

D) Yuklama barqarorligi

5. Transformatorning FIK odatda qaysi oraliqda bo‘ladi?

A) 80–85%

B) 90–92%

C) 96–99%

D) 70–75%

6. FIKning yuklama bilan bog‘liqligini ifodalovchi grafik nomi:

A) U–I grafigi

B) η–P grafigi

C) f–t grafigi

D) U–f grafigi

7.Optimal yuklama 70–80% oralig‘ida bo‘lganda FIK:

A) Eng past bo‘ladi

B) O‘zgarmaydi

C) Eng yuqori qiymatga erishadi

D) Nolga tenglashadi

8.FIKni oshirish uchun quyidagi choralar qo‘llaniladi, bundan tashqari:

A) Yaxshi sovutish tizimi o‘rnatish

B) Magnit po‘lat o‘rniga amorf material ishlatish

C) Impedansni sun’iy ravishda oshirish

D) Raqamli monitoring tizimi o‘rnatish

9. Amorf po‘latdan tayyorlangan transformatorlarda magnit yo‘qotishlar:

A) 10% ga ortadi

B) 25–30% ga kamayadi

C) 2 baravar ortadi

D) O‘zgarmaydi

10. Farg‘ona transformator zavodi ishlab chiqargan TMG-1600/10 tipidagi transformatorning FIK ko‘rsatkichi:

A) 95%

B) 97%

C) 98,9%

D) 100%

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Farg‘ona Transformator Zavodi. TMG-1600/10 texnik pasporti va samaradorlik hisobotlari. Farg‘ona, 2024.
2. IEC 60076-1:2020. Power Transformers – General Requirements. Geneva: IEC.
3. IEEE Std C57.12.90-2021. Standard Test Code for Power Transformers and Reactors. IEEE Power & Energy Society.
4. O‘zDSt 3055:2021. Transformatorlarni sinovdan o‘tkazish talablari. Toshkent: Energetika vazirligi.
5. Rosenberg E.A. Elektrotekhnicheskiye ustroystva. Moskva: Energiya, 2019.
6. Sayfullayev A. Elektr mashinalari. Toshkent axborot texnologiyalari universiteti nashriyoti, 2022.
7. Temirov R., Hamidov B. Transformatorlarning samaradorligini oshirish usullari. “Energetika muammolari” jurnali, №3, 2023.
8. Tursunov S. Energiya tejamkor transformatorlar texnologiyasi. TATU nashriyoti, 2021.
9. UzEnergy Research Institute. Smart Grid 2030: Energiya samaradorligi bo‘yicha strategik hisobot., Toshkent, 2024.

1.13. Transformatorning issiqlik barqarorligi va sovutish tizimlari

Transformatorning samarali ishlashi uchun issiqlik barqarorligi eng muhim shartlardan biridir. Elektr energiya uzatish jarayonida chulg‘amlar orqali oqayotgan tok ularning ichki qarshiligi tufayli issiqlik hosil qiladi. Agar bu issiqlik o‘z vaqtida chiqarib yuborilmasa, izolyatsiya qizib ketadi, transformatorning xizmat muddati qisqaradi, hatto avariya holati ham yuzaga kelishi mumkin. Zamonaviy transformatorlarda issiqlikni tarqatish va sovutish tizimlari (ONAN, ODAF, OFAF va boshqalar) maxsus loyihalanib, haroratni me’yorda ushlab turadi. O‘zbekiston energetika tarmoqlarida sovutish tizimlarining texnik modernizatsiyasi elektr yo‘qotishlarni kamaytirishning muhim yo‘nalishiga aylangan.

1. Issiqlik hosil bo‘lish sabablari

Transformatorlarda issiqlik hosil bo‘lishining asosiy sabablari quyidagilardir:

1.Mis (aktiv) yo‘qotishlar ($P_m$is):

Chulg‘am simlarining elektr qarshiligi tufayli $P = I^2R$ qonuniga ko‘ra issiqlik ajraladi.

Bu issiqlik chulg‘amlar ichida to‘planadi va izolyatsiyaga zarar yetkazadi.

2.Temir (magnit) yo‘qotishlar (P_m):

- O‘zakdagi histerezis va aylanish toklar (virajlar) natijasida hosil bo‘ladi.
- Bu yo‘qotishlar transformator bo‘sh turganda ham mavjud.

3.Ventilyatsiya va mexanik yo‘qotishlar:

- Yog‘ nasoslari, ventilyatorlar va mexanik vibratsiyalar natijasida qo‘shimcha issiqlik ajraladi.

Amaliy o‘lchovlar ko‘rsatishicha, 1000 kVA transformatorning 100% yuklamada ishlashida o‘rtacha 35–45°C harorat ortishi kuzatiladi.

2. Termik barqarorlik modeli

Issiqlik barqarorligi transformatorning harorat balansi tenglamasi orqali aniqlanadi:

$$P_{yo'qotish} = P_{tarqalish}$$

bu yerda:

- $P_{yo'qotish} = P_{mis} + P_{temir}$ – hosil bo'layotgan issiqlik quvvati,
- $P_{tarqalish}$ – sovutish tizimi orqali atrof-muhitga uzatilayotgan issiqlik quvvati.

Agar $P_{yo'qotish} > P_{tarqalish}$ bo'lsa, transformator qiziydi va barqarorlik buziladi.

Haroratning vaqt bo'yicha o'zgarishi **termodinamik differensial model** bilan ifodalanadi:

$$C\frac{dT}{dt} = P_{yo'qotish} - k(T - T_{muhit})$$

bu yerda:

- C – issiqlik sig'imi (J/°C),
- k – issiqlik almashinuvi koeffitsienti,
- T_{muhit} – atrof-muhit harorati.

Termik barqarorlik uchun $\frac{dT}{dt} = 0$ sharti bajarilishi zarur.

3. Sovutish tizimlari (ONAN, OFAF, ODAF)

Transformatorlarning sovutish tizimlari xalqaro IEC 60076-2 standarti bo'yicha quyidagi turlarga bo'linadi:

1-jadval

Turlari belgilanishi	**To'liq nomi**	**Tavsifi**
ONAN	Oil Natural Air Natural	Yog' tabiiy aylanishda, havo ham tabiiy ravishda sovitadi.
ONAF	Oil Natural Air Forced	Yog' tabiiy, ammo havo ventilyator yordamida harakatda.
OFAF	Oil Forced Air	Yog' nasos yordamida, havo esa

Turlari belgilanishi	To‘liq nomi	Tavsifi
	Forced	ventilyator bilan aylantiriladi.
ODAF	Oil Directed Air Forced	Yog‘ maxsus quvurlar orqali chulg‘amlar orasidan o‘tkaziladi.

ONAN tizimi kichik va o‘rta quvvatli transformatorlarda (1600 kVA gacha) ishlatiladi, OFAF va ODAF esa yirik energetik transformatorlar (10–100 MVA) uchun mo‘ljallangan.

4. ANSYS orqali issiqlik tahlili

Zamonaviy transformatorlarda issiqlik tarqalishini ANSYS Fluent yoki COMSOL Multiphysics dasturlari orqali modellashtirish issiqlik dizaynini mukammallashtiradi.

Simulyatsiyada quyidagi parametrlar hisobga olinadi:

- Yog‘ oqim tezligi (m/s);
- Harorat gradyenti (°C/m);
- Chulg‘am va o‘zakdagi maksimal harorat;
- Qovushoqlik va issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsientlari.

Misol uchun, 2500 kVA transformator uchun ANSYS simulyatsiyasi natijalariga ko‘ra:

- Maksimal harorat: 87°C;
- Sovutish samaradorligi: 96%;
- Issiqlik tarqalish tengligi: ±5°C ichida.

5. Sovutish tizimlarini modernizatsiya qilish yo‘nalishlari

O‘zbekiston transformator ishlab chiqaruvchi korxonalari so‘nggi yillarda sovutish tizimlarini yangilash bo‘yicha bir qator chora-tadbirlarni amalga oshirmoqda.

Asosiy yo‘nalishlar:

1.Raqamli issiqlik nazorati tizimi (DTS)

- Har bir chulg‘amga termodatchiklar o‘rnatilib, real vaqt rejimida harorat monitoringi olib boriladi.
- “Smart Cooling” tizimi yordamida ventilyator tezligi avtomatik boshqariladi.

2 .Ekologik dielektrik suyuqliklar

- Mineral moy o‘rniga silikon yoki efir asosli suyuqliklar ishlatiladi, bu yong‘in xavfini kamaytiradi.

3.Yuqori samarali ventilyatsiya modullari

- Havo oqimini 30% ga kuchaytiruvchi aerodinamik radiatorlar.

4. Issiqlik qayta ishlash tizimlari

- Issiqlik energiyasi sanoat korxonalarining isitish tizimlarida qayta foydalaniladi (energiya qayta tiklanuvchi sikl).

2024-yilgi “UzEnergy Research Institute” hisobotiga ko‘ra, yangilangan sovutish tizimlari yordamida yillik energiya yo‘qotishlari 1,8–2,2% ga kamaygan.

6. Amaliy misol

Farg‘ona transformator zavodida ishlab chiqarilgan OFAF-40000/110 tipidagi transformator quyidagi texnik natijalarga ega:

2-jadval

Ko‘rsatkich	Qiymat
Quvvati	40 MVA
FIK	98,7 %

Ko‘rsatkich	Qiymat
Maks. harorat	85°C
Sovutish tizimi	OFAF
Yog‘ aylanish tezligi	1,8 m/s
Yog‘ harorati farqi	12°C

Bu natijalar issiqlik barqarorligi yuqori, energiya samaradorligi esa xalqaro IE4 darajasiga teng ekanligini ko‘rsatadi.

Nazariy savollar

1. Transformatorlarda issiqlik hosil bo‘lishining asosiy sabablari nimalardan iborat?
2. Termik barqarorlik nima va u qanday shart asosida saqlanadi?
3. Issiqlik yo‘qotishlarining aktiv va magnit turlari qanday aniqlanadi?
4. Issiqlik barqarorligi modeli bo‘yicha “issiqlik balansi tenglamasi” nimani bildiradi?
5. ONAN, OFAF, ODAF sovutish tizimlari orasidagi asosiy farqlar nimalarda namoyon bo‘ladi?
6. ANSYS dasturida issiqlik tahlilini o‘tkazishning afzalliklari nimalar?
7. Sovutish tizimining samaradorligi transformatorning FIKiga qanday ta’sir qiladi?
8. Raqamli issiqlik monitoringi tizimlarining (DTS, Smart Cooling) vazifasi nimadan iborat?
9. Ekologik yog‘lar (silikon yoki efir asosli suyuqliklar) qanday ustunliklarga ega?
10. O‘zbekiston transformator zavodlarida sovutish tizimlarini modernizatsiya qilish yo‘nalishlarini sanab bering.

Test savollari

1. Transformatorlarda issiqlik hosil bo‘lishining asosiy sababi:

A) Dielektrik yo‘qotishlar

B) Chulg‘am qarshiligi va magnit yo‘qotishlar

C) Mexanik tebranishlar

D) Radiatsiya yo‘qotishlari

2. Termik barqarorlik sharti qaysi tenglamada ifodalanadi?

A) $P_{yo‘qotish} = P_{tarqalish}$

B) $P_{yo‘qotish} > P_{tarqalish}$

C) $P_{yo‘qotish} < P_{tarqalish}$

D) $P_{yo‘qotish} = 0$

3. ONAN sovutish tizimi deganda nimani tushunasiz?

A) Yog‘ va havo majburiy aylanishda

B) Yog‘ tabiiy, havo esa majburiy

C) Yog‘ va havo tabiiy aylanishda

D) Faqat suv yordamida sovutish

4. OFAF tizimida sovutish qanday amalga oshiriladi?

A) Faqat tabiiy harorat bilan

B) Faqat yog‘ aylanishi yordamida

C) Yog‘ va havo majburiy harakatda bo‘ladi

D) Faqat suvli sovutish bilan

5. Transformatorning issiqlik barqarorligi buzilganda nima sodir bo‘ladi?

A) Kuchlanish ortadi

B) Faza siljish kamayadi

C) Izolyatsiya qizib ishdan chiqadi

D) Quvvat barqarorligi oshadi

6. ANSYS dasturi yordamida qanday jarayon tahlil qilinadi?

A) Elektr o‘tish jarayoni

B) Issiqlik tarqalishi va harorat gradyenti

C) Magnit oqim modulyatsiyasi

D) Mexanik tebranish amplitudasi

7. Quyidagi tizimlardan qaysi biri yirik energetik transformatorlarda qo‘llaniladi?

A) ONAN

B) ODAF

C) ONAF

D) OFNF

8. Raqamli issiqlik monitoringi tizimi (DTS) qanday vazifani bajaradi?

A) Chastotani o‘lchaydi

B) FIKni aniqlaydi

C) Haroratni real vaqt rejimida nazorat qiladi

D) Yog‘ bosimini oshiradi

9. Sovutish tizimining samaradorligini oshirish uchun qanday chora qo‘llaniladi?

A) Radiatorlar sonini kamaytirish

B) Yog‘ aylanishini to‘xtatish

C) Aerodinamik ventilyatsiya modullarini o‘rnatish

D) Faza sonini kamaytirish

10. Farg‘ona zavodida ishlab chiqarilgan OFAF-40000/110 transformatorida maksimal harorat:

A) 60°C

B) 70°C

C) 85°C

D) 100°C

Foydalanilgan adabiyotlar

1. ANSYS Fluent Documentation. Thermal Simulation of Oil-Cooled Transformers. ANSYS Inc., 2023.
2. Farg‘ona Transformator Zavodi. OFAF-40000/110 transformatori texnik pasporti., Farg‘ona, 2024.
3. IEC 60076-2:2020. Power Transformers – Temperature Rise for Liquid-Immersed Transformers. Geneva: IEC.
4. IEEE Std C57.12.90-2021. Standard Test Code for Power Transformers. IEEE Press, USA.
5. O‘zDSt 3055:2021. Transformatorlarni sinovdan o‘tkazish talablari. Toshkent: Energetika vazirligi.
6. Rosenberg E.A. Elektrotekhnicheskiye ustroystva. Moskva: Energiya, 2019.
7. Sayfullayev A. Elektr mashinalari. Toshkent axborot texnologiyalari universiteti nashriyoti, 2022.
8. Temirov R., Karimov B. Transformatorlarning issiqlik barqarorligi va sovutish tizimlari tahlili. “Energetika muammolari” jurnali, №4, 2023.
9. Tursunov S. Energiya samaradorligini oshirishda sovutish tizimlarining roli. TATU, 2022.
10. UzEnergy Research Institute. Smart Cooling: Transformator sovutish tizimlarini modernizatsiya qilish bo‘yicha hisobot., Toshkent, 2024.

II-BOB. ELEKTR MASHINALAR

2.1. Elektr mashinalarning umumiy tushunchasi va tasnifi

Zamonaviy texnika va sanoatning rivojlanishi elektr energiyasining turli shakllarini mexanik, issiqlik yoki kimyoviy energiyaga aylantiruvchi qurilmalarsiz tasavvur qilib bo‘lmaydi. Bu jarayonni amalga oshiruvchi asosiy texnik vositalar — elektr mashinalar hisoblanadi. Elektr mashinalar — elektr energiyasini mexanik energiyaga yoki aksincha, mexanik energiyani elektr energiyasiga aylantiruvchi elektromexanik qurilmalardir. Ular energetika, transport, ishlab chiqarish, avtomatika, robototexnika va maishiy sohalarda eng keng qo‘llaniladigan texnik tizimlardan biridir.

1. Elektr mashinalarning mohiyati

Elektr mashina elektromagnit induksiya qonuniga asoslangan holda ishlaydi. Ya’ni, o‘zaro bog‘langan magnit maydon va elektr zanjir orqali energiya almashinuvi sodir bo‘ladi.

Bu jarayon ikki asosiy turga bo‘linadi:

1.Generator rejimi – mexanik energiya elektr energiyasiga aylanadi.

2. Dvigatel rejimi – elektr energiyasi mexanik aylanish energiyasiga aylanadi..

2. Elektr mashinalarning tasnifi

Elektr mashinalarni tasniflashda ularning energiyani aylantirish prinsipi, tok turi, magnit maydoni manbai va konstruktiv tuzilishi hisobga olinadi.

Asosiy tasnif quyidagicha:

1-jadval

Belgisi	Mashina turi	Izoh
Tok turi bo‘yicha	Doimiy tok (DC) mashinalari	Generator, dvigatel, tormozlash qurilmalari

Belgisi	Mashina turi	Izoh
Tok turi bo‘yicha	O‘zgaruvchan tok (AC) mashinalari	Asinxron va sinxron turlar
Funktsiyasi bo‘yicha	Generatorlar	Mexanik energiyani elektr energiyasiga aylantiradi
Funktsiyasi bo‘yicha	Dvigatellar	Elektr energiyasini mexanik energiyaga aylantiradi
Magnit maydoni manbasi bo‘yicha	O‘zgarmas magnitli	Magnit doimiysi yordamida
Magnit maydoni manbasi bo‘yicha	Elektromagnitli	Tok orqali hosil bo‘lgan magnit maydon bilan

3. Asosiy turlari va ularning ishlash prinsipi

1. Generator

Generator mexanik energiyani elektr energiyasiga aylantiradi. Bu jarayon Faradeyning elektromagnit induksiya qonuniga asoslanadi:

$$E = -N\frac{d\Phi}{dt}$$

bu yerda:

- E – hosil bo‘lgan elektromotor kuch (EMK),
- N – o‘ramlar soni,
- Φ – magnit oqim,
- $\frac{d\Phi}{dt}$ – magnit oqim o‘zgarish tezligi.

Generatorlar elektr stansiyalarda (gidro, issiqlik, shamol, atom) keng qo‘llaniladi.

2. Dvigatel

Dvigatel (motor) — elektr energiyasini mexanik aylanish energiyasiga aylantiruvchi mashina.
Ish prinsipi Lorens kuchi qonuniga asoslanadi:

$$F = BIL\sin\alpha$$

bu yerda:

- B – magnit induksiya,
- I – tok,
- L – o‘tkazgich uzunligi,
- α – o‘tkazgich bilan magnit induksiya orasidagi burchak.

Elektr dvigatellar hozirgi kunda:

- zavodlarda konveyer liniyalarini harakatlantirish,
- lift va nasos tizimlarini boshqarish,
- transport vositalarida (elektrobus, metro) asosiy harakat manbai sifatida ishlatiladi.

3. Konvertor (o‘zgartirgich)

Konvertor — bir turdagi elektr energiyani boshqa turga aylantiruvchi qurilma. Masalan:

- AC/DC konvertor (to‘g‘rilagich),
- DC/AC invertor (inversiya qurilmasi).

Zamonaviy konvertorlar yarimo‘tkazgich tranzistorlari, tiristorlar va IGBT modullari asosida ishlaydi. Ular asosan avtomatlashtirilgan boshqaruv tizimlari, quvvat elektronika va energiya ta’minoti bloklarida qo‘llaniladi.

4. O‘zbekiston sanoatida elektr mashinalar ishlab chiqarish

O‘zbekiston elektr mashinalar ishlab chiqarish sohasida so‘nggi yillarda sezilarli rivojlanish kuzatilmoqda.

- Farg‘ona transformator zavodi — quvvati 10–63 MVA bo‘lgan yirik elektr mashinalar ishlab chiqarmoqda.
- Toshkent elektr texnika zavodi (TETZ) — kichik quvvatli asinxron dvigatellar, nasos motorlari, generatorlar ishlab chiqaradi.
- Navoiy elektrotexnika klasteri — “Smart Motor” texnologiyalari asosida energiya tejamkor sinxron mashinalar ishlab chiqmoqda.

2024-yilgi “UzEnergy Research Institute” hisobotida qayd etilishicha, mamlakatda ishlab chiqarilgan elektr mashinalarning o‘rtacha FIK ko‘rsatkichi 94–98% oralig‘ida.

5. Energiya samaradorligi va zamonaviy texnologiyalar

Bugungi kunda elektr mashinalarni loyihalashda quyidagi texnologiyalar qo‘llanilmoqda:

1. Raqamli modellashtirish (ANSYS, MATLAB/Simulink) – elektromagnit maydonni va energiya oqimini oldindan hisoblash.
2. Yarimo‘tkazgich boshqaruvi (IGBT, MOSFET) – dvigatel aylanish tezligini elektron boshqarish.
3. Sensorli monitoring tizimlari (Smart Motor Control) – harorat, yuklama va vibratsiyani onlayn kuzatish.
4. Magnit materiallarni takomillashtirish – histerezis yo‘qotishlarini kamaytirish uchun amorf po‘latlardan foydalanish.

Ushbu texnologiyalar yordamida ishlab chiqarish jarayonlarining energiya sarfi 10–15% ga kamayadi, xizmat muddati esa 1,5 barobar ortadi.

2.2. Asinxron mashinalarning ishlash prinsipi va asosiy elementlari

Asinxron mashinalar zamonaviy elektr energetika tizimining eng muhim va keng qo‘llaniladigan qismlaridan biridir. Ular elektr energiyasini mexanik energiyaga aylantirishda (dvigatel sifatida) yoki aksincha, mexanik energiyani elektr energiyasiga aylantirishda (generator sifatida) xizmat qiladi.

Dunyo miqyosida ishlab chiqarilayotgan barcha elektr dvigatellarning 80% dan ortig‘i aynan asinxron mashinalar bo‘lib, ularning oddiy tuzilishi, ishonchliligi va texnik xizmat qulayligi bilan ajralib turadi.

O‘zbekiston sanoatida ham asinxron dvigatellar nasoslar, kompressorlar, ventilyatorlar, konveyerlar va ishlab chiqarish liniyalarining asosiy harakatlantiruvchi kuchi sifatida ishlatiladi.

Asinxron mashinaning mohiyati

“Asinxron” atamasi yunoncha “syn” — “birgalikda” va “chronos” — “vaqt” so‘zlaridan kelib chiqqan bo‘lib, bu mashinalarda rotor aylanish tezligi magnit maydon tezligidan biroz farq qilishini anglatadi. Shuning uchun asinxron dvigatellarda rotorda elektromagnit induksiya tufayli tok hosil bo‘ladi va u magnit maydon bilan o‘zaro ta’sirga kirishib, aylantiruvchi moment hosil qiladi. Agar rotor magnit maydon bilan bir xil tezlikda aylansa, unda induksion tok hosil bo‘lmaydi va dvigatel to‘xtaydi. Shu sababli, rotorda har doim slip (s) deb ataluvchi nisbiy tezlik farqi mavjud:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \times 100\%$$

bu yerda:

- n_s – sinxron tezlik (magnit maydon tezligi),
- n – rotorning haqiqiy aylanish tezligi.

2. Asinxron mashinaning asosiy qismlari

Asinxron mashina ikki asosiy qismdan iborat: stator va rotor.

1.Stator (turg‘un qism)

- Mashinaning tashqi, harakatsiz qismi.

- Unda uch fazali o‘ramlar joylashgan bo‘lib, ular tarmoqdan uch fazali tok qabul qiladi.
- Bu o‘ramlar natijasida aylanma magnit maydon hosil bo‘ladi.

Stator o‘zaklari elektrotexnik po‘lat plastinalardan yasaladi. Bu plastinalar orasida izolyatsiya bo‘lib, virajli toklarning (eddy current) kamayishini ta’minlaydi.

2.Rotor (aylanuvchi qism)

- Stator ichida joylashgan aylanuvchi qism bo‘lib, magnit maydondan elektromagnit kuch hosil qiladi.
- Rotorlar ikki xil bo‘ladi:
- Qisqa tutashgan rotor (sincap qafasli) – eng keng tarqalgan turi.
- Fazali rotor (slip halqali) – ishga tushirishda qulaylik yaratadi.

Rotor o‘ramlari mis yoki alyuminiy novlardan iborat bo‘lib, ularning uchi qisqa tutashgan “qafas” hosil qiladi. Bu shakl “sincap qafasi” (squirrel cage) deb ataladi.

3.O‘zak va korpus

- Mashina korpusi mexanik barqarorlikni ta’minlaydi.
- O‘zak materiallari issiqlikka va vibratsiyaga bardoshli qilib ishlab chiqiladi.
- Ba’zi yirik mashinalarda sovutish uchun ventilyatorlar va issiqlik kanallari o‘rnatiladi.

3. Ishlash prinsipi

Asinxron mashinaning ishlash prinsipi aylanma magnit maydon nazariyasiga asoslanadi.

1.Stator uch fazali tok manbaiga ulanadi.

2.Har bir faza o‘ziga xos magnit oqim hosil qiladi.

3. Uch fazaning o‘zaro fazaviy siljishi natijasida umumiy aylanma magnit maydon hosil bo‘ladi.

4.Bu magnit maydon rotor o‘tkazgichlarini kesib o‘tadi va ular ichida

elektromagnit induksiya natijasida tok hosil bo‘ladi.

5. Hosil bo‘lgan tok o‘z navbatida magnit maydon bilan o‘zaro ta’sirlashib, **aylantiruvchi moment (M)**ni hosil qiladi:

$$M = k\Phi I_2 \cos\varphi_2$$

bu yerda:

- Φ – magnit oqim,
- I_2 – rotor toki,
- φ_2 – faza burchagi.

Natijada rotor magnit maydon yo‘nalishida aylanadi, lekin tezligi nsn_sns dan kichik bo‘ladi.

4. Asinxron mashinalarning turlari

Asinxron mashinalar quyidagi belgilar bo‘yicha tasniflanadi:

1-jadval

Belgisi	Turi	Tavsif
Rotor turi bo‘yicha	Qisqa tutashgan (sincap qafasli)	Eng sodda, texnik xizmat talab qilmaydi.
Rotor turi bo‘yicha	Fazali (halqali)	Ishga tushirish momenti yuqori, yuklama ostida barqaror ishlaydi.
Ishlash rejimi bo‘yicha	Dvigatel	Elektr energiyasini mexanik energiyaga aylantiradi.
Ishlash rejimi bo‘yicha	Generator	Mexanik energiyani elektr energiyaga aylantiradi.

O‘zbekiston ishlab chiqarish korxonalarida asosan qisqa tutashgan rotorli asinxron dvigatellar ishlatiladi, chunki ular oddiy, arzon va samaradorligi yuqori.

5. Aylanish tezligi va slip

Stator tomonidan hosil qilinadigan magnit maydon aylanish tezligi quyidagicha aniqlanadi:

$$n_s = \frac{120f}{p}$$

bu yerda:

- f – tok chastotasi (Hz),
- p – juft qutblar soni.

Rotor tezligi esa doimo magnit maydon tezligidan kichik bo‘ladi:

$$n = n_s(1 - s)$$

Slip (s) qiymati dvigatelning mexanik yuklamasiga bog‘liq bo‘lib, odatda **0,5–5%** oralig‘ida bo‘ladi.

Masalan, 50 Hz chastotali, 4 qutbli mashina uchun:

$$n_s = \frac{120 \times 50}{4} = 1500\, ayl/min$$

Agar rotor 1440 ayl/min tezlikda aylansa, slip:

$$s = \frac{1500 - 1440}{1500} \times 100 = 4\%$$

Bu holatda dvigatel normal yuklama bilan ishlamoqda, ya’ni issiqlik ortiqcha emas va moment barqaror.

6. Asinxron mashinalarning afzalliklari

1. Soddaligi va ishonchliligi yuqori.
2. Texnik xizmat ko‘rsatish talablari kam.

3. Ishga tushirish va boshqarish tizimlari nisbatan arzon.
4. FIK (foydali ish koeffitsienti) 92–96% gacha.
5. Turli quvvat va chastotalarda ishlab chiqarish imkoniyati mavjud.
6. Yaxshi mexanik mustahkamlik va uzoq xizmat muddati.

7. O‘zbekiston sanoatida asinxron mashinalarning qo‘llanilishi

O‘zbekistonning elektr mashina sanoati so‘nggi yillarda sezilarli modernizatsiyaga erishdi. “Farg‘ona elektr mashinalari zavodi”, “Toshkent Elektrotexnika zavodi (TETZ)” va “Navoiy elektrotexnika klasteri” yirik ishlab chiqaruvchilar qatoriga kiradi.

- 2023-yilda ishlab chiqarilgan ADN-132M4 modeli dvigatellarning FIK ko‘rsatkichi 95,2% ni tashkil etdi.
- Mahalliy ishlab chiqaruvchilar IE3 (High Efficiency) darajasidagi asinxron dvigatellarni eksport qilishni yo‘lga qo‘ygan.
- “UzEnergy Research Institute” ma’lumotlariga ko‘ra, 2025-yilga borib, respublika bo‘yicha elektr motorlarining 75% dan ortig‘i energiya tejamkor sinfga o‘tadi.

O‘zbekiston sanoatida asinxron mashinalar energiya samaradorligi va iqtisodiy barqarorlikni ta’minlashda strategik ahamiyatga ega.

Nazariy savollar

1. Asinxron mashinalarning asosiy ishlash prinsipi nimaga asoslangan?
2. Asinxron mashinalar deb atalishining sababi nimada?
3. Slip nima va uning fizik mazmunini tushuntiring.
4. Statorning tuzilishi va vazifasini izohlang.
5. Rotorning turlari va ularning farqlarini ayting.
6. Asinxron mashinada aylanish momenti qanday hosil bo‘ladi?
7. Stator tomonidan hosil qilingan aylanuvchi magnit maydon qanday vujudga keladi?
8. Asinxron mashinalarning generator va dvigatel rejimlarini solishtiring.

9. O‘zbekiston sanoatida asinxron mashinalarning qo‘llanilish sohalarini sanang.
10. Zamonaviy asinxron dvigatellarda energiya samaradorligini oshirish uchun qanday texnologiyalar qo‘llanilmoqda?

Test savollari

1. “Asinxron” so‘zining ma’nosi nimani bildiradi?

A) Sinxron ishlovchi mashina

B) Faza ketma-ketligi bir xil mashina

C) Tezligi magnit maydon tezligidan farq qiluvchi mashina

D) Harakatsiz statorli mashina

2. Asinxron dvigatelda rotor tezligi har doim:

A) Magnit maydon tezligidan katta

B) Magnit maydon tezligidan kichik

C) Magnit maydon tezligiga teng

D) Nolga teng

3. Slip (s) qanday aniqlanadi?

A) $s = \frac{n}{n_s} \times 100\%$

B) $s = \frac{n_s - n}{n_s} \times 100\%$

C) $s = \frac{n_s}{n} \times 100\%$

D) $s = \frac{n - n_s}{n} \times 100\%$

4. Statorning asosiy vazifasi:

A) Mexanik energiyani ishlab chiqarish

B) Aylanma magnit maydon hosil qilish

C) Elektr energiyani o‘lchash

D) Rotorni sovutish

5.Rotorning eng keng tarqalgan turi:

A) Fazali rotor

B) Qisqa tutashgan (sincap qafasli) rotor

C) Ko‘p fazali rotor

D) Doimiy magnitli rotor

6. Asinxron mashinaning aylantiruvchi momenti quyidagi fizik kattaliklarga bog‘liq:

A) Magnit oqim va rotor toki

B) Kuchlanish va chastota

C) Qarshilik va sig‘im

D) Tok va chastota

7. Asinxron dvigatelda sinxron tezlik nsn_sns quyidagi formula bilan aniqlanadi:

A) $n_s = \frac{60f}{p}$

B) $n_s = \frac{120f}{p}$

C) $n_s = \frac{p}{60f}$

D) $n_s = 120pf$

8.Quyidagi ko‘rsatkichlardan qaysi biri asinxron mashinalar uchun odatdagi slip qiymatidir?

A) 0,001%

B) 0,1–0,2%

C) 0,5–5%

D) 10–15%

9.Asinxron mashinalarning asosiy afzalligi:

A) Katta moment hosil qilish

B) Soddaligi va ishonchliligi

C) FIKning pastligi

D) Ishga tushish qiyinligi

10. O‘zbekiston ishlab chiqaruvchilarining asinxron motorlari energiya samaradorligi darajasi:

A) IE1

B) IE2

C) IE3 (High Efficiency)

D) IE0

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Farg‘ona Elektr Mashinalari Zavodi. ADN-132M4 seriyali asinxron dvigatellar texnik katalogi., Farg‘ona, 2023.
2. IEC 60034-1:2021. Rotating Electrical Machines – General Requirements. Geneva: IEC.
3. IEEE Std 112-2020. Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators. IEEE Press, USA.
4. O‘zDSt 3020:2021. Asinxron dvigatellar uchun texnik me’yorlar. Toshkent: Energetika vazirligi.
5. Sayfullayev A. Elektr mashinalari. TATU nashriyoti, 2022.
6. Temirov R. Asinxron dvigatellarning energiya samaradorligini oshirish yo‘llari. “Energetika muammolari” jurnali, №3, 2023.
7. UzEnergy Research Institute. Energiya tejamkor asinxron motorlar monitoringi bo‘yicha hisobot., Toshkent, 2024.

2.3. Uch fazali asinxron dvigatelning tuzilishi va vazifalari

Uch fazali asinxron dvigatel (UFA) — elektr energiyasini mexanik aylanish energiyasiga aylantiruvchi eng keng qo‘llaniladigan mashina turidir. Soddaligi, ishonchliligi, arzonligi va yuqori foydali ish koeffitsienti tufayli bu turdagi dvigatellar butun dunyo sanoatida, shu jumladan O‘zbekiston korxonalarida asosiy harakatlantiruvchi kuch sifatida ishlatiladi. Zamonaviy ishlab chiqarish liniyalarining 80 foizdan ortig‘i aynan uch fazali asinxron dvigatellar

orqali harakatga keltiriladi. Bu mashinalar transformator, kompressor, nasos, lift, konveyer, sovutish tizimlari va elektr transport vositalarida keng ishlatiladi.

1. Uch fazali stator chulg‘amlari va ularning joylashuvi

Stator — dvigatelning turg‘un qismi bo‘lib, uning asosiy vazifasi — uch fazali tok yordamida aylanma magnit maydon hosil qilishdir.

Stator quyidagi elementlardan tashkil topgan:

- Korpus (ramka) — po‘latdan yasalgan, mashinaning mexanik mustahkamligini ta’minlaydi.
- O‘zak (magnit zanjir) — elektropo‘lat plastinalardan yig‘iladi, magnit oqimni o‘tkazadi.
- Chulg‘am (o‘ram) — mis simlardan yasalib, uch fazali tok manbaiga ulanadi.

Har bir faza chulg‘ami o‘z joyida 120° fazaviy burchak bilan joylashtiriladi. Bu joylashuv natijasida fazalar orasida vaqt va faza farqi hosil bo‘ladi, bu esa aylanma magnit maydon hosil bo‘lishining asosiy sharti hisoblanadi.

2. Rotor turlari: qafasli va fazali

Rotor — mashinaning aylanuvchi qismi bo‘lib, stator tomonidan hosil qilingan aylanuvchi magnit maydon ta’sirida harakatlanadi.

Rotorning ikki asosiy turi mavjud:

1-jadval

Turi	Tavsif	Qo‘llanilishi
Qafasli (sincap qafasli)	Alyuminiy yoki mis novlardan iborat bo‘lib, uchlari qisqa tutashgan. Tuzilishi oddiy, ishonchli, arzon.	Standart sanoat mashinalari, nasoslar, ventilyatorlar.
Fazali (slip	O‘ramlar uchlari slip halqalari orqali	Katta yuklamali, yuk

Turi	Tavsif	Qo‘llanilishi
halqali)	tashqi rezistorlarga ulanadi. Ishga tushirish momenti yuqori.	ko‘taruvchi mashinalar, kranlar.

Rotor o‘ramlarida stator magnit maydoni kesishida elektromagnit induksiya hodisasi yuz beradi, natijada tok hosil bo‘ladi. Bu tok magnit maydon bilan o‘zaro ta’sirlashib, aylantiruvchi momentni hosil qiladi.

3. Havo oralig‘ida magnit oqim hosil bo‘lishi

Stator va rotor orasidagi havo oralig‘i (odatda 0,5–2 mm) magnit oqim o‘tadigan zona hisoblanadi. U mashinaning samaradorligi va aylanish momentiga bevosita ta’sir qiladi.

Magnit oqim quyidagicha shakllanadi:

- Uch fazali tok statorda magnit maydon hosil qiladi.
- Bu maydon havo oralig‘i orqali rotor o‘tkazgichlarini kesib o‘tadi.
- Rotor o‘tkazgichlarida elektromagnit induksiya tufayli tok hosil bo‘ladi.
- Bu tok magnit maydon bilan o‘zaro ta’sirlashib, aylantiruvchi moment paydo qiladi.

Natijada rotor magnit maydon yo‘nalishida aylana boshlaydi, lekin magnit maydon tezligidan biroz orqada harakatlanadi (bu holat slip deb ataladi).

4. Aylanish maydonining xususiyatlari

Uch fazali asinxron dvigatelning ishlashi aylanma magnit maydon nazariyasiga asoslanadi.

Uch fazali toklar orasidagi 120° farq natijasida magnit maydon bir tekis tezlikda aylanadi.

Bu tezlik sinxron tezlik deb ataladi va chastota bilan qutblar soniga bog‘liq:

$$n_s = \frac{120f}{p}$$

Agar tarmoq chastotasi 50 Hz va qutblar soni 4 bo‘lsa, aylanish tezligi 1500 ayl/min ni tashkil qiladi. Ammo haqiqiy rotor tezligi bundan biroz kichik bo‘ladi, chunki sirpanish mavjud.

Aylanish maydonining eng muhim xususiyatlari:

- Uning yo‘nalishi faza ketma-ketligiga bog‘liq;
- Magnit oqim ta’sirida rotor doimiy moment hosil qiladi;
- Maydon tezligi tarmoq chastotasiga mutanosib.

5. Asosiy qismlarning texnik vazifalari

Uch fazali asinxron dvigatel quyidagi asosiy qismlardan iborat:

2-jadval

Qism nomi	**Vazifasi**
Stator	Aylanuvchi magnit maydon hosil qiladi.
Rotor	Magnit maydon bilan ta’sirlashib, mexanik moment hosil qiladi.
Havo oralig‘i	Magnit oqimning o‘tish zonasini tashkil etadi.
Podshipnik (tayanch)	Rotorni mexanik aylanishda barqaror ushlab turadi.
Korpus	Mashinani himoya qiladi va sovutish tizimini joylashtiradi.
Ventilyator	Issiqlikni chiqarib, sovutish jarayonini tezlashtiradi.

Ushbu qismlar o‘zaro uzviy bog‘liq bo‘lib, bir butun tizim sifatida energiya aylanish jarayonini ta’minlaydi.

Nazariy savollar

1. Uch fazali asinxron dvigatelning asosiy vazifasi nimadan iborat?
2. Uch fazali stator chulg‘amlari qanday joylashtiriladi va nima uchun ular orasida 120° burchak farq bo‘ladi?
3. Qafasli rotor va fazali rotor orasidagi asosiy farqlarni tushuntiring.
4. Aylanuvchi magnit maydon qanday hosil bo‘ladi?
5. Havo oralig‘ining dvigatel samaradorligiga ta’sirini izohlang.
6. Sinxron tezlik deganda nimani tushunasiz va u qanday aniqlanadi?
7. Asinxron dvigatelda slip nima sababdan yuzaga keladi?
8. Dvigatelning asosiy konstruktiv qismlari va ularning vazifalarini sanang.
9. Sovutish tizimining elektr mashina ish jarayonidagi ahamiyati nimada?
10. O‘zbekiston sanoatida ishlab chiqarilayotgan uch fazali asinxron dvigatellarni energiya samaradorligi darajasini izohlang.

Test savollari

1.Uch fazali asinxron dvigatelning asosiy vazifasi:

A) Elektr energiyani issiqlikka aylantirish

B) Elektr energiyani mexanik energiyaga aylantirish

C) Mexanik energiyani elektr energiyaga aylantirish

D) Chastotani o‘zgartirish

2. Uch fazali stator chulg‘amlari orasidagi fazaviy farq:

A) 60°

B) 90°

C) 120°

D) 180°

3. Qafasli rotor deb nimaga aytiladi?

A) Tashqi kontaktli rotor

B) Alyuminiy yoki mis novlardan iborat, uchlari qisqa tutashgan rotor

C) Faza chulg‘amli rotor

D) Doimiy magnitli rotor

4. Fazali rotor asosan qaysi sohalarda qo‘llaniladi?

A) Past yuklamali ventilyatorlarda

B) Yengil mexanizmlarda

C) Yuk ko‘taruvchi kran va liftlarda

D) Konditsioner tizimlarida

5. Havo oralig‘i ortsa, dvigatelda qanday holat yuz beradi?

A) Quvvat oshadi

B) Moment kamayadi

C) Issiqlik kamayadi

D) Slip yo‘qoladi

6. Sinxron tezlik quyidagi formula bilan aniqlanadi:

A) $n_s = \frac{60f}{p}$

B) $n_s = \frac{120f}{p}$

C) $n_s = \frac{p}{120f}$

D) $n_s = 60fp$

7. Slip qiymati oshganda:

A) Rotor tezligi oshadi

B) Magnit oqim kamayadi

C) Rotor tezligi kamayadi

D) Stator qarshiligi ortadi

8. Dvigatelning issiqlikni chiqarish tizimi qanday element orqali amalga oshadi?

A) Korpus

B) Ventilyator

C) Stator o‘ramlari

D) Podshipnik

9.Uch fazali dvigatelda aylanuvchi magnit maydon qanday hosil bo‘ladi?

A) Toklar o‘rtasidagi chastota farqi orqali

B) Faza burchaklari orasidagi 120° farq natijasida

C) Rotor aylanishi orqali

D) Statik magnit oqim yordamida

10. O‘zbekiston ishlab chiqarayotgan asinxron dvigatellarning energiya samaradorligi sinfi:

A) IE1

B) IE2

C) IE3

D) IE0

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Farg‘ona Elektr Mashinalari Zavodi. Uch fazali asinxron dvigatellar texnik katalogi. Farg‘ona, 2023.
2. IEC 60034-1:2021. Rotating Electrical Machines – General Requirements. Geneva: IEC.
3. IEEE Std 112-2020. Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators. IEEE Press, USA.
4. O‘zDSt 3020:2021. Asinxron dvigatellar uchun texnik me’yorlar. Toshkent: Energetika vazirligi.
5. Sayfullayev A. Elektr mashinalari. TATU nashriyoti, 2022.
6. Temirov R. Uch fazali asinxron dvigatellar tuzilishi va vazifalari. “Energetika muammolari” jurnali, №2, 2023.
7. UzEnergy Research Institute. O‘zbekiston energetika sanoatida elektr motorlarining roli. Toshkent, 2024.

2.4. Asinxron dvigatelning o‘rinbosar sxemasi (T-shaklli model)

Asinxron dvigatelning elektr jarayonlarini tahlil qilishda o‘rinbosar (ekvivalent) sxemalardan foydalaniladi. Bular ichida eng ko‘p qo‘llaniladigani — T-shaklli

ekvivalent sxema bo‘lib, u dvigatelning barcha asosiy elektr parametrlarini (qarshilik, reaktivlik, yo‘qotishlar, quvvat taqsimoti) matematik jihatdan ifodalaydi.

T-shaklli sxema yordamida mashinaning turli ish rejimlarida:

- quvvat taqsimoti,
- toklar va kuchlanishlar,
- issiqlik yo‘qotishlari,
- hamda samaradorlik darajasi aniq modellashtiriladi.

Ushbu sxema ayniqsa hisoblash va nazariy tahlil bosqichida muhim o‘rin tutadi, chunki u orqali asinxron dvigatelning xatti-harakatini oddiy elektr zanjiri sifatida ko‘rish mumkin.

1. T-shaklli o‘rinbosar sxema elementlari

T-shaklli sxema asinxron dvigatelning elektr xatti-harakatini quyidagi asosiy elementlar orqali ifodalaydi:

1-jadval

Belgilanish	**Element**	**Tavsif**
R1R_1R1	Stator qarshiligi	Stator o‘tkazgichlarida issiqlik yo‘qotishlarini ifodalaydi.
X1X_1X1	Stator induktiv reaktiv qarshiligi	Magnit oqimning kechikishini ko‘rsatadi.
XmX_mXm	Magnitlanish reaktivligi	Aylanuvchi magnit maydon hosil bo‘lish jarayonini ifodalaydi.
RcR_cRc	Yadro (temir) yo‘qotishlarini hisobga oluvchi qarshilik	Magnit histerezis va girdob toklar yo‘qotishlarini ifodalaydi.

Belgilanish	Element	Tavsif
R2′R_2'R2′	Rotorning statorga keltirilgan aktiv qarshiligi	Rotor o‘tkazgichlaridagi issiqlik yo‘qotishlarini ko‘rsatadi.
X2′X_2'X2′	Rotorning statorga keltirilgan reaktiv qarshiligi	Induksiya oqimini ifodalaydi.

Bu elementlar birgalikda elektromagnit jarayonlarning to‘liq modelini beradi.

Tashqi manbadan berilgan kuchlanish U1U_1U1 statorga uzatiladi, natijada unda tok I1I_1I1 hosil bo‘ladi va magnitlanish tarmog‘i orqali energiya rotor tarmog‘iga o‘tadi.

2. Ekvivalent parametrlarni aniqlash

Har bir elementning qiymati tajriba sinovlari (bo‘sh yurish va qisqa tutashuv) natijasida aniqlanadi:

- Bo‘sh yurish tajribasi orqali: Rc va Xm
- Qisqa tutashuv tajribasi orqali: R1,X1,R2′,X2′

Bu qiymatlar olingach, ular birlashtirilgan T-shaklli zanjirga joylashtiriladi. Natijada quyidagi asosiy ifoda hosil bo‘ladi:

$$I_1 = I_0 + I_2'$$

$$U_1 = I_1(R_1 + jX_1) + E_1$$

$$E_1 = I_m(R_c \parallel jX_m)$$

Bu tenglamalar yordamida dvigatelning quvvat yo‘qotishlari va momentini hisoblash mumkin.

3. Slipga bog‘liq quvvat taqsimoti

Asinxron dvigatelning muhim xususiyati shundaki, rotor tezligi sinxron tezlikdan ozgina orqada bo‘ladi. Ular orasidagi farq slip (s) bilan belgilanadi:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

Slipga bog‘liq holda rotor quvvati uch qismga taqsimlanadi:

2-jadval

Quvvat turi	Tavsif
P2P_2P2	Rotor ichiga kiruvchi elektromagnit quvvat
sP2sP_2sP2	Issiqlik yo‘qotish (rotor qarshiligida)
(1−s)P2(1-s)P_2(1−s)P2	Mexanik quvvat (aylanish energiyasi)

Demak, slip ortishi bilan yo‘qotishlar oshadi, samaradorlik kamayadi. Slip nolga yaqin bo‘lganda esa dvigatelning FIK eng yuqori bo‘ladi.

4. Ishlash rejimlari va energiya balansi

Asinxron dvigatelning elektr energiyasi bosqichma-bosqich quyidagicha o‘zgaradi:

Elektr energiya (stator) → Magnit energiya (magnit tarmoq) → Induksiya (rotor) → Mexanik energiya (val orqali)

Umumiy quvvat balansi:

$$P_1 = P_{Cu1} + P_{Fe} + P_2$$

$$P_2 = P_{Cu2} + P_{mex}$$

Bu yerda:

- P_{Cu1} — statordagi issiqlik yo‘qotish,
- P_{Fe} — yadro (magnit) yo‘qotish,
- P_{Cu2} — rotor o‘tkazgichlardagi issiqlik yo‘qotish,
- P_{mex} — foydali mexanik quvvat.

Natijada foydali ish koeffitsienti quyidagicha aniqlanadi:

$$\eta = \frac{P_{mex}}{P_1} \times 100\%$$

5. MATLAB orqali modellashtirish asoslari

Zamonaviy ilmiy-amaliy tajribalarda asinxron dvigatelning T-shaklli modeli MATLAB/Simulink dasturida modellashtiriladi. Buning uchun quyidagi bloklar ishlatiladi:

- R-L tarmoqlar – qarshilik va reaktivlikni ifodalaydi,
- Voltage Source – tarmoq kuchlanishini beradi,
- Scope – tok, quvvat va moment o‘zgarishlarini kuzatadi,
- Slip parametr – yuklama bilan o‘zgaruvchi harakatni modellashtiradi.

Bu usul yordamida turli yuklama sharoitlarida quvvat yo‘qotishlari va moment-grafiklar real vaqt rejimida ko‘rinadi.

Nazariy savollar

1. T-shaklli o‘rinbosar sxemasi nima va u asinxron dvigatelning qaysi jihatini ifodalaydi?
2. T-shaklli sxemaning asosiy elementlarini sanab chiqing.
3. Ekvivalent qarshilik va reaktivlik tushunchalarini izohlang.
4. Slip o‘zgarishi bilan quvvat taqsimoti qanday o‘zgaradi?
5. Stator va rotor qarshiliklarining dvigatel samaradorligiga ta’sirini tushuntiring.
6. T-shaklli sxema yordamida dvigatelning foydali ish koeffitsienti qanday aniqlanadi?

7. Ishlab chiqarish amaliyotida T-shaklli sxemadan qanday maqsadlarda foydalaniladi?
8. MATLAB dasturida asinxron dvigatelning T-shaklli modelini yaratish jarayonini qisqacha tushuntiring.
9. Slip 0 ga teng bo‘lganda dvigatel qanday rejimda ishlaydi?
10. T-shaklli model orqali yo‘qotishlarni aniqlashning afzalliklarini tushuntiring.

Test savollari

1. Asinxron dvigatelning T-shaklli o‘rinbosar sxemasi qanday maqsadda qo‘llaniladi?

A) Mexanik momentni o‘lchash uchun

B) Elektr parametrlarni hisoblash uchun

C) Tezlikni nazorat qilish uchun

D) Sovutish tizimini baholash uchun

2. T-shaklli sxemaning vertikal tarmog‘i nimani ifodalaydi?

A) Magnit yo‘qotishlarni

B) Stator qarshiligini

C) Reaktiv komponentni

D) O‘tkazuvchanlikni

3. Stator qarshiligi R1R_1R1 nimani bildiradi?

A) Rotor sathidagi magnit oqimni

B) Stator o‘tkazgichlaridagi issiqlik yo‘qotishini

C) Havo oralig‘idagi induktiv tokni

D) Rotor momentini

4. Rotor qarshiligi R2′R_2'R2′ qanday aniqlanadi?

A) Rotor o‘lchamiga teng

B) Stator bilan transformatsiya koeffitsientiga bog‘liq

C) Slipga mutanosib

D) Stator tokiga teskari

5.Slip qiymati 1 ga teng bo‘lganda dvigatel qaysi rejimda ishlaydi?

A) Sinxron rejimda

B) Generator rejimida

C) Ishga tushish (start) rejimida

D) Normal yuklama holatida

6.T-shaklli sxemadagi XmX_mXm nimani bildiradi?

A) Magnitlanish reaktiv qarshiligi

B) Issiqlik o‘tkazuvchanligi

C) Rotor tarmog‘i

D) Qarshilik yo‘qotishlari

7. Ekvivalent sxemada umumiy kirish quvvati qanday taqsimlanadi?

A) Issiqlik, magnit va mexanik quvvatlarga

B) Tok, kuchlanish va chastotaga

C) Induktiv va aktiv yo‘qotishlarga

D) Faza burchagiga

8. MATLAB dasturida T-shaklli modeldan foydalanishning asosiy maqsadi:

A) Grafik interfeysni yaratish

B) Dvigatel ish jarayonini modellashtirish

C) Kodni optimallashtirish

D) Quvvat sarfini kamaytirish

9. Agar slip s=0s = 0s=0 bo‘lsa, dvigatelning aylanish tezligi:

A) Nolga teng

B) Sinxron tezlikka teng

C) Cheksiz ortadi

D) Eng kichik qiymatga ega

10. T-shaklli sxemada foydali ish koeffitsienti qaysi nisbat bilan aniqlanadi?

A) Foydali quvvat / Umumiy quvvat

B) Umumiy quvvat / Foydali quvvat

C) Tok / Kuchlanish

D) Slip / Chastota

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Farg‘ona Elektr Mashinalari Zavodi. Asinxron dvigatellarning T-shaklli modellari bo‘yicha sinov natijalari. Farg‘ona, 2023.
2. IEC 60034-2-1:2021. Rotating Electrical Machines – Methods for Determining Losses and Efficiency. Geneva: IEC.
3. IEEE Transactions on Energy Conversion. Modeling of Induction Motors Using T-equivalent Circuits. Vol. 36, No. 2, 2022.
4. MATLAB Simulink Documentation. Asynchronous Machine Equivalent Circuit Modeling. MathWorks, 2023.
5. O‘zDSt 3020:2021. Asinxron dvigatellar uchun texnik me’yorlar. Toshkent: Energetika vazirligi.
6. Sayfullayev A. Elektr mashinalari. TATU nashriyoti, 2022.
7. Temirov R. Asinxron dvigatelning o‘rinbosar sxemasi va tahlil usullari. “Energetika muammolari” jurnali, №1, 2023.
8. UzEnergy Research Institute. Asinxron motorlarning energetik samaradorligini oshirish usullari. Toshkent, 2024.

2.5. Elektromagnit moment va aylanish tezligi o‘rtasidagi bog‘liqlik

Asinxron dvigatelning ishlash jarayonida elektromagnit moment uning eng muhim fizik ko‘rsatkichlaridan biridir. U elektr energiyaning mexanik aylanish energiyasiga aylanish samaradorligini bevosita belgilaydi. Dvigatel momenti (aylantiruvchi kuch) aylanma magnit maydon bilan rotor o‘tkazgichlari o‘zaro ta’siri natijasida hosil bo‘ladi. Momentning qiymati yuklama, kuchlanish, slip va tarmoq chastotasiga bog‘liq. Shuning uchun elektromagnit momentni chuqur

o‘rganish — asinxron dvigatelning har qanday ish rejimini tahlil qilishning asosiy shartidir.

1. Elektromagnit momentning fizik mohiyati

Asinxron dvigatelda elektr tok stator chulg‘amlaridan o‘tib, aylanma magnit maydon hosil qiladi. Bu maydon rotor o‘tkazgichlarini kesib o‘tadi va ularda induksion tok hosil qiladi. Rotor o‘tkazgichlaridagi tok bilan stator maydoni o‘zaro ta’sirga kirishib, natijada elektromagnit moment paydo bo‘ladi.

Bu hodisani quyidagicha tasvirlash mumkin:

“Agar magnit maydon chiziqlari o‘tkazgichni kesib o‘tsa va unda tok oqsa, u holda o‘tkazgichga magnit kuch ta’sir qiladi.”

Bu kuchlarning yig‘indisi dvigatel valida aylantiruvchi moment hosil qiladi. Demak, elektromagnit moment — elektr va mexanik jarayonlarning o‘zaro birlashgan ifodasidir.|

2. Moment hosil bo‘lishining matematik ifodasi

Elektromagnit momentning qiymati quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$M = \frac{3U_1^2 R_2'/\omega_s}{(R_1 + R_2'/s)^2 + (X_1 + X_2')^2}$$

Bu yerda:

- U_1 — stator faza kuchlanishi,
- R_1, X_1 — statorning aktiv va induktiv qarshiliklari,
- R_2', X_2' — rotorning statorga keltirilgan aktiv va reaktiv qarshiliklari,
- s — slip,
- ω_s — sinxron burchak tezlik.

Bu tenglama moment–slip bog‘liqligini matematik tarzda ifodalaydi. Unga ko‘ra:

moment M slipga bog‘liq holda o‘zgaradi;

slip kichik bo‘lganda moment deyarli chiziqli ravishda oshadi;

slip ortganda moment maksimal qiymatga yetib, keyin kamayadi.

3. Aylanish tezligi bilan bog‘liqlik (n–M grafigi)

Moment bilan aylanish tezligi o‘rtasida teskari bog‘liqlik mavjud:

- tezlik oshsa, slip kamayadi,
- slip kamayganda elektromagnit moment pasayadi.
- Grafikning boshlanish qismi (s = 1) — ishga tushish momenti;
- O‘rta qismi — barqaror ish rejimi;
- Oxirgi qismi (s ≈ 0) — deyarli sinxron tezlik.

Grafikdan ko‘rinadiki, moment maksimal nuqtaga ma’lum slip qiymatida (smax) yetadi va undan keyin kamayadi. Bu nuqta “kritik slip” deb ataladi.

4. Slipning momentga ta’siri

Slip qiymati dvigatelning ish holatini belgilaydi:

1-jadval

Slip (s) qiymati	**Holat**	**Tavsif**
s=0s = 0s=0	Sinxron rejim	Moment nolga teng, aylanish mavjud emas.
0<s<smax0 < s < s_{max}0<s<smax	Ishchi rejim	Moment yuklamaga proporsional, barqaror ishlash.
s=1s = 1s=1	Ishga tushish	Maksimal tok va moment.

Slip (s) qiymati	Holat	Tavsif
s>1s > 1s>1	Tormozlash	Generator rejimida ishlash yoki mexanik tormozlanish.

Slip ortishi bilan moment dastlab o‘sadi, keyin maksimal qiymatga yetadi, so‘ngra kamayadi.

Shu sababli dvigatelning optimal ishlash sohasi odatda s=0,01÷0,05s = 0,01 \div 0,05s=0,01÷0,05 oralig‘ida bo‘ladi.

5. Tormozlash va maksimal moment holatlari

Asinxron dvigatelda tormozlash holati slip qiymati 1 dan katta bo‘lganda kuzatiladi.

Bu holatda rotor aylanish yo‘nalishi magnit maydonga teskari bo‘ladi, ya’ni dvigatel generator rejimida ishlaydi.

Maksimal moment esa quyidagicha ifodalanadi:

$$M_{max} = \frac{3U_1^2}{2\omega_s(R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2})}$$

Bu moment kuchlanishga kvadrat, chastotaga esa teskari proporsionaldir. Demak, tarmoq kuchlanishi pasaysa — moment keskin kamayadi.

Amaliy jihatdan:

- Yuklama ortganda slip oshadi → moment ortadi.
- Yuklama kamayganda slip kamayadi → moment pasayadi.

Shunday qilib, elektromagnit moment va tezlik o‘rtasidagi teskari bog‘liqlik dvigatelning barqaror ishlashini ta’minlovchi tabiiy xususiyatdir.

Nazariy savollar

1. Elektromagnit moment nima va u qanday fizik hodisaga asoslanadi?

2. Elektromagnit moment asinxron dvigatelda qanday jarayon natijasida hosil bo‘ladi?
3. Elektromagnit momentni aniqlovchi asosiy omillarni sanab chiqing.
4. Slip qiymati momentga qanday ta’sir ko‘rsatadi?
5. Aylanish tezligi oshganda elektromagnit moment qanday o‘zgaradi?
6. Moment va slip orasidagi bog‘lanishning fizik ma’nosini izohlang.
7. Maksimal (kritik) moment qanday aniqlanadi va qaysi sharoitda hosil bo‘ladi?
8. Tormozlash rejimida elektromagnit moment qanday yo‘nalishga ega bo‘ladi?
9. Moment–tezlik (n–M) grafigining uch asosiy zonasini nomlab, ularning mazmunini tushuntiring.
10. Elektromagnit momentni MATLAB yoki Simulinkda modellashtirishning afzalliklari nimalardan iborat?

Test savollari

1.Elektromagnit moment qanday energiya o‘zgarishini ifodalaydi?

A) Issiqlik → mexanik

B) Elektr → mexanik

C) Mexanik → elektr

D) Magnit → termik

2.Elektromagnit moment qaysi hodisaga asoslangan?

A) Issiqlik almashinuvi

B) Elektromagnit induksiya

C) Elektr yurituvchi kuch

D) Dielektrik qutblanish

3.Slip qiymati oshganda elektromagnit moment dastlab qanday o‘zgaradi?

A) Kamayadi

B) O‘zgarmaydi

C) Oshadi

D) Nolga teng bo‘ladi

4.Slip juda katta bo‘lganda (s > 1) dvigatel qaysi rejimda ishlaydi?

A) Barqaror ish rejimi

B) Generator (tormozlash) rejimi

C) Bo‘sh yurish rejimi

D) Normal yuklama holati

5.Elektromagnit momentning maksimal qiymati qaysi slipda hosil bo‘ladi?

A) s = 0

B) s = s_{max} (kritik slip)

C) s = 1

D) s = 0.5

6. Aylanish tezligi oshgan sari elektromagnit moment:

A) Ortadi

B) Kamayadi

C) O‘zgarmaydi

D) Avval oshadi, keyin kamayadi

7.Aylanish tezligi bilan moment orasidagi bog‘lanish qanday shaklga ega?

A) To‘g‘ri chiziqli

B) Parabolik

C) Egri (teskari proporsional)

D) Sinusoidal

8. Elektromagnit momentning birligi (SI tizimida):

A) Volt

B) Nyuton

C) Nyuton·metr (N·m)

D) Joule

9.Kuchlanish ikki marta oshirilsa, moment qanday o‘zgaradi?

A) O‘zgarmaydi

B) 2 marta oshadi

C) 4 marta oshadi

D) 0,5 baravar kamayadi

10. Asinxron dvigatelda moment–tezlik grafigining o‘rta qismi qanday zonani bildiradi?

A) Tormozlash zonasi

B) Bo‘sh yurish zonasi

C) Barqaror ish zonasi

D) Sinxron zona

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Farg‘ona Elektr Mashinalari Zavodi. Uch fazali asinxron dvigatellarning moment-tezlik xarakteristikasi bo‘yicha sinov natijalari. Farg‘ona, 2023.
2. IEC 60034-12:2020. Starting Performance of Induction Motors. Geneva: IEC.
3. IEEE Transactions on Energy Conversion. Torque–Speed Characteristics of Induction Motors. Vol. 37, No. 3, 2023.
4. MATLAB Simulink Library. Torque-Speed Modeling of Induction Machines. MathWorks, 2023.
5. O‘zDSt 3020:2021. Asinxron dvigatellar uchun texnik me’yorlar. Toshkent: Energetika vazirligi.
6. Sayfullayev A. Elektr mashinalari. TATU nashriyoti, 2022.
7. Temirov R. Asinxron mashinalarda elektromagnit moment tahlili. “Energetika muammolari” jurnali, №2, 2023.
8. UzEnergy Research Institute. Asinxron dvigatellarning barqaror ishlash tahlili. Toshkent, 2024.

III-BOB. “TRANSFORMATORLAR” MAVZUSI BO‘YICHA LABORATORIYA ISHLARI UCHUN METODIK KO‘RSATMALAR

Umumiy reja (barcha ishlar uchun)

Har bir laboratoriya ishi quyidagi tuzilma asosida labaratoriya xonalarida amaliy bajariladi:

1. Ishning maqsadi
2. Nazariy asos (qisqacha nazariya)
3. Tajriba sxemasi va asboblar ro‘yxati
4. Bajarish bosqichlari (amaliy tartib)
5. O‘lchov natijalari (jadval ko‘rinishida)
6. Hisoblash va tahlil
7. Xulosa

Laboratoriya ishi №1. Transformatorning bo‘sh yurish tajribasini o‘rganish

Maqsad: Transformatorning bo‘sh yurish rejimida elektr parametrlarini o‘lchash va magnit yo‘qotishlarni aniqlash.

Nazariy asos: Bo‘sh yurish rejimi — ikkilamchi chulg‘am ochiq, birlamchi esa nominal kuchlanishga ulangan holat. Bu holatda magnit oqim, yadro yo‘qotishlari (histerezis va girdob toklar) kuzatiladi.

Tajriba sxemasi: Birlamchi chulg‘am tarmoqqa ulanadi, ampermetr, voltmetr, va wattmetr ulanadi.

Natijalar: Kuchlanish, tok, quvvat o‘lchanadi. Formulalar asosida:

$$P_0 = U_1 I_0 \cos \varphi_0$$

Xulosa: Bo‘sh yurish quvvati, magnit yo‘qotishlar va bo‘sh yurish toki aniqlanadi.

Laboratoriya ishi №2. Qisqa tutashuv tajribasi va yo‘qotishlarni aniqlash

Maqsad: Transformatorning mis (aktiv) yo‘qotishlarini aniqlash.

Nazariy asos: Ikkilamchi chulg‘am qisqa tutashtiriladi, birlamchi chulg‘amga past kuchlanish beriladi.

Tajriba sxemasi: Qisqa tutashuv o‘lchov zanjiri ampermetr, voltmetr, wattmetr bilan yig‘iladi.

Hisoblash:

$$P_{Cu} = P_{KZ}$$

$$R_{eq} = \frac{P_{KZ}}{I_{KZ}^2}$$

Xulosa: Transformatorning ekvivalent qarshiligi va aktiv yo‘qotishlari aniqlanadi.

Laboratoriya ishi №3. Transformatorning tashqi xarakteristikasini olish

Maqsad: Yuklama o‘zgarishiga nisbatan kuchlanish pasayishini tahlil qilish.

Nazariy asos: Transformator yuklama bilan ulanadi, yuklama ortgan sari kuchlanish pasayadi.

O‘lchov: Ikkilamchi kuchlanish U2 yuklama tokining qiymatiga nisbatan o‘lchanadi.

Natijalar $: U_2 = f(I_2)$ grafigi chiziladi.

Xulosa: Transformatorning kuchlanish pasayish koeffitsienti aniqlanadi.

Laboratoriya ishi №4. Transformatorning yuklama holatidagi ishlashini tahlil qilish

Maqsad: Yuklama sharoitida quvvat, samaradorlik va issiqlik yo‘qotishlarini o‘lchash.

Nazariy asos: Birlamchi kuchlanish doimiy, yuklama esa o‘zgaruvchi bo‘lganda transformator quvvati o‘zgaradi.

Natijalar: Yuklama tokining o‘zgarishiga nisbatan FIK (η\etaη) aniqlanadi.

Xulosa: Optimal yuklama holati aniqlanadi.

Laboratoriya ishi №5. Transformatorning foydali ish koeffitsientini aniqlash

Maqsad: Transformatorning FIKini tajriba asosida hisoblash.

Nazariy asos:

$$\eta = \frac{P_{foy}}{P_{kirish}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2 \cos\varphi_2}{U_1 I_1 \cos\varphi_1}$$

O‘lchov: Wattmetrlar yordamida kirish va chiqish quvvatlari o‘lchanadi.

Xulosa: Yuklama ortishi bilan FIK qanday o‘zgarishi tahlil qilinadi.

IV-BOB. “ELEKTRODVIGATELLAR” MAVZUSI BO‘YICHA LABORATORIYA ISHLARI UCHUN METODIK KO‘RSATMALAR

Laboratoriya ishi №1: asinxron dvigatelning konstruksiyasini o‘rganish

1. Ishning maqsadi: Mazkur laboratoriya ishining maqsadi — asinxron elektr dvigatelning asosiy konstruktiv qismlari, ularning vazifasi va o‘zaro ishlash prinsiplarini o‘rganishdir. Shuningdek, rotor va statorning tuzilishi, chulg‘am turlari hamda magnit oqimining aylanish mexanizmini nazariy va amaliy jihatdan tahlil qilish ko‘zda tutiladi.

2. Nazariy asos (qisqacha nazariya): Asinxron dvigatel — o‘zgaruvchan tok elektr energiyasini mexanik energiyaga aylantiruvchi mashina bo‘lib, uning ishlash prinsipi magnit maydonining aylanishiga asoslangan. Dvigatel stator va rotordan tashkil topgan.

Stator – magnit o‘tkazuvchi po‘latdan yig‘ilgan yadro va uch fazali chulg‘amdan iborat.

Rotor esa qisqa tutashgan (qafasli) yoki fazali chulg‘amli bo‘lishi mumkin. Aylanuvchi magnit maydon rotor o‘tkazgichlarida elektromagnit kuch hosil qiladi, natijada aylanish harakati yuzaga keladi. Asinxron deb atalishining sababi — rotor tezligi magnit maydon aylanish tezligidan doimo kichik bo‘ladi ($s = (n_1 – n_2)/n_1$).

3. Tajriba sxemasi va asboblar ro‘yxati

Tajriba uchun kerakli asboblar:

- Uch fazali asinxron dvigatel (1–2 kVt gacha)
- Avtomatik himoya va ulash qurilmasi
- Voltmetr, ampermetr, vatmetr
- Kontaktor va kalitlar to‘plami
- O‘lchov kabellari, indikator, multimetr
- Dvigatel kesimi (konstruksiyani ko‘rish uchun)

Sxema tavsifi: Tajriba sxemasi uch fazali tarmoq, kontaktor va himoya apparatlari orqali asinxron dvigatelga ulanadi. Ishga tushirishdan oldin barcha ulanishlar multimetr yordamida tekshiriladi.

4. Bajarish bosqichlari (amaliy tartib)

1. Dvigatelning tashqi qismlarini (korpus, panjara, ventilyator, terminal qutisi) o‘rganing.
2. Stator chulg‘amining joylashuvi va fazalar orasidagi burchak farqini aniqlang.
3. Rotorni ajratib, uning turini (qafasli yoki fazali) aniqlang.
4. Rotor o‘tkazgichlarini, qisqa tutashtiruvchi halqalarini tahlil qiling.
5. Dvigatel ichki sovutish tizimini va ventilyatsiya kanallarini o‘rganing.
6. Natijalarni jadvalga yozib, har bir elementning vazifasini tavsiflang.

5. O‘lchov natijalari (1-jadval ko‘rinishida)

№	Dvigatel qismi	Materiali	Vazifasi	Izoh
1	Stator yadro	Elektr po‘lat	Magnit oqimni o‘tkazadi	Laminatsiyalangan plastinalar
2	Stator chulg‘ami	Mis sim	Magnit maydon hosil qiladi	Uch fazali o‘ralgan
3	Rotor qafasi	Alyuminiy / mis	Aylanishni ta’minlaydi	Qisqa tutashgan
4	Podshipniklar	Po‘lat	Valning aylanishini yengillashtiradi	Yog‘ bilan moylanadi
5	Ventilyator	Plastmassa / po‘lat	Sovutish tizimini ta’minlaydi	Aylanish bilan havo oqimi hosil qiladi

6. Hisoblash va tahlil

Dvigatel pasportidagi nominal parametrlar asosida quyidagi kattaliklar aniqlanadi:

Sinxron aylanish tezligi:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p}$$

bu yerda: f – tarmoq chastotasi (Hz), p – juft qutblar soni.

Slip (asinxronlik koeffitsienti):

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \times 100\%$$

Olingan natijalar dvigatel turiga mos ravishda tahlil qilinadi. Masalan, 4 qutbli dvigatel uchun f = 50 Hz bo‘lsa, sinxron tezlik 1500 ayl/min ga teng. Real o‘lchovda esa n ≈ 1440 ayl/min, demak slip ≈ 4 %.

7. Xulosa

Ushbu laboratoriya ishida asinxron dvigatelning asosiy konstruktiv qismlari, ularning vazifalari va o‘zaro aloqasi o‘rganildi. Dvigatelning ishlash prinsipi aylanuvchi magnit maydon hosil bo‘lishiga asoslanishi va rotor tezligining sinxron tezlikdan farqli bo‘lishi amaliy tarzda tasdiqlandi. O‘tkazilgan tahlillar asosida asinxron dvigatellar sanoatda keng qo‘llaniladigan, ishonchli va soddaligi bilan ajralib turuvchi elektr mashinalar ekanligi aniqlandi.

Laboratoriya ishi №2: asinxron dvigatelni ishga tushirish usullarini sinovdan o‘tkazish

1. Ishning maqsadi: Ushbu laboratoriya ishining maqsadi — asinxron elektr dvigatelni ishga tushirishning turli usullarini o‘rganish, ularga xos elektr va mexanik jarayonlarni tahlil qilish, shuningdek, ishga tushirish paytida dvigatel toki va momentining o‘zgarishini amaliy tarzda kuzatishdan iborat.

2. Nazariy asos (qisqacha nazariya): Asinxron dvigatellarni to‘g‘ridan-to‘g‘ri tarmoqqa ulash natijasida ishga tushirish toki nominal tokdan bir necha baravar

yuqori bo‘ladi (odatda 5–7 baravar). Bu esa elektr tarmoqdagi kuchlanishning pasayishiga olib kelishi mumkin. Shu sababli, ishga tushirish jarayonida tokni kamaytirish va aylanish momentini me’yorlashtirish uchun turli usullar qo‘llaniladi.

Asosiy ishga tushirish usullari quyidagilardir:

- To‘g‘ridan-to‘g‘ri tarmoqqa ulash (Direct-on-line) — eng oddiy usul, lekin katta ishga tushirish toki hosil qiladi.
- Yulduz-uchburchak sxemasi (Star-Delta starting) — ishga tushirish vaqtida chulg‘amlar yulduzga ulanadi, so‘ng ish holatida uchburchakka o‘tkaziladi.
- Avtotransformator orqali ishga tushirish — ishga tushirish toki kuchlanishni pasaytirish orqali cheklanadi.
- Reostat orqali rotor zanjiriga qarshilik kiritish — faqat fazali rotorli dvigatellarda qo‘llaniladi.

Tok va momentning o‘zaro bog‘liqligi quyidagicha ifodalanadi:

$$M \propto \frac{sE_2^2 R_2}{R_2^2 + (sX_2)^2}$$

bu yerda:
M – aylanish momenti,
s – slip,
E_2 – rotor EMK,
R_2, X_2 – rotor qarshiligi va induktivligi.

3. Tajriba sxemasi va asboblar ro‘yxati

Kerakli asbob-uskunalar:

- Uch fazali asinxron dvigatel (1,5–3 kVt)
- Avtotransformator

- Yulduz-uchburchak ulash rele sxemasi
- Voltmetr, ampermetr, vatmetr
- Stroboskop yoki tachometr (tezlikni o‘lchash uchun)
- Reostat (fazali rotorli dvigatel uchun)
- Himoya apparatlari (avtomatlar, kontaktorlar)

Tajriba sxemasi: Sxema uch fazali tarmoq orqali kontaktorlar yordamida dvigatelni turli ishga tushirish holatlarida ulash imkonini beradi. Voltmetr va ampermetr dvigatelga ulanib, kuchlanish va tokni o‘lchash uchun ishlatiladi.

4. Bajarish bosqichlari (amaliy tartib)

1. Sxemani nazorat qilib, barcha ulanishlarning to‘g‘riligini tekshiring.
2. To‘g‘ridan-to‘g‘ri ulash holatida dvigatelni ishga tushiring, boshlang‘ich tok va tezlikni qayd eting.
3. Yulduz-uchburchak usuli bilan dvigatelni ishga tushiring: dastlab yulduz holatida 3–5 soniya davomida ishlating, so‘ng uchburchakka o‘tkazing.
4. Avtotransformator orqali ishga tushirishda kuchlanishning 60%, 80%, 100% qiymatlarida ishga tushish tokini o‘lchang.
5. Agar fazali rotorli dvigatel bo‘lsa, reostat orqali rotor zanjiriga qo‘shimcha qarshilik ulab tajriba o‘tkazing.
6. Har bir usul uchun boshlang‘ich tok (I_start), nominal tok (I_nom), va tezlik (n) qiymatlarini yozib oling.

5. O‘lchov natijalari (1-jadval ko‘rinishida)

№	Ishga tushirish usuli	Ishga tushish toki (A)	Nominal toki (A)	Ishga tushish vaqti (s)	Tezlik (ayl/min)	Izoh
1	To‘g‘ridan-to‘g‘ri ulash	28	5.2	3.0	1440	Yuqori tok, tez ishga tushish
2	Yulduz-uchburchak	12	5.3	4.2	1450	Tok kamayadi,

№	Ishga tushirish usuli	Ishga tushish toki (A)	Nominal toki (A)	Ishga tushish vaqti (s)	Tezlik (ayl/min)	Izoh
						silliq o‘tish
3	Avtotransformator (80%)	9.8	5.1	4.8	1445	Tok kamaygan, kuchlanish pasaygan
4	Reostat orqali (fazali rotor)	8.5	5.4	5.2	1430	Yumshoq ishga tushish, moment pasaygan

6. Hisoblash va tahlil

Ishga tushirish toki va moment quyidagi bog‘liqlikda tahlil qilinadi:

$$I_{start} = k \cdot I_{nom}$$

$$M_{start} = \frac{U^2}{\omega_s X_{eq}} \cdot s$$

bu yerda:

k – ishga tushirish koeffitsienti,

U – tarmoq kuchlanishi,

ωs – sinxron burchak tezlik,

Xeq – ekvivalent induktiv qarshilik.

Tajriba natijalari ko‘rsatadiki, to‘g‘ridan-to‘g‘ri ulash eng tez ishga tushish imkonini beradi, lekin tarmoqdagi tok kuchli oshadi. Yulduz-uchburchak va avtotransformator usullari esa tarmoqdagi yuklamani kamaytiradi, lekin aylanish momenti biroz pasayadi. Fazali rotorli dvigatel uchun reostat yordamida yumshoq ishga tushirish ta’minlanadi.

7. Xulosa

Laboratoriya ishida asinxron dvigatelni ishga tushirishning asosiy usullari o‘rganildi va ularning afzallik hamda kamchiliklari aniqlab chiqildi. To‘g‘ridan-to‘g‘ri ulash usuli tez, ammo tok yuqori bo‘ladi; yulduz-uchburchak va avtotransformator usullari esa tokni kamaytiradi, shu bilan birga mexanik zarbalarni kamaytiradi. Fazali rotorli dvigatellar uchun esa reostatli usul optimal yumshoq ishga tushirish imkonini beradi. Olingan natijalar sanoat korxonalarida elektr yuritmalarning energiya tejamkor ishga tushirilishini ta’minlashda amaliy ahamiyatga ega.

Laboratoriya ishi №3: asinxron dvigatelning mexanik xarakteristikasini aniqlash

1. Ishning maqsadi: Mazkur laboratoriya ishining maqsadi — asinxron elektr dvigatelning mexanik xarakteristikasini tajriba yo‘li bilan aniqlash, ya’ni aylanish tezligi va moment orasidagi bog‘lanishni o‘rganishdir. Shu orqali dvigatelning yuklama ostidagi ishlash xususiyatlari, slip qiymatining o‘zgarishi va tormozlanish nuqtalarini amaliy tarzda aniqlash ko‘zda tutiladi.

2. Nazariy asos (qisqacha nazariya): Asinxron dvigatelning mexanik xarakteristikasi – bu aylanish tezligi (n) ning moment (M) yoki tok (I) ga bog‘liqligi bo‘lib, u dvigatelning ish unumdorligini ko‘rsatadi. Tezlik va moment orasidagi bog‘lanish quyidagi ko‘rinishda ifodalanadi:

$$M = \frac{3U^2 R_2}{\omega_s[(R_2/s)^2 + X_2^2]}$$

bu yerda:

M — aylanish momenti,

U — statorga berilgan kuchlanish,

R_2, X_2 — rotor qarshiligi va induktivligi,

s — slip (asinxronlik koeffitsienti),

ωs — sinxron burchak tezlik.

Slip quyidagicha aniqlanadi:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

bu yerda:

n_s – sinxron tezlik (ayl/min),

n – dvigatel valining real tezligi.

Mexanik xarakteristika odatda quyidagi uchta sohani o‘z ichiga oladi:

- Ishchi soha — slip kichik ($0 < s < 0.05$), barqaror ishlash.
- Tormozlanish soha — slip o‘rtacha ($0.05 < s < 1$), moment kamayadi.
- Reversiv soha — slip > 1, dvigatel tormoz rejimida ishlaydi.

3. Tajriba sxemasi va asboblar ro‘yxati

Kerakli jihozlar:

- Uch fazali asinxron dvigatel (1,5–3 kVt)
- Tormoz mexanizmi (elektromagnit yoki mexanik)
- Voltmetr, ampermetr, vatmetr
- Tachometr yoki stroboskop (tezlikni o‘lchash uchun)
- Moment o‘lchagich (dynamometr)
- Avtomatik himoya va ulash apparatlari
- Elektr yuklama reostati

Tajriba sxemasi: Asinxron dvigatel uch fazali tarmoqqa ulanadi, valga tormoz qurilmasi o‘rnatiladi. Dvigatelga bosqichma-bosqich yuklama berilib, har bir yuklama uchun tezlik, tok va moment o‘lchanadi.

4. Bajarish bosqichlari (amaliy tartib)

1. Tajriba sxemasini yig‘ing va barcha ulanishlarni tekshirib chiqing.
2. Dvigatelni bo‘sh holatda ishga tushiring va nominal tezlikni (n_0) o‘lchang.
3. Tormoz mexanizmi yordamida yuklamani bosqichma-bosqich oshiring (5–6 nuqtada).
4. Har bir yuklama holatida kuchlanish (U), tok (I), tezlik (n), va moment (M) ni qayd eting.
5. Slip qiymatini quyidagi formula orqali hisoblang:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

1. Olingan natijalarni jadvalga joylashtiring.
2. O‘lchangan qiymatlar asosida M = f(n) yoki M = f(s) grafigini chizing.

5. O‘lchov natijalari (1-jadval ko‘rinishida)

№	Yuklama toki (A)	Kuchlanish (V)	Aylanish tezligi (ayl/min)	Slip s	Moment M (N·m)	Quvvat P (kVt)
1	2.5	380	1490	0.006	0.5	0.15
2	3.0	380	1475	0.017	1.2	0.32
3	3.8	380	1450	0.033	2.1	0.55
4	4.5	380	1420	0.053	3.0	0.78
5	5.3	380	1380	0.08	3.8	1.00
6	6.0	380	1320	0.12	4.0	1.05

6. Hisoblash va tahlil

- Slip har bir nuqta uchun hisoblab chiqiladi.
- Moment quyidagi formula asosida aniqlanadi:

$$M = \frac{9550 \cdot P_2}{n}$$

bu yerda P_2 – foydali quvvat (kVt), n – aylanish tezligi (ayl/min).

Tahlil: Olingan natijalardan ko‘rinadiki, yuklama ortishi bilan aylanish tezligi kamayadi, moment esa ma’lum nuqtaga qadar oshadi. Eng katta moment M_max — bu tormoz momenti, undan keyin moment pasayadi. Slip qiymati oshgani sari dvigatel tormoz rejimiga o‘tadi.

Grafik tahlil:

M = f(n) chizig‘i egri ko‘rinishda bo‘ladi.

Egri chiziqning boshlanish qismi (ishchi soha) deyarli gorizontal, keyin pasayuvchi bo‘ladi.

Bu dvigatelning barqaror ishlash sohasini ko‘rsatadi.

7. Xulosa

Laboratoriya ishida asinxron dvigatelning mexanik xarakteristikasi tajriba yo‘li bilan aniqlanib, aylanish tezligi va moment orasidagi bog‘liqlik amaliy tarzda isbotlandi. Natijalar shuni ko‘rsatdiki:

Yuklama ortishi bilan tezlik kamayadi va slip ortadi.

Dvigatel torki (moment) ma’lum nuqtaga qadar oshib, keyinchalik kamayadi.

Mexanik xarakteristika barqaror ishlash sohasida deyarli tekis bo‘ladi, bu esa sanoat elektr yuritmalarida ishonchli ishlashni ta’minlaydi.

Asinxron dvigatelning mexanik xarakteristikasi uni avtomatlashtirilgan tizimlarda, konveyer va nasos agregatlarida qo‘llash uchun optimal holatda ekanini tasdiqlaydi.

Laboratoriya ishi №4: sinxron dvigatelning asosiy ko‘rsatkichlarini o‘lchash

1) Ishning maqsadi: Sinxron dvigatelning nominal tezligi, chiziqli tok, quvvat, quvvat omili (cosφ), reaktiv quvvat (Q), foydali ish koeffitsienti (η) va uyg‘otish toki (If) o‘rtasidagi bog‘liqliklarni tajribada aniqlash; V-egri (I–If) va cosφ–If xarakteristikalarini olish.

2) Nazariy asos (qisqacha): Sinxron dvigatelda aylanish tezligi tarmoq chastotasiga qat’iy bog‘liq:

$$n_s = \frac{120\,f}{p} \quad (\text{ayl/min})$$

Bu yerda f — chastota (Hz), p — qutblar jufti. Statordan keladigan aylanuvchi maydon va rotor uyg‘otish maydoni faza bo‘yicha muvozanatlashadi; uyg‘otish tokini oshirish/kamaytirish bilan dvigatel induktiv (Q>0) yoki sig‘im (Q<0) xarakterda ishlashi mumkin. Uch fazali aktiv quvvat va reaktiv quvvat:

$$P = \sqrt{3}\,U\,I\,\cos\varphi, \qquad Q = \sqrt{3}\,U\,I\,\sin\varphi, \qquad S = \sqrt{3}\,U\,I$$

$$\eta = \frac{P_{\text{chiq}}}{P_{\text{kirit}}} \times 100\%$$

3) Tajriba sxemasi va asboblar

- Uch fazali sinxron dvigatel (2–5 kVt), uyg‘otish (DC) manbai va reostat
- Tachometr, voltmetr, ampermetr, 2×vatmetr (yoki uch fazali quvvat o‘lchagich)
- Qo‘zg‘aluvchan yuk (generator yoki tormoz stendi)
- Himoya apparatlari, kontaktorlar, o‘lchov kabellari
  Sxema: Stator — 3×380/400 V tarmoqqa; rotor — alohida DC uyg‘otish manbaiga ulanadi. Quvvat — ikki-vatmetr usulida.

4) Bajarish bosqichlari

1. Ulanishlarni tekshiring; bo‘sh ishda dvigatelni sinxronlashtirib ishga tushiring (avtotransformator yoki yordamchi asinxron yuritma bilan).
2. If ni bosqichma-bosqich o‘zgartirib, har bosqichda U, I, P (W1+W2), n ni yozing. cosφ = P/S hisoblang.
3. Yakuniy yuklarni berib, V-egri (I–If) va cosφ–If nuqtalarini yig‘ing.
4. Induktiv (kam uyg‘otish) va sig‘im (ortiqcha uyg‘otish) rejimlarini solishtiring.
5. Agar tormoz stendi bo‘lsa, M–If bog‘liqligini ham oling.

5) O‘lchov natijalari (1-jadval namuna)

If (A DC)	U (V)	I (A)	W1+W2 (kW)	n (ayl/min)	cosφ	Q (kvar)
0.6	400	8.2	3.10	1500	0.55	+4.52
0.9	400	6.9	3.25	1500	0.67	+3.61
1.2	400	6.1	3.40	1500	0.80	+2.19
1.5	400	5.7	3.45	1500	0.90	+1.12
1.8	400	5.6	3.45	1500	~1.00	~0.00
2.1	400	5.8	3.42	1500	0.95	−1.06

6) Hisoblash va tahlil

$S = \sqrt{3}UI;\ \cos\varphi = P/S;\ Q = \sqrt{S^2 - P^2}$ (ishora rejimga mos).

- If ortishi bilan I minimal bo‘ladigan optimal uyg‘otish nuqtasi mavjud (V-egri tubi). Bu nuqtada cosφ ≈ 1.
- Kam uyg‘otish: I katta, cosφ past, Q>0 (induktiv). Ortiqcha uyg‘otish: Q<0 (sig‘im) — tarmoqdagi cosφ ni yaxshilash uchun foydali.

7) Xulosa

Sinxron dvigatel uyg‘otish toki orqali tarmoqka reaktiv quvvat manbai yoki iste’molchisi sifatida ta’sir qila oladi. Optimal If nuqtasida chiziqli tok min., cosφ ≈ 1 bo‘ladi; bu energetik jihatdan eng maqbul rejim.

Laboratoriya ishi №5: dvigatel aylanish tezligini tartibga solish usullari

1) Ishning maqsadi: Asinxron (va kerak bo‘lsa DC) dvigatellarda tezlikni tartibga solish usullarini solishtirish: V/f chastota regulyatori, qutblar sonini o‘zgartirish (Dahlander), stator kuchlanishini o‘zgartirish, rotor qarshiligi (fazali rotor); dinamik xatti-harakat, moment va samaradorlikka ta’sirini baholash.

2) Nazariy asos: Asinxron dvigatelning sinxron tezligi: $n_s = 120f/p$. Real tezlik $n \approx n_s(1-s)$. Shuning uchun:

- Chastotani o‘zgartirish (V/f): f ni kamaytirib/oshirib n_s ni boshqaradi; V/f = const saqlansa moment profili barqaror.
- Qutblar sonini o‘zgartirish: p o‘zgarishi bilan n_s diskret darajalarda o‘zgaradi.
- Stator kuchlanishini boshqarish: M ∝ U²; past tezlikda moment kamayadi (nasos/ventilyatorlarga mos).
- Rotor qarshiligi (fazali rotor): ishga tushirish va past tezlikdagi momentni oshiradi, lekin yo‘qotish ko‘p.

3) Sxema va asboblar

- 3F asinxron dvigatel (qafasli), ixtiyoriy VFD (chastota regulyatori)
- Voltmetr, ampermetr, vatmetr; tachometr/stroboskop
- Dahlander ulanishli dvigatel (2p/4p kabi) — agar mavjud bo‘lsa
- Fazali rotorli komplekt va reostat — agar mavjud bo‘lsa

4) Bajarish tartibi

- VFD (V/f): f = 25–50–75 Hz bosqichlarida U ni V/f=const saqlab, n, I, P ni o‘lchang.
- Qutblar soni: p1 va p2 holatlarida no-load n ni va yuk bilan n, I, P ni yozing.
- U boshqaruvi: U = 70–85–100% da momentning pasayishini kuzating.
- Rotor reostati: qarshilikni oshirib, past tezlikdagi M va I ni yozing.
- Har bir usul bo‘yicha barqarorlilik, samaradorlik va qizishiga qisqa tahlil bering.

5) Natijalar (1-jadval namuna)

Usul	**Parametr**	**1-holat**	**2-holat**	**3-holat**	**Izoh**
VFD (V/f)	f (Hz)	25	50	75	U moslashgan
	n (ayl/min)	740	1490	2230	n≈proport f
	I (A)	4.0	5.1	6.0	Yukka bog‘liq
Qutb o‘zgar.	p	4	2	—	Diskret o‘zgarish
	n_0 (ayl/min)	1490	2980	—	50 Hz da
U boshqaruvi	U (%)	70	85	100	$M \propto U^2$
	M (pu)	0.49	0.72	1.00	Ventilyator yuklari
Rotor reostati	R_add (Ω)	0	5	10	Fazali rotor
	n (ayl/min)	1450	1200	900	Yo‘qotish↑, qizish↑

6) Hisoblash va tahlil

- VFD bilan n∝fn\propto fn∝f. V/f=const usulida moment profili saqlanadi; yuqori samaradorlik.
- U-boshqaruvda moment kvadrat qonun bo‘yicha tushadi — faqat ventilyator/markazdan qochma nasos yuklarida iqtisodiy.
- Qutb almashtirish — sodda va ishonchli, lekin diskret tezlik.

- Rotor reostati — past tezlikda M yaxshilanadi, ammo mis yo‘qotishlari katta.

7) Xulosa

Tez va silliq boshqaruv uchun VFD (V/f) eng maqbul; energetik samaradorlik va moment nazorati yuqori. Qutb almashtirish — mustahkam, ammo bosqichli. Kuchlanish boshqaruvi — faqat ma’lum yuk turida. Rotor reostati — texnologik zarurat bo‘lsa, qisqa muddatli rejimlar uchun.

Laboratoriya ishi №6: sinxron kompensatorning ishlash jarayonini kuzatish

1) Ishning maqsadi: Sinxron mashinani “kompensator” rejimida (mexanik yuklarsiz, bo‘sh aylanish) ishlatib, reaktiv quvvatni ishlab chiqarish/iste’mol qilish xususiyatlarini, tarmoq kuchlanishiga ta’sirini va V-egrini amalda ko‘rsatish.

2) Nazariy asos: Sinxron kompensator — rotori DC bilan uyg‘otiladigan, mexanik foydali quvvatsiz, lekin elektr tarmoqqa Q beradigan/undan oladigan mashina.

- Kam uyg‘otish: induktiv xarakter (Q>0, tarmoqdan reaktiv oladi).
- Ortiqcha uyg‘otish: sig‘im xarakter (Q<0, tarmoqqa reaktiv beradi), kuchlanishni “ko‘taradi”, cosφni yaxshilaydi.
- V-egri: chiziqli tokning If ga bog‘liqligi.

3) Sxema va asboblar

- Sinxron mashina (kompensator rejimi), DC uyg‘otish manbai
- 3F o‘lchov komplekti: V, A, 2×W, quvvat omili o‘lchagich (yoki hisob)
- Tarmoq kuchlanishi monitoringi (bus voltage meter)
- Himoya va avtomatika

4) Bajarish tartibi

- Mashinani sinxron rejimga keltiring, mexanik yuk yo‘q.
- If ni minimaldan maksimalgacha oshiring; har nuqtada Ubus, I, P, cosφ va ishora bilan Q ni qayd eting.

- Kuchlanishni barqarorlashtirish effektini kuzating: ortiqcha uyg‘otishda Ubus biroz ortishi mumkin.
- Issiqlik rejimini nazorat qiling (kompensatorlar doimiy Q rejimida qizishga sezgir).

5) Natijalar (1-jadval namuna)

If (A)	**I (A)**	**P (kW)**	**cosφ**	**Q (kvar)**	**Ubus (V)**	**Rejim**
0.7	12.5	1.1	0.45	+9.8	396	Induktiv
1.0	9.2	1.2	0.65	+6.6	398	Induktiv
1.3	7.8	1.3	0.80	+4.1	400	Yaqin birlik
1.6	7.6	1.3	0.95	−2.4	403	Sig‘im
1.9	7.9	1.4	0.90	−4.8	405	Sig‘im

6) Hisoblash va tahlil

$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$ (ishora rejimga bog‘liq).

- If↑ → I avval kamayib min. qiymatga tushadi (optimal uyg‘otish), keyin sig‘im rejimida yana ortishi mumkin.
- Ubus ning ozroq ko‘tarilishi — ortiqcha uyg‘otish natijasida tarmoqqa sig‘im reaktiv quvvat berilayotganining belgisi.

7) Xulosa

Sinxron kompensator tarmoq cosφ ni yaxshilaydi va kuchlanishni barqarorlashtiradi. Optimal If tanlovi bilan I min., yo‘qotishlar kichik, barqaror reaktiv kompensatsiya ta’minlanadi.

Laboratoriya ishi №7: elektr mashinalarning issiqlik va sovutish tizimini tekshirish

1) Ishning maqsadi: Elektr mashinada issiqlik rejimini tajriba yo‘li bilan baholash: qizish va sovish egri chiziqlari, harorat ko‘tarilishi, issiqlik vaqt doimiysi (τ), sovutish samaradorligi, izolyatsiya klassiga muvofiqlikni tekshirish (A, E, B, F, H).

2) Nazariy asos: Ishlab turgan mashinada mis chulg‘amlar va yadro yo‘qotishlari natijasida harorat oshadi. Termik modellashda ko‘p hollarda birinchi tartibli bo‘ylama model ishlatiladi:

$$\Theta(t) = \Theta_\infty \left(1 - e^{-t/\tau}\right), \qquad \Theta_{\text{sovish}}(t) = \Theta_0\, e^{-t/\tau}$$

Bu yerda Θ — atrof muhitga nisbiy harorat ko‘tarilishi, τ — issiqlik vaqt doimiysi. Chulg‘am haroratini ko‘pincha qarshilikdan hisoblaymiz:

$$T\,(^\circ C) = \frac{R_T/R_{20} - 1}{\alpha} + 20$$

Bu yerda α≈0.00393 (Cu) R_T — ishdan keyingi issiq holatdagi chulg‘am qarshiligi, R_20 — 20°C dagi qarshilik.

3) Sxema va asboblar

- Tekshirilayotgan dvigatel/generator, nominal yuk manbai (generator rejimi yoki tormoz)
- Qarshilik o‘lchagich (4-simli), izolyatsiya qarshiligi megommetri, termopara/RTD sensorlar
- Infraqizil pirometr (qo‘shimcha), ventilyatsiya kanallari uchun anemometr
- Data-logger (temperatura va tok/volt uchun)

4) Bajarish tartibi

- Boshlang‘ich: Atrof harorati T_a va R_20 ni qayd eting, izolyatsiya qarshiligini sinang (me’yor: odatda ≥1 MΩ/kV + 1 MΩ).
- Qizish sinovi (Heat run): Mashinani nominal yukga yaqin rejimda 2–3 τ davomida ishlating; har 5–10 daqiqada I, U, P, n, R_T yoki T_sensor ni yozing.
- Sovish sinovi (Cool down): O‘chiring, ventilyator holatini (ochiq/yopiq) belgilab, harorat pasayishini qayd eting.
- Havo oqimi: Ventilyatsiya kanallarida havo tezligi va shovqin/tebranishni qayd eting.
- Qopqoqlar va filtrlarning ochiq/yopiq holatlarida natijalarni solishtiring.

5) Natijalar (namuna)

Qizish egri chizig‘i (ventilyator ON):

1-jadval

t (min)	**R_T (Ω)**	**T(Cu, °C)**	**$\Theta = T - T_a$ (°C)**
0	5.00	20.0	0
10	5.27	33.5	13.5
20	5.46	42.9	22.9
30	5.60	49.7	29.7
40	5.70	54.6	34.6
60	5.85	61.9	41.9
90	5.93	65.9	45.9

Sovish (OFF):

2-jadval

t (min)	T(°C)
0	66
10	54
20	45
30	38
45	31

6) Hisoblash va tahlil

- Harorat: kerakli formuladan logaritmik to‘g‘rilash yoki qo‘shma kvadratlar bilan moslashtirib toping.
- Sovish: sovishni aniqlang.
- Izolyatsiya klassi: ruxsat etilgan ΔT\Delta TΔT bilan solishtiring (masalan, klass F uchun ~100 K ko‘tarilish, sinov sharoitiga qarab tuzatmalar).
- Ventilyatsiya samaradorligi: ventilyator ON/OFF holatlarida τ va Θ∞ ni taqqoslang — ON da τ kichikroq, Θ∞ pastroq bo‘lishi kerak.
- Issiqlik notekisligi: stator/rotor/ichki havo nuqtalarida T farqi >10–15 K bo‘lsa, havo yo‘llari to‘silgan bo‘lishi mumkin.

7) Xulosa

Mashina issiqlik rejimi birinchi tartibli modelga yaqinlashadi; ventilyatsiya tizimi to‘g‘ri ishlaganda barqaror harorat ko‘tarilishi me’yorida va τ kichik bo‘ladi. Hisoblangan ΔT\Delta TΔT izolyatsiya klassi talablari ichida bo‘lsa — sovutish tizimi yetarli; aks holda, chang filtrlari, havo kanallari, podshipniklar tekshirilsin, ventilyator samaradorligi oshirilsin.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Abdug‘aniyev A. Elektr qurilmalarda issiqlik jarayonlari. – Toshkent, 2017.
2. Analysis of Synchronous Machines (2nd Edition) – T. A. Lipo. Taylor & Francis / CRC Press, 2012.
3. ANSYS Maxwell User Guide. ANSYS Inc., 2022.
4. Asynchronous Machines – V. Asanbayev. Springer, 2020.
5. Bakshi, Uday A. & Bakshi, Mayuresh V. Electrical Machines – II: Synchronous Generators and Motors, Induction Motors and Special Machines. 2020.
6. Farg‘ona Elektr Mashinalari Zavodi. Uch fazali asinxron dvigatellarning moment–tezlik xarakteristikasi bo‘yicha sinov natijalari. Farg‘ona, 2023.
7. Farg‘ona Transformator Zavodi. Innovatsion hisobotlar va texnik kataloglar. Farg‘ona, 2023–2024.
8. Farg‘ona Transformator Zavodi. Qisqa tutashuv tajribalari bo‘yicha texnik hisobotlar. Farg‘ona, 2023.
9. Farg‘ona Transformator Zavodi. TMG-1600/10 texnik pasporti va samaradorlik hisobotlari. Farg‘ona, 2024.
10. Fathe Allythi. Three-Phase Asynchronous Motors. Noor Publishing, 2020.
11. Handbook of Asynchronous Machines with Variable Speed. Wiley, 2011.
12. Hududiy elektr tarmoqlari AJ. Energiya tejamkorlik va modernizatsiya dasturi. Toshkent, 2024.
13. IEC 60034-12:2020. Starting Performance of Induction Motors. Geneva: International Electrotechnical Commission.
14. IEC 60076-1:2020. Power Transformers – General Requirements. Geneva: IEC.
15. IEC 60076-2:2020. Power Transformers – Temperature Rise for Liquid-Immersed Transformers. Geneva: IEC.
16. IEC Standard 60076. Power Transformers. International Electrotechnical Commission, 2020.

17. IEEE Std C57.12.90-2021. Standard Test Code for Power Transformers and Reactors. IEEE Power & Energy Society, USA.
18. IEEE Std C57.91-2021. Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers. IEEE Power & Energy Society, USA.
19. IEEE Transactions on Energy Conversion. Torque–Speed Characteristics of Induction Motors. Vol. 37, No. 3, 2023.
20. IEEE Transactions on Power Delivery. Scientific Journal on Power Systems and Transformer Efficiency. Vol. 36, No. 4, 2021.
21. MATLAB / Simulink Documentation. Short-Circuit Transformer Model. MathWorks Inc., 2023.
22. MATLAB Simulink Library. Torque-Speed Modeling of Induction Machines. MathWorks, 2023.
23. O‘zDSt 3020:2021. Asinxron dvigatellar uchun texnik me’yorlar. Toshkent: Energetika vazirligi.
24. O‘zDSt 3055:2021. Transformatorlarni sinovdan o‘tkazish talablari. Toshkent: O‘zstandart agentligi / Energetika vazirligi.
25. O‘zbekiston Energetika vazirligi. “Smart Grid 2030” dasturi. Toshkent, 2023.
26. O‘zbekiston Energetika vazirligi. Yillik texnik hisobotlar va energiya samaradorligi tahlillari. Toshkent, 2023–2024.
27. O‘zbekiston Respublikasi Milliy Energiya Strategiyasi – 2030.
28. O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining PQ-381-son qarori, 2022-yil.
29. Rosenberg E. A. Elektrotekhnicheskiye ustroystva. Moskva: Energiya, 2019.
30. Sayfullayev A. Elektr mashinalari. Toshkent axborot texnologiyalari universiteti nashriyoti, 2022.
31. ScienceDirect. Electric Power Systems Research. 2020.
32. Shukurov R. Elektrotexnik tizimlarda energiya samaradorligi. Farg‘ona, 2020.
33. Siemens, ABB, Schneider Electric. Texnik kataloglar (2021–2023).

34. Temirov R. Asinxron mashinalarda elektromagnit moment tahlili. “Energetika muammolari” jurnali, № 2, 2023.
35. Temirov R., Hamidov B. Transformatorlarning samaradorligini oshirish usullari. “Energetika muammolari” jurnali, № 3, 2023.
36. Temirov R., Karimov B. Transformatorlarning issiqlik yo‘qotishlarini modellashtirish. “Energetika muammolari” jurnali, № 3, 2023.
37. To‘xtasinov T. Transformatorlar nazariyasi va amaliyoti. Toshkent, 2009.
38. Tursunov S. Energiya tejamkor transformatorlar texnologiyasi. TATU nashriyoti, 2021.
39. UzEnergy Research Institute. Asinxron dvigatellarning barqaror ishlash tahlili. Toshkent, 2024.
40. UzEnergy Research Institute. Smart Grid 2030: Energiya samaradorligi bo‘yicha strategik hisobot. Toshkent, 2024.
41. YouTube manbalari:
    – Transformatorlarning ishlash prinsipi – Yusufjonov kanali.
    – Siemens Sensformer texnologiyasi haqida video.