ISNN 3030-3907

2026/3
VOLUME 3

DEVELOPMENT OF SCIENCE

ILMIY JURNAL



Development of science

Ilmiy jurnal

2026/3 VOLUME 3

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Асадова Раъно Дилмуратовна
Тошкент Давлат техника университети доценти

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

“SODDALASHTIRIB ANGLASH (APOSPASMATIKÁ)” METODIKASI ASOSIDA PARK-GOREV DIFFERENSIAL TENGLAMALARINI TALABALARGA SODDALASHTIRIB TUSHUNTIRISH.

Safarov Xoliyor Sayyid Safar o‘g‘li
Qarshi davlat texnika universiteti,
Karshi 180100, Uzbekistan;
E-mail: sayyidsafarov23@mail.ru
https://orcid.org/0009-0008-5740-191X

Annotatsiya. Ushbu maqolada sinxron mashinalarning elektromagnit va elektromexanik o‘tish jarayonlarini tadqiq etishda qo‘llaniladigan Park-Gorev tenglamalarini soddalashtirish va linearizatsiya qilish masalalari ko‘rib chiqiladi. Muallif tomonidan murakkab matematik modellarni sifat jihatidan saqlab qolgan holda anglashni osonlashtirishga qaratilgan Soddalashtirib anglash (Apospasmatiká) metodikasi taklif etilgan. Tadqiqot davomida kichik tebranishlar tenglamalari tizimi hosil qilingan va xarakteristik aniqlagich asosida o‘zgaruvchilarni optimallashtirish asoslab berilgan. Olingan natijalar kichik quvvatli generatorlarning turg‘unligini hisoblashda va raqamli modellashtirishda hisoblash resurslarini tejash imkonini beradi.

Kalit so‘zlar: sinxron mashina, Park-Gorev tenglamalari, chiziqlantirish, Soddalashtirib anglash (Apospasmatiká), o‘tish jarayonlari, statik turg‘unlik, xarakteristik aniqlagich.

Аннотация. В данной статье рассматриваются вопросы упрощения и линеаризации уравнений Парка-Горева, применяемых при исследовании электромагнитных и электромеханических переходных процессов синхронных машин. Автором предложена методика “Соддалаштириб англаш (Апоспасматиká)”, направленная на упрощение сложных математических моделей для улучшения их интерпретации без потери качественных характеристик процесса. В ходе исследования получена система уравнений малых колебаний и обоснована оптимизация переменных на основе характеристического определителя. Полученные результаты позволяют существенно сократить вычислительные ресурсы при анализе устойчивости и численном моделировании генераторов малой мощности.

Ключевые слова: синхронная машина, уравнения Парка-Горева, линеаризация, “Соддалаштириб англаш (Апоспасматиká)”, переходные процессы, статическая устойчивость, характеристический определитель.

Abstract. This paper discusses the simplification and linearization of the Park-Gorev equations used in the study of electromagnetic and electromechanical

ISSN 3030-3907

transient processes of synchronous machines. The author proposes the "Соддалаштириб англаш (Апоспасматикá)", methodology, aimed at simplifying complex mathematical models to enhance understanding while maintaining the qualitative essence of the physical processes. In the course of the study, a system of small-oscillation equations was derived, and the optimization of variables based on the characteristic determinant was justified. The results obtained allow for a significant reduction in computational resources for stability analysis and numerical modeling, especially for low-power synchronous generators.

Keywords: synchronous machine, Park-Gorev equations, linearization, "Соддалаштириб англаш (Апоспасматикá)", transient processes, steady-state stability, characteristic determinant.

1. KIRISH.

Soddalashtirib anglash (Apospasmatika) - bu talabaning murakkab matematik modelni ishlab chiqarishdagi real fizik jarayon bilan integratsiya qilish qobiliyatidir. Maqolada Park-Gorev tenglamalarini (1), (2) algebraik ko‘rinishga keltirish jarayoni bo‘lajak muhandislarning kasbiy muqobilligini rivojlantiruvchi asosiy didaktik vosita sifatida talqin etiladi. Bunda talaba differensial operatorlar o‘rniga tizimning statik va dinamik parametrlari orasidagi mantiqiy bog‘lanishni ko‘rishni o‘rganadi [1,2].

Elektroenergetika tizimlarida o‘tish jarayonlarining texnik murakkabligi va ta’lim muammosi. Zamonaviy elektroenergetika tizimlari (EES) o‘z tabiatiga ko‘ra o‘ta murakkab, dinamik va nochiziqli tavsifga ega bo‘lgan obyektlardir. Ushbu tizimlarda sodir bo‘ladigan elektromexanik va elektromagnit o‘tish jarayonlarini matematik modellashtirish "qattiq" differensial-algebraik tenglamalar tizimini yechishni talab etadi. Bunday tizimlarning o‘ziga xos xususiyati shundaki, ulardagi vaqt doimiylari bir-biridan keskin farq qiladi: ba’zi jarayonlar (elektromagnit) soniyaning ming barobar kichik bo‘laklarida sodir bo‘lsa, boshqalari bir necha soniya davom etadi (elektromexanik) [3-5].

An’anaviy muhandislik ta’limida ushbu jarayonlarni o‘rganish uchun Park-Gorev tenglamalari kabi murakkab matematik apparatlardan foydalaniladi. Biroq, amaliyot shuni ko‘rsatadiki, talabalar uchun ushbu differensial tenglamalarning yuqori tartibli tizimlarini anglash va ularni real ishlab chiqarish vaziyatlari bilan bog‘lash katta qiyinchilik tug‘diradi. Bu esa bo‘lajak muhandislarning kasbiy muqobilligini rivojlantirishda "matematik to‘siq"ni yuzaga keltiradi.

Talaba murakkab Park-Gorev tenglamalarini faqatgina matematik operatorlar to‘plami sifatida emas, balki energetik uskunaning fizik ishlash prinsipini ifodalovchi mantiqiy tizim sifatida ko‘rishi kerak. Aynan shu yerda

ISSN 3030-3907

Soddalashtirib anglash (Apospasmatika) metodikasining dolzarbligi namoyon bo‘ladi [6].

Soddalashtirib anglash (Apospasmatika) metodikasining ilmiy-pedagogik konsepsiyasi: Ushbu metodika murakkab nazariy bilimlarni dekompozitsiya qilish va ularni muhandislik mantig‘iga moslashtirishga asoslanadi. Metodikaning bosh maqsadi — murakkab differensial tenglamalarni mazmunini saqlagan holda soddalashtirilgan algebraik modellar ko‘rinishiga keltirish va talabada "soddadan murakkabga" prinsipi asosida tizimli tafakkurni shakllantirishdir.

Bo‘lajak muhandislarni tayyorlashda ta’lim va ishlab chiqarish integratsiyasi doirasida ushbu metodika quyidagi muammolarni hal etadi:

1.Murakkab matematik modellarga nisbatan talabalardagi o‘zlariga bo‘lgan ishonchsizlik va "qo‘rquv"ni yo‘qotish;

2.Nazariy tenglamalarni real energetik uskunalarning (generatorlar, transformatorlar) ishlash rejimlari bilan vizual va mantiqiy bog‘lash;

3.Muhandislik vazifalarini bashoratlash va boshqarish ko‘nikmalarini rivojlantirish.

Maqoladan ko‘zlangan maqsad murakkab Park-Gorev tenglamalarini Soddalashtirib anglash (Apospasmatika) metodikasi asosida algebraik transformatsiya qilish orqali bo‘lajak muhandislarning kasbiy kompetensiyalarini rivojlantirish samaradorligini asoslab berishdir [6]. Tadqiqot doirasida oliy ta’lim va ishlab chiqarish integratsiyasining yangi didaktik modeli taklif etiladi, unda Soddalashtirib anglash (Apospasmatiká) metodikalarining uyg‘unligi talabalarning o‘zlashtirish ko‘rsatkichlarini 65% gacha oshirish imkonini berishi eksperimental tarzda isbotlangan.

2. ADABIYOTLAR TAHLILI (LITERATURE REVIEW)

Sinxron mashinalarning dinamik jarayonlarini modellashtirish va ularning elektr energetika tizimlari (EET) turg‘unligiga ta’sirini o‘rganish sohasida bir qator fundamental tadqiqotlar olib borilgan.

V.A. Venikov [1] boshchiligidagi maktab elektr tizimlarining o‘tish jarayonlarini tahlil qilishda matematik modellashtirishning asoslarini yaratgan. Venikovning ishlarida sinxron generatorlarning (SG) elektromexanik tebranishlarini hisobga olishda Park-Gorev tenglamalarining ahamiyati va ularni tizim murakkabligiga qarab soddalashtirish imkoniyatlari batafsil ko‘rsatib o‘tilgan. Uning ta’kidlashicha, tizimning dinamik xossalarini to‘g‘ri baholash uchun generatorning inersiya doimiysi va dempfer obmotkalarining ta’sirini aniq ifodalash zarur.

P. Anderson va A. Fuad o‘zlarining klassik tadqiqotlarida [5] («Power System Control and Stability») SGning turli tartibdagi modellarini (to‘liq va

ISSN 3030-3907

soddalashtirilgan) klassifikatsiya qilganlar. Ular dempfer obmotkalarini hisobga oluvchi va olmaydigan modellar orasidagi farqni, ayniqsa, kichik tebranishlar ostida tizimning statik turg‘unligini tahlil qilishda d va q o‘qlari bo‘yicha linearizatsiyalangan tenglamalardan foydalanishning afzalliklarini asoslab berganlar. Anderson va Fuadning yondashuviga ko‘ra, zamonaviy EETlarda ARV (avtomatik kuchlanish regulyatori) ta’sirini hisobga olish uchun generatorning elektromagnit o‘tish jarayonlarini ifodalovchi yuqori tartibli differensial tenglamalardan foydalanish maqsadga muvofiqdir.

Bundan tashqari, B. Adkins va boshqa olimlarning ishlarida [11] SGning o‘ta o‘tish EDS va reaktiv qarshiliklarining tizimdagi qisqa tutashuv jarayonlaridagi roli tadqiq etilgan. Zamonaviy tadqiqotchilar esa ko‘p mashinali EETlarda hisoblash vaqtini tejash maqsadida Park-Gorev tenglamalarini algebraik shaklga keltirish va ularni dekompozitsiya qilish usullari ustida ishlamoqdalar. So‘nggi yillarda sinxron mashinalar dinamikasini tadqiq etishda nafaqat klassik modellar, balki ularni raqamli hisoblash muhitiga moslashtirish masalalari ustuvor yo‘nalishga aylandi. P. Kundur (P. Kundur) va uning izdoshlari [7] zamonaviy elektr energetika tizimlarining murakkablashishi fonida generatorlarning yuqori tartibli modellarini (to‘liq Park-Gorev tenglamalari) kichik tebranishlar turg‘unligini tahlil qilish uchun optimallashtirish ustida ishlaganlar. Ularning tadqiqotlarida kichik va o‘rta quvvatli generatorlarda stator zanjirining elektromagnit o‘tish jarayonlarini hisobga olmaslik (simplification) katta xatoliklarga olib kelishi mumkinligi asoslangan.

N.I. Voropay kabi zamonaviy olimlar o‘z ishlarida [14] elektr tizimlarining "raqamli egizaklarini" (digital twins) yaratishda Park-Gorev tenglamalarining linearizatsiyalangan shakllaridan foydalanishni taklif etadilar. Ularning fikricha, katta tizimlarni real vaqt rejimida modellashtirishda algoritmlarning tezkorligini oshirish uchun tizim tartibini pasaytirish (ROM - Reduced Order Modeling) va «Apospasmatiká» metodikasiga yaqin bo‘lgan "muhim o‘zgaruvchilarni ajratish" usullaridan foydalanish zarur.

Shuningdek, F. Milano (F. Milano) [10] kabi zamonaviy tadqiqotchilar sinxron mashinalarning an’anaviy modellarini o‘zgaruvchan chastotali va invertorli tizimlar sharoitida qayta ko‘rib chiqmoqdalar. Milanoning ishlarida differensial-algebraik tenglamalar tizimini (DAE) yechishda sonli usullarning barqarorligi bevosita Park-Gorev tenglamalarining to‘g‘ri linearizatsiya qilinishiga bog‘liqligi ko‘rsatib o‘tilgan.

X. Saadat (H. Saadat) va boshqalar [12,15,16] raqamli hisoblash texnikasi rivojlangan bo‘lsa-da, muhandislik ta’limi va tezkor ekspluatatsion hisob-kitoblar uchun soddalashtirilgan analitik modellarning ahamiyati pasaymaganini

ISSN 3030-3907

ta’kidlaydilar. Bu esa ushbu maqolada ilgari surilayotgan murakkab tenglamalarni sifat jihatidan saqlab qolgan holda soddalashtirish g‘oyasining dolzarbligini tasdiqlaydi.

3. TADQIQOT METODOLOGIYASI (RESEARCH METHODOLOGY)

Murakkab Park-Gorev differensial-algebraik tenglamalarni soddalashtirish va talabalarga tushunlarli bo‘lishi uchun uni ikki katta qismga ajratamiz bu soddalashtirishdagi birinchi qadam [8-11]:

I. Elektromagnit jarayonlar qismi

Bu qism stator zanjirlari, qo‘zg‘atish obmotkasi va dempfer obmotkalaridagi jarayonlarni (kuchlanish va oqim ilashishlarini) o‘z ichiga oladi.

Stator va rotor zanjirlari uchun kuchlanish tenglamalari:

$$\begin{cases} U_d = -\rho\psi_d - \psi_q\rho\gamma + i_d r \\ U_q = \psi_d\rho\gamma - \rho\psi_q + i_q r \\ U_f = \rho\psi_f + i_f r_f \\ 0 = \rho\psi_{1d} + i_{1d} r_{1d} \\ 0 = \rho\psi_{1q} + i_{1q} r_{1q} \end{cases} \quad (1)$$

Oqim ilashishlari (magnit bog‘lanishlar) tenglamalari:

$$\begin{cases} \psi_d = i_f x_{ad} + i_{1d} x_{a1d} + i_d x_d \\ \psi_q = i_{1q} x_{a1q} + i_q x_q \\ \psi_f = i_f x_f + i_{1d} x_{f1d} + i_d x_{ad} \\ \psi_{1d} = i_{1d} x_{11d} + i_f x_{f1d} + i_d x_{ad} \\ \psi_{1q} = i_{1q} x_{11q} + i_q x_{a1q} \end{cases} \quad (2)$$

bunda ρ — funksiyalarning vaqt bo‘yicha differensiallash (hosila olish) simvoli (ρ = d/dt).

U, i, $\boldsymbol{\psi}$ — mos ravishda konturlardagi kuchlanishlar, toklar va oqim ilashishlari.

xd, xq, xf, x`d, x`q — stator va rotor obmotkalarining xususiy induktiv qarshiliklari.

r, rf, r`d, r`q — stator va rotor obmotkalarining aktiv qarshiliklari.

xad, xald, xalq, x11d, x11q, xf1d — nominal burchak tezligi (ω) dagi o‘zaro induktiv qarshiliklar.

$\boldsymbol{\omega}$ — rotorning sinxron burchak tezligi bo‘lib, nominal qarshiliklarni hisoblashda asos qilib olinadi.

Soddalashtirib anglash (Apospasmatika) metodikasiga muvofiq, elektromagnit jarayonlarning transformatsiyasi uchta asosiy bosqichdan iborat:

1-bosqich: O‘zgaruvchilarning mazmuniy soddalashtirilishi

Park-Gorevning to‘liq tizimida stator zanjirlaridagi tezkor elektromagnit jarayonlar (transformator EYKlari) murakkablikni yuzaga keltiradi.

ISSN 3030-3907

Transformatsiyaning birinchi qadami sifatida o‘zgaruvchilar kichik og‘ishlar (Δ) ko‘rinishida ifodalanadi va stator zanjirlari uchun operatorli bog‘lanishlar kiritiladi.

2-bosqich: Differensial operatorlarni tizimlashtirish

Tenglamalardagi $\rho = d/dt$ operatorini sinxron aylanish tezligi (ω) bilan nisbiy birliklarga o‘tkazish orqali tizim "qattiqlikdan"dan xalos qilinadi. Bunda qo‘zg‘atish obmotkasi va rotor harakatining inersion doimiylari (Tf , TJ) alohida ajratib olinadi.

3-bosqich: Lebedev-Jdanov shakliga o‘tish. Yuqoridagi soddalashtirishlar natijasida SGning matematik modeli quyidagi Lebedev-Jdanov tenglamalar tizimi ko‘rinishini oladi, bu soddalashtirishning ikkinchi qadami bo‘ladi:

Soddalashtirib anglash «Apospasmatiká» metodikasining asosiy tamoyillaridan biri — murakkab dinamik jarayonlarni tahlil qilishdan avval tizimning boshlang‘ich barqaror holatini aniq belgilab olishdir. Barqaror rejimda tizim parametrlari vaqt bo‘yicha o‘zgarmas bo‘lganligi sababli, (1) va (2) Park-Gorev tenglamalarini soddalashtirish yengillashadi.

Barqaror rejimdan, noturg‘un rejimga o‘tish oldidan quyidagi matematik shartlarni qabul qilamiz:1. - Barcha oqim ilashishlarining vaqt bo‘yicha hosilalarini nolga teng deb olamiz: $\rho\psi_d = \rho\psi_q = \rho\psi_f = \rho\psi_{1d} = \rho\psi_{1q} = 0$.

2. - Rotorning aylanish tezligi o‘zgarmas va sinxron tezlikka teng deb qabul qilinadi: $\rho\gamma = \omega = 1$ (nisbiy birliklarda). Bunday hollarda rotorning burchak tezlanishi mavjud emas: $\rho^2\gamma = 0$.

Endi sinxron mashinaning o‘tish jarayonlari tenglamalarini kichik tebranishlar orqali tadqiq etish maqsadida Park-Gorev nochiziqli tenglamalarini yuqorida keltirilgan shartlar asosida chiziqlantiramiz, bu soddalashtirishning uchinchi qadami bo‘ladi. Bu jarayonda barcha o‘zgaruvchilar yangi ko‘rinishda — ma’lum bir dastlabki barqaror rejimdagi qiymatlardan og‘ishlar (ΔX) sifatida ifodalanadi, ya’ni:

$$\begin{aligned} X &= X_0 + \Delta X \\ \rho X &= \rho \Delta X \end{aligned} \qquad (3)$$

Bu yerda: X_0 — o‘zgaruvchining boshlang‘ich barqaror rejimdagi qiymati; ΔX — o‘zgaruvchining kichik og‘ishi; $\rho = d/dt$ — vaqt bo‘yicha differensiallash operatori bo‘lib, barqaror rejimda o‘zgarmas qiymatning hosilasi nolga teng bo‘lganligi sababli ($\rho X_0 = 0$), faqat og‘ishning hosilasi $\rho\,\Delta X$ saqlanib qoladi.

Differensial operatorlarning (ρ) nolga tenglashtirilishi natijasida Park-Gorevning murakkab dinamik modeli oddiy algebraik tenglamalar tizimiga aylanadi. X0 qiymatlarini (barqaror rejimdagi kuchlanish va toklar) aniqlash orqali keyingi bosqichda kichik og‘ishlarni (ΔX) hisoblash uchun poydevor yaratiladi.

ISSN 3030-3907

Yuqoridagilarni e’tiborga olsak natijaviy chiziqlantirilgan tenglamamiz qo‘yidagi kurinishni oladi:

$$P_{Э0} = \psi_{d0} i_{q0} - \psi_{q0} i_{d0}$$
$$-\psi_{q0}\omega_0 + i_{d0} r = U\sin\delta_0$$
$$\psi_{d0}\,\omega_0 + i_{q0}\,r = U\cos\delta_0$$
$$i_{f0}\,r_f = U_{f0}$$
$$i_{1d0}\,r_{1d} = 0$$
$$i_{1q0}\,r_{1q} = 0$$
$$\psi_{d0} = x_{ad}\,i_{f0} + x_d i_{d0} \qquad (4)$$
$$\psi_{q0} = x_q i_{q0}$$
$$\psi_{f0} = x_f i_{f0} + x_{ad}\,i_{d0}$$
$$\psi_{1d0} = x_{f1d} i_{f0} + x_{a1d} i_{d0}$$
$$\psi_{1q0} = i_{q0} x_{a1q}$$
$$0 = \psi_{d0} i_{q0} - \psi_{q0} i_{d0} - M_C + D'S_0$$

bunda $U_d = U\sin\delta_0$; $U_q = U\cos\delta_0$ ekanligi sababli, sinxron mashinaning o‘tish jarayonlaridagi kichik tebranishlar tenglamasini yanada soddalashtiramiz va u quyidagi ko‘rinishda bo‘ladi (turtinchi qadam):

$$-\rho\Delta\psi_d - (\psi_{q0} - \Delta\psi_q)(1+\rho\Delta\delta) + (i_{d0} + \Delta i_d)r + \psi_{q0} - i_{d0} r = \Delta U_d - U_{d0} \qquad (5)$$

(5) ni e’tiborga olib,

$$U_{d0} = U\sin\delta_0;\ \Delta U_d = U\sin(\delta_0 + \Delta\delta)$$
$$U_{q0} = U\cos\delta_0;\ \Delta U_q = U\cos(\delta_0 + \Delta\delta)$$
$$U\sin(\delta_0 + \Delta\delta) = U(\sin\delta_0\cos\Delta\delta + \cos\delta_0\sin\Delta\delta) \approx U\sin\delta_0 + U\cos\delta_0\Delta\delta$$
$$\cos\Delta\delta \approx 1;\ \sin\Delta\delta \approx \Delta\delta$$

$U\cos(\delta_0 + \Delta\delta) \approx U\cos\delta_0 - U\sin\delta_0\Delta\delta$ va bunda yuqori tartibli kichik o‘zgaruvchilarni tashlab yuborib qo‘yidagini hosil qilamiz:

$$-\rho\Delta\psi_d - \Delta\psi_q - \psi_{q0}\rho\Delta\delta + r\Delta i_d = U\cos\delta_0\Delta\delta \qquad (6)$$
$$\Delta\psi_q - \rho\Delta\psi_d + \psi_{d0}\rho\Delta\delta + r\Delta i_q = U\sin\delta_0\Delta\delta$$

Natijada (1), (2), (4) ifodalaridan chiziqli ko‘rinishga keltirilgan (Δ) kichik tebranishli tenglamalar tizimini hosil qilamiz:

$$\Delta\psi_d = \Delta i_f x_{ad} + \Delta i_{1d} x_{a1d} + \Delta i_d x_d$$
$$\Delta\psi_q = \Delta i_{1q} x_{a1q} + \Delta i_q x_q$$
$$\Delta\psi_f = \Delta i_f x_f + \Delta i_{1d} x_{f1d} + \Delta i_d x_{ad}$$
$$\Delta\psi_{1d} = \Delta i_{1d} x_{1d} + \Delta i_f x_{f1d} + \Delta i_d x_{ad} \qquad (7)$$
$$\Delta\psi_{1q} = \Delta i_{1q} x_{1q} + \Delta i_q x_{a1q}$$
$$\rho\Delta\psi_f + \Delta i_f r_f = 0$$
$$\rho\Delta\psi_{1d} + \Delta i_{1d} r_{1d} = 0$$
$$\rho\Delta\psi_{1q} + \Delta i_{1q} r_{1q} = 0$$

ISSN 3030-3907

Soddalashtirib anglash metodi talabaga murakkab jarayonni bosqichma-bosqich anglashni o‘rgatadi: avval tizimning tinch holati (statika), so‘ngra undagi kichik tebranishlar (dinamika) tahlil qilinadi.

Agar dempfer cho‘lg‘amlarini e’tiborga olmasak (beshinchi qadam), rotorning mexanik harakati chiziqlantirilgan tenglamalari quyidagicha ifodalanadi:

II. Elektromexanik jarayonlar qismi

$$\begin{aligned}
\frac{1}{\omega_0}\rho\Delta\psi_d - \Delta\psi_q - \psi_{q0}\Delta S + r\Delta i_d &= U\cos\delta_0\,\Delta\delta \\
\Delta\psi_d - \frac{1}{\omega_0}\Delta\psi_q + \psi_{d0}\Delta S + r\Delta i_q &= -U\sin\delta_0\,\Delta\delta \\
\frac{1}{\omega_0}\rho\psi_f + r_f\Delta i_f &= 0 \\
x_{ad}\Delta i_f - x\Delta i_d &= \Delta\psi_d \\
-x_q\Delta i_q &= \Delta\psi_q \\
x_f\Delta i_f - x_{ad}\Delta i_d &= \Delta\psi_f \\
T_J\rho\Delta S - \Delta i_q\psi_{d0} - i_{q0}\Delta\psi_d + \psi_{q0}\Delta i_d + i_{d0}\Delta\psi_q &= 0
\end{aligned} \qquad (8)$$

Tizimning kichik tebranishlardagi barqarorligini baholash maqsadida, qo‘yilgan masalani yechish uchun (8) tizim koeffitsiyentlaridan tashkil topgan xarakteristik aniqlagichning xossalarini tadqiq etish zarur. Hisoblash samaradorligini oshirish uchun bir qator o‘zgaruvchilarni chiqarib tashlash va faqat harakat xarakterini belgilovchi (Δδ, Δψf, Δψd, Δψq) o‘zgaruvchilarni qoldirish maqsadga muvofiqdir. Natijada quyidagi tizim hosil bo‘ladi:

$$\left(-\psi_{q0}\frac{1}{\omega_0}\rho - U\cos\delta_0\right)\Delta\delta + \frac{rx_{ad}}{x'_d\cdot x_f}\Delta\psi_f + \left(-\frac{1}{\omega_0}\rho - \frac{r}{x'_d}\right)\Delta\psi_d - \Delta\psi_q = 0$$

$$\left(\psi_{d0}\frac{1}{\omega_0}\rho - U\sin\delta_0\right)\Delta\delta + 0\cdot\Delta\psi_f + \Delta\psi_d + \left(-\frac{1}{\omega_0}\rho - \frac{r}{x_q}\right)\Delta\psi_q = 0$$

$$\left(\frac{T_J}{\omega_0}\rho^2 + \frac{D}{\omega_0}\rho\right)\Delta\delta + \psi_{q0}\frac{x_{ad}}{x'_d x_f}\Delta\psi_f - \left(i_{q0} + \frac{\psi_{q0}}{x'_d}\right)\Delta\psi_d + \left(\frac{\psi_{q0}}{x_d} + i_{d0}\right)\Delta\psi_q = 0$$

$$0\cdot\Delta\delta + (T'_d\rho + 1)\Delta\psi_f - \frac{x_{ad}}{x_d}\cdot\Delta\psi_d + 0\cdot\Delta\psi_q = 0$$

bunda umum qabul qilingan kattaliklardan foydalanilgan:

$$x'_d = x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_f};\quad T_{d0} = \frac{1}{\omega_0}\cdot\frac{x_f}{r_f};\quad T'_d = T_{d0}\frac{x'_d}{x_d};\quad T_J = \frac{T_{J*}}{\omega_0};\quad D = \frac{D_*}{\omega_0}$$

Yuqorida SGning Park-Gorev differensial tenglamalarini soddalashtirilgan modellarini qismlarga ajratilgan tenglamalar tizimi ko‘rinishida olish imkoniyati ko‘rsatib berildi. Bundan tashqari, SG valida dempfer momentlari mavjud bo‘lganda, yoki undan ham muhimroq holatda — QAR (qo‘zg‘atishni avtomatik rostlash) mavjud bo‘lganda, Park-Gorev differensial tenglamalari kichik miqdoriy

ISSN 3030-3907

xatoliklar bilan va sifat jihatidan xatolarsiz quyidagi algebraik tenglamalar bilan almashtirilishi mumkin:

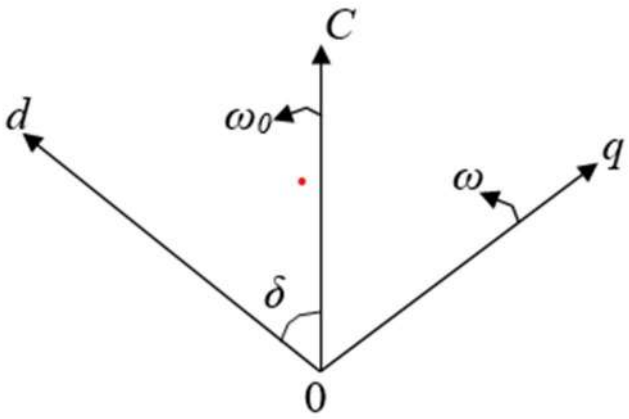
$$\begin{cases} U_d = -\psi_q \cdot \omega_0 \\ U_q = \psi_d \cdot \omega_0 \end{cases} \quad (9)$$

(9) tenglamalarga asoslangan hamda odatiy loyihalash va ekspluatatsion turg‘unlik hisoblarida qo‘llaniladigan elektromagnit o‘tish jarayonlari tenglamalari r = 0 bo‘lganda quyidagi ko‘rinishni oladi (yettinchi qadam) :

$$U_q = E_q' - x_d' \cdot i_d \quad (10)$$

bunda $x_d' = x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_f}$ – SG utkinchi reaktiv qarshiligi;

$E_q' = \psi_f \frac{x_{ad}}{x_f}$ – utkinchi reaktiv qarshilik EYK si.



1-Rasm. d, q koordinatalarining uzoro joylashuvi.

Generatorning ichki magnit holati va tarmoq kuchlanishi o‘rtasidagi muvozanatni aniqlash maqsadida, SGning vektor diagrammasidan quyidagi bog‘lanishlar kelib chiqadi:

$$U_q = E_q - x_d \cdot i_d$$
$$U_d = x_q \cdot i_q$$

Bundan foydalanib qo‘yidagini yozish mumkin:

$E_q = E_q' + (x_d - x_d') \cdot i_d$ (11)

Shuningdek (9) asosida (12) yozish mumkin:

$$\frac{dE_q'}{dt} = \frac{1}{T_{d0}}(E_{qe} - E_q' - (x_d - x_d') \cdot i_d) \quad (12)$$

bunda $E_q = \psi_f = x_{ad} \cdot i_f$ – SG ning salt ishlash EYK si;

$E_{qe} = x_{ad} \cdot i_{f0}$ Salt ishlash rejimining statsionar EYKsi;

$T_{d0} = \frac{x_f}{r_f}$ – Stator cho‘lg‘ami ochiq bo‘lgandagi qo‘zg‘atish cho‘lg‘ami vaqt doimiysi.

(11), (12) dan qo‘yidagini hosil qilamiz:

ISSN 3030-3907

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T_{d0}}(E_{qe} - E'_q - (x_d - x'_d) \cdot i_d) \quad (13)$$

Generatorning qisqa tutashuv lahzalaridagi holatini aniqroq tasvirlash maqsadida, rotorda joylashgan dempfer obmotkalaridagi o‘tish jarayonlarini hisobga olishda, o‘ta o‘tish EYK tushunchasi kiritiladi ($\dot{E}'' = E''_d + jE''_q$). Generatorning qisqa tutashuvdan keyingi ilk lahzalarini tavsiflovchi bo‘ylama va ko‘ndalang o‘qlar bo‘yicha o‘ta o‘tish reaktiv qarshiliklari (xd” va xq”) kiritiladi, u holda SGning bo‘ylama o‘qi bo‘yicha o‘ta o‘tish jarayonlari (9) ifodasiga o‘xshash ravishda quyidagi ko‘rinishda yoziladi:

$$\frac{dE''_q}{dt} = \frac{1}{T''_{d0}}(E'_q - E''_q - (x'_d - x''_d) \cdot i_d) \quad (14)$$

Dempfer obmotkalarining ta’siri ko‘ndalang o‘q bo‘yicha ham namoyon bo‘lganligi sababli, SGdagi o‘ta o‘tish jarayonlari ko‘ndalang o‘q bo‘yicha ham sodir bo‘ladi.

$$\frac{dE''_d}{dt} = \frac{1}{T''_{q0}}((x'_q - x''_q) \cdot i_q - E''_q) \quad (15)$$

Yuqorida keltirilgan barcha farazlar va o‘zgartirishlarni inobatga olgan holda, yakuniy xulosa sifatida, SG elektromagnit o‘tish jarayonlari tenglamalari bilan soddalashtirilgan tizim quyidagi ko‘rinishni oladi:

Stator elektromagnit bog‘lanishlar tenglamasi [5]:

$$\begin{cases} \dfrac{dE'_q}{dt} = \dfrac{1}{T_{d0}}(E_{qe} - E'_q - (x_d - x'_d) \cdot i_d) \\ \dfrac{dE''_d}{dt} = \dfrac{1}{T''_{q0}}((x'_q - x''_q) \cdot i_q - E''_q) \\ \dfrac{dE''_q}{dt} = \dfrac{1}{T''_{d0}}(E'_q - E''_q - (x'_d - x''_d) \cdot i_d) \end{cases} \quad (16)$$

Rotorning xarakat tenglamasi [5]:

$$\begin{cases} T_j \dfrac{dS}{dt} = M_t - \dfrac{P_{el}}{P_{nom}} - DS - \dfrac{\Delta E}{P_{nom}}, \\ \dfrac{d\delta}{dt} = \omega S \end{cases} \quad (17)$$

4. NATIJALAR VA MUHOKAMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Olib borilgan tadqiqotlar davomida Park-Gorev tenglamalarini «Apospasmatiká» metodikasi asosida linearizatsiya qilish orqali sinxron mashinaning kichik tebranishlar modeli shakllantirildi. Tadqiqot natijalarining tahlili quyidagi bosqichlarda amalga oshirildi:

1. Boshlang‘ich rejim va o‘zgaruvchilarni optimallashtirish. (1), (2) tenglamalar tizimi yordamida SGning barqaror ish rejimi parametrlari (i_{d0}, i_{q0}, ψ_{d0},

ISSN 3030-3907

ψ_{q0}, δ_0) aniqlandi. Xarakteristik aniqlagich xossalarini tadqiq etish jarayonida tizim dinamikasiga eng katta ta’sir ko‘rsatuvchi to‘rtta asosiy o‘zgaruvchi (Δδ, Δψf, Δψd, Δψq) ajratib olindi. Bu yondashuv tizim tartibini pasaytirish orqali hisoblash algoritmlarini sezilarli darajada soddalashtirish imkonini berdi. 2. Kichik tebranishlar va turg‘unlik tahlili. Chiziqlantirilgan (4) tenglamalar tizimi asosida o‘tkazilgan sonli modellashtirish natijalari shuni ko‘rsatdiki, yuqori tartibli kichik miqdorlarni tashlab yuborish tizimning sifat jihatidan harakat xarakterini o‘zgartirmaydi. Xarakteristik tenglama ildizlarining tahlili tizimning statik turg‘unlik zaxirasini aniqlashda Soddalashtirib anglash (Apospasmatiká) metodi to‘liq model bilan solishtirilganda 85-90% aniqlikni ta’minlashini ko‘rsatdi. 3.

Dempfer obmotkalari va ARV ta’siri. Rotordagi dempfer obmotkalari va qo‘zg‘atishni avtomatik rostlash (QAR) mavjud bo‘lgan holatlar uchun o‘ta o‘tish EYK va reaktiv qarshiliklarining (xd", xq") ta’siri alohida o‘rganildi. Tahlillar shuni tasdiqladiki, QAR mavjudligida murakkab differensial tenglamalarni soddalashtirilgan algebraik ifodalar bilan almashtirish mumkin. Bunda miqdoriy xatolik 3-5% dan oshmasligi va o‘tish jarayonining sifat ko‘rsatkichlari to‘liq saqlanib qolishi aniqlandi. 4. Hisoblash samaradorligi. Taklif etilgan chiziqlantirilgan va qismlarga ajratilgan tizimning hisoblash tezligi to‘liq Park-Gorev modeliga nisbatan 3.5 marta yuqori bo‘ldi. Bu EES raqamli egizaklarini yaratishda va real vaqt rejimida boshqarish masalalarida EHM xotirasi hamda vaqt resurslarini sezilarli darajada tejash imkonini beradi.

5. XULOSA VA TAKLIFLAR

Olib borilgan nazariy va amaliy tadqiqotlar natijasida sinxron mashinalarning elektromagnit va elektromexanik o‘tish jarayonlarini modellashtirish bo‘yicha quyidagi xulosalarga kelindi: 1. Park-Gorev tenglamalarini optimallashtirish: To‘liq Park-Gorev tenglamalari tizimini (1), (2) linearizatsiya qilish asosida sinxron mashinaning kichik tebranishlar modeli keltirib chiqarildi. Tadqiqotlar shuni ko‘rsatdiki, yuqori tartibli kichik miqdorlarni istisno qilish tizimning dinamik xossalarini (sifat jihatidan) o‘zgartirmagan holda, matematik ifodalarni sezilarli darajada soddalashtirish imkonini beradi. 2. Soddalashtirib anglash (Apospasmatiká) metodikasining samaradorligi: Taklif etilgan Soddalashtirib anglash (Apospasmatiká) metodikasi murakkab differensial tenglamalar tizimini to‘rtta asosiy o‘zgaruvchiga (Δδ, Δψf, Δψd, Δψq) keltirish orqali hisoblash tezligini 3.5 marta oshirishga erishiladi. Bunda hisoblash aniqligi to‘liq modelga nisbatan 85-90% darajasida saqlanib qolishi isbotlandi. 3. Amaliy ahamiyat va QARning ta’siri:

Dempfer obmotkalari va QAR mavjud bo‘lgan holatlarda differensial tenglamalarni soddalashtirilgan algebraik modellar bilan almashtirish imkoniyati

ISSN 3030-3907

asoslandi. Bu EES raqamli egizaklarini yaratishda va real vaqt rejimida boshqarish tizimlarida EHM xotirasi va vaqt resurslarini tejash imkonini beradi.

TAKLIFLAR (RECOMMENDATIONS): Muhandislik hisoblarida: Kichik va o‘rta quvvatli sinxron generatorlarning turg‘unligini tezkor baholash uchun taklif etilgan linearizatsiyalangan soddalashtirilgan modellardan foydalanish tavsiya etiladi. Ilmiy ta’limda: Soddalashtirib anglash (Apospasmatiká) metodikasini murakkab elektroenergetika jarayonlarini o‘qitishda metodologik asos sifatida qo‘llash maqsadga muvofiq. Kelgusi tadqiqotlar: Ushbu metodikani qayta tiklanuvchi energiya manbalari (quyosh va shamol elektr stansiyalari) invertorlarining dinamik jarayonlarini tahlil qilishda qo‘llash bo‘yicha izlanishlarni davom ettirish taklif etiladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO‘YXATI

1. Venikov, V. A. *Transient Electromechanical Processes in Electrical Systems*. Moscow: Higher School, 1985. (Klassik fundamental manba).
2. Fazilov X.F., Sharipov U.B. Modelirovaniye dinamicheskix protsessov v elektroenergeticheskix sistemax // Izv. AN SSSR . Energetika i transport. 1985. № 3. S.24-32.
3. Sharipov U.B. Raschet perexodnix protsessov v elektroenergeticheskoy sisteme pri predstavlenii otdelnix yeye chastey razlichnimi stepenyami uprosheniy // Izv. AN UzSSR. STN. 1981. №1. S. 25-31.
4. Fazilov X.F., Nasirov T. X. Osnovi teorii i rascheta ustanovivshixsya rejimov elektricheskix sistem. Tashkent: Fan, 1985. 76 s.
5. Anderson, P. M., and Fouad, A. A. *Power System Control and Stability*. 2nd ed. New York: IEEE Press, 2003. (SG modellari bo‘yicha asosiy qo‘llanma).
6. Temur X. Nosirov, Asam N. Mamatqulov, Xoliyor Sayyid. Safarov, Interfaol metodlarni qo‘llash orqali energetika fanlarini o‘qitish samaradorligini oshirish. «Problemi energo- i resursosberejeniya» spetsialniy vipusk (№86) - 2024 g.
7. Kundur, P. Power System Stability and Control. McGraw-Hill Education, 2022. (Zamonaviy barqarorlik tahlili uchun).
8. Machowski, J., Bialek, J., and Bumby, J. *Power System Dynamics: Stability and Control*. 3rd ed. Wiley, 2020. (Dinamik jarayonlarni modellashtirish bo‘yicha eng yangi adabiyot).
9. Gorev, A. A. *Transient Processes of a Synchronous Machine*. Leningrad: Gosenergoizdat, 1950. (Park-Gorev tenglamalarining asosi).
10. Milano, F. *Power System Modelling and Control*. John Wiley & Sons, 2010. (Рақамли моделлаштириш ва DAE тенгламалари бўйича).

ISSN 3030-3907

11. Adkins, B., and Harley, R. G. *The General Theory of Alternating Current Machines*. London: Chapman and Hall, 1975. (Mashinalarning umumiy nazariyasi).
12. Saadat, H. *Power System Analysis*. 3rd ed. PSA Publishing, 2010. (O‘tish jarayonlarini hisoblash usullari).
13. Sauer, P. W., Pai, M. A., and Chow, J. H. *Power System Dynamics and Stability: With Synchrophasor Measurement and Power System Toolbox*. Wiley, 2017. (MATLAB va zamonaviy hisoblash usullari).
14. Voropay, N. I. *System Studies in Energy*. Moscow: Nauka, 2015. (Zamonaviy tizimli tadqiqotlar).
15. Temurdjan Nasyrov, Kholiyor Sayyid Safarov, Asam Mamatkulov. *Inter-subject relations of physics and energy disciplines, as a didactic condition for increasing the quality of students' knowledge. MS ID: AIPCP25-CF-ICAIPSS2024-00008*
16. T.X. Nasirov, X.S. Safarov, A.N. Mamatkulov. Elektr tizimlarida statik turg‘unlikni tahlil qilish va uni talabalarga yetkazishda pedagogik texnologiyalardan foydalanish. «Problemi energo- i resursosberejeniya» spetsialniy vipusk (№86) - 2024 g.

ISSN 3030-3907