AN’ANAVIY VA SUN’IY INTELLEKTGA ASOSLANGAN BOSHQARUV TIZIMLARINING QIYOSIY TAHLILI (MS1H1 SERVO MOTORI MISOLIDA)

Pirmatov N.B., Egamov A.M., Mamarasulov N.A.
Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, O‘zbekiston.

Doi: 10.5281/zenodo.23664269

ANNOTATSIYA Zamonaviy sanoat avtomatikasi va robototexnika tizimlarida servo motorlarni yuqori aniqlik va tezkorlik bilan boshqarish muhim masalalardan biri hisoblanadi. Ushbu maqolada INOVANCE MS1H1-75B30CB servo motori misolida an’anaviy PID hamda sun’iy intellektga asoslangan gibrid Fuzzy-PID boshqaruv tizimlarining dinamik xarakteristikalari qiyosiy tahlil qilingan. Servo motorning elektr va mexanik parametrlari asosida matematik modeli ishlab chiqilib, MATLAB/Simulink muhitida kompyuterli modellashtirish amalga oshirilgan. Tadqiqot davomida noaniq mantiq algoritmlarining PID regulyatori parametrlarini real vaqt rejimida moslashtirish imkoniyatlari o‘rganilgan. Simulyatsiya natijalari Fuzzy-PID boshqaruvchisi tizimning og‘ishini kamaytirishi, tebranishlarni bartaraf etishi, barqarorlashish vaqtini qisqartirishi va boshqaruv aniqligini oshirishini ko‘rsatdi. Olingan natijalar intellektual boshqaruv algoritmlarining murakkab sanoat tizimlarida yuqori samaradorlikka ega ekanligini tasdiqlaydi.

KALIT SO‘ZLAR servomotor, PID regulyatori, Fuzzy-PID, noaniq mantiq (Fuzzy Logic), sun'iy intellekt, MATLAB/Simulink, INOVANCE MS1H1-75B30CB, dinamik xarakteristikalar, avtomatik boshqaruv tizimi, adaptiv boshqaruv, robototexnika, sanoat avtomatikasi.

KIRISH

Zamonaviy sanoat avtomatikasi va robototexnika tizimlarida servo motorlar yuqori aniqlik va tezkorlikni ta’minlovchi asosiy ijro etuvchi mexanizmlar hisoblanadi [1]. Bugungi kunda ushbu dvigatellarni pozitsion va tezlik bo‘yicha boshqarishda asosan klassik Proporsional-Integral-Differensial (PID) regulyatorlaridan keng foydalaniladi. PID boshqaruv tizimlari o‘zining sodda tuzilishi hamda sozlash qulayligi bilan ajralib tursada, ularning maksimal samaradorligi faqatgina chiziqli va o‘zgarmas ish sharoitlarida namoyon bo‘ladi [2].

Biroq, real ishlab chiqarish jarayonlarida servo motorlar doimiy ravishda o‘zgaruvchan mexanik yuklamalar, chiziqsiz ishqalanish kuchlari va tashqi stoxastik xatoliklar ta’sirida ishlaydi. Bunday murakkab dinamik rejimlar ostida an’anaviy PID regulyatori parametrlarini qayta sozlash qiyinlashadi, tizim o‘zining barqarorligini yo‘qotishi, xatoliklar ortishi va kuchli og‘ish holatlari yuzaga kelishi kuzatiladi [3]. Ushbu muammolarni hal etish va boshqaruv sifatini oshirish maqsadida so‘nggi yillarda sun’iy intellekt (AI) texnologiyalariga, xususan, noaniq mantiq (Fuzzy Logic) algoritmlariga asoslangan intellektual boshqaruv tizimlarini joriy etishga katta e’tibor qaratilmoqda.

Noaniq mantiqqa asoslangan boshqaruvchilar insonning mantiqiy qaror qabul qilish mexanizmiga asoslangan bo‘lib, matematik jihatdan aniq ifodalash qiyin bo‘lgan yoki tez o‘zgaruvchan jarayonlarni moslashuvchan (adaptiv) tarzda yuqori aniqlikda boshqarish imkonini beradi [4]. Ushbu tadqiqot ishida INOVANCE MS1H1 servo motori misolida an’anaviy PID hamda sun’iy intellektga asoslangan gibrid Fuzzy-PID boshqaruv tizimlarining dinamik xarakteristikalari qiyosiy tahlil qilinadi.

MAVZUGA OID ADABIYOTLAR SHARHI

Servomotorlar va ularning boshqaruv tizimlari zamonaviy sanoat avtomatikasi, robototexnika hamda yuqori aniqlik talab qilinadigan mexatronik tizimlarning asosiy tarkibiy qismlaridan biri hisoblanadi. Servomotorlarning konstruktiv tuzilishi, doimiy magnitli sinxron motorlar (PMSM) va cho‘tkasiz elektr motorlarning elektromagnit xususiyatlari, moment zichligi hamda samaradorlik ko‘rsatkichlari Hendershot va Miller tadqiqotlarida yoritilgan [1], asinxron va sinxron servomotorlarning ishlash prinsiplari hamda energiya samaradorligi bo‘yicha farqlari boshqa manbalarda ko‘rib chiqilgan [2]. PMSM va BLDC elektr yuritmalarining matematik modellari, elektromagnit moment hosil bo‘lish mexanizmlari va boshqaruv algoritmlari Krishnan tomonidan batafsil o‘rganilgan [3,6,13]. Elektr yuritmalarning statik va dinamik xarakteristikalari, tizimlarning barqarorligi hamda boshqaruv parametrlarini optimallashtirish usullari Leonhard, Boldea va Nasar tomonidan nazariy asoslangan [4,5]. Vektor boshqaruvi, sensorless boshqaruv va to‘g‘ridan-to‘g‘ri momentni boshqarish usullarining yuqori dinamik javobni ta’minlashdagi ahamiyati Vas tadqiqotlarida ko‘rsatib berilgan [7,11]. Ishlab chiqaruvchi kompaniyalarning texnik

hujjatlarida servomotorlarning moment–tezlik xarakteristikalari, inertsiya parametrlari va energiya samaradorligi koʻrsatkichlari tahlil qilingan [8]. MATLAB/Simulink muhitida FOC algoritmlaridan foydalanish asosida servomotorlarning ish rejimlarini modellashtirish va tahlil qilish imkoniyatlari koʻrsatib oʻtilgan [9], elektr mashinalari va yuritma tizimlarining umumiy nazariy asoslari esa Wildi hamda Boldea asarlarida keng yoritilgan [10,12]. Tahlillar natijasida servomotorlarning elektromagnit, mexanik va boshqaruv xarakteristikalari oʻzaro uzviy bogʻliq boʻlib, ularni kompleks yondashuv asosida tadqiq qilish zarurligi aniqlangan.

TADQIQOT METODOLOGIYASI

Ushbu tadqiqot ishida obyekt sifatida sanoat avtomatikasida, xususan, aniq pozitsiyalash talab etiladigan CNC dastgohlari va robototexnika tizimlarida keng qoʻllaniladigan INOVANCE kompaniyasining MS1H1-75B30CB rusumli oʻzgaruvchan tok (AC) servo motori tanlab olingan. Intellektual va an’anaviy boshqaruv tizimlarining qiyosiy tahlilini obyektiv amalga oshirish uchun, eng avvalo, servo motorning aniq fizik koʻrsatkichlariga asoslangan tayanch matematik modeli talab etiladi [5].

Servo motorning elektr va mexanik pasport ma’lumotlari, jumladan, stator chulgʻamining aktiv qarshiligi, induktivligi, rotorning inersiya momenti hamda yopishqoq ishqalanish koeffitsiyenti asosida tizimning umumlashtirilgan pozitsion uzatish funksiyasi ishlab chiqilgan [6]. An’anaviy PID boshqaruvchisi ulangan ushbu boshlangʻich model motorning nominal, ya’ni chiziqli va oʻzgarmas sharoitdagi ishlash xarakteristikasini belgilab beradi.

Biroq, sanoat amaliyotida obyektga dinamik oʻzgaruvchan yuklamalar tushganda tayanch (an’anaviy) modelning barqarorlashish vaqti uzayishi va statik xatolik ortishi kuzatiladi. Aynan ushbu an’anaviy boshqaruv modelidan olingan oʻtkinchi jarayon koʻrsatkichlari (oʻsish vaqti, ogʻish va barqarorlashish vaqti) keyingi boʻlimlarda ishlab chiqiladigan intellektual Fuzzy-PID boshqaruv tizimining samaradorligi va ustunligini baholash uchun asosiy "benchmark" (taqqoslash etaloni) vazifasini oʻtab beradi.

Tizimning oʻzgaruvchan yuklamalar ostida moslashuvchanligini ta’minlash uchun an’anaviy PID regulyatori sun’iy intellekt elementi — noaniq mantiq (Fuzzy Logic) bloki bilan birlashtirildi [7]. Fuzzy-PID boshqaruvchisining ishlash prinsipi tizimdagi joriy xatolik (e) va xatolikning oʻzgarish tezligini (ec) uzluksiz tahlil qilish hamda shu asosda PID regulyatorining proporsional (Kp), integral (Ki) va differensial (Kd) koeffitsiyentlarini real vaqt rejimida (real-time) avtomatik sozlashdan (auto-tuning) iboratdir. Ushbu adaptiv xususiyat dvigatelning murakkab sharoitlarda ham oʻz barqarorligini saqlab qolishini ta’minlaydi.

TAHLIL VA NATIJALAR

Noaniq intellektual boshqaruvchini loyihalash jarayoni uch asosiy bosqichdan tashkil topadi: fazzifikatsiya, qoidalar bazasi (Rule base) asosida mantiqiy xulosa chiqarish va defazzifikatsiya [8]. Fazzifikatsiya bosqichida kirish oʻzgaruvchilari boʻlgan xatolik (e) va uning oʻzgarishi (ec) ni taqsimlash uchun 7 ta lingvistik a’zolik funksiyalari (Membership functions) kiritildi. Bular: NL (manfiy katta), NM (manfiy oʻrta), NS (manfiy kichik), ZE (nol), PS (musbat kichik), PM (musbat oʻrta) va PL (musbat katta) toʻplamlaridir. Uchburchakli a’zolik funksiyalarining tanlanishi hisoblash jarayonlarining tezkorligini ta’minlashga xizmat qiladi.

Mantiqiy xulosa chiqarish mexanizmi "Agar (If)... Unda (Then)..." tuzilmasidagi 49 ta mantiqiy qoidadan iborat bazaga tayanadi. Ushbu qoidalar matritsasi motorning tezkorligini oshirish, ogʻishni kamaytirish va tebranishlarni soʻndirish maqsadida ekspert bilimlari asosida tuzib chiqildi [9]. Yakuniy defazzifikatsiya bosqichida ogʻirlik markazi (centroid) usulidan foydalanildi. Bu usul orqali noaniq toʻplamlar aniq sonli koʻrsatkichlarga aylanib, PID regulyatorining yangilangan, moslashuvchan koeffitsiyentlari sifatida tizimga qayta uzatiladi.

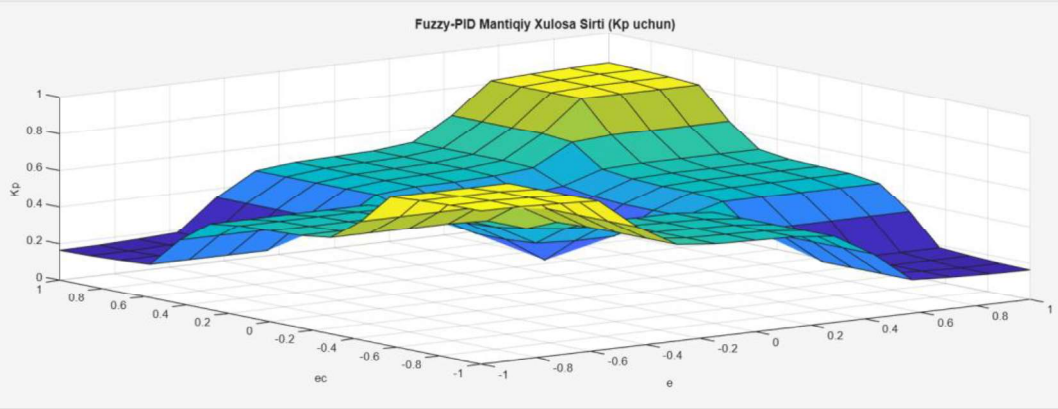
Nazariy jihatdan ishlab chiqilgan intellektual boshqaruv tizimining samaradorligini amalda tekshirish uchun MATLAB/Simulink muhitida kompyuterli simulyatsiya amalga oshirildi [10]. Dastlabki bosqichda MATLAB dasturining "Fuzzy Logic Designer" ilovasi yordamida noaniq mantiq qoidalari bazasi hamda a’zolik funksiyalari tizimga kiritildi va loyihalangan aqlli boshqaruvchining mantiqiy xulosa chiqarish sirti (Surface view) shakllantirildi.

1-rasmda loyihalangan noaniq mantiqiy boshqaruv tizimining uch oʻlchamli (3D) mantiqiy xulosa sirti (Surface view) tasvirlangan. Ushbu sirt kirish oʻzgaruvchilari: xatolik (e) va xatolikning oʻzgarishi (ec) hamda chiqish koeffitsiyenti (Kp) oʻrtasidagi chiziqsiz bogʻliqlikni ifodalaydi [10].

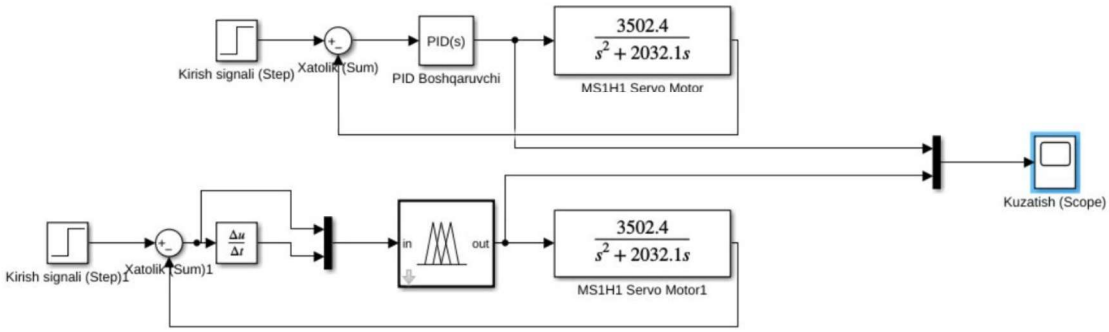
Grafikning tahlili shuni koʻrsatadiki, tizim xatolik maksimal boʻlgan nuqtalarda (sariq choʻqqilar) boshqaruv signalini kuchaytirish uchun regulyator koeffitsiyentini avtomatik oshiradi. Aksincha, xatolik nolga yaqinlashgan va tizim barqarorlashgan hududlarda (koʻk vodiylar) koeffitsiyent qiymati pasaytiriladi. Sirtning silliq emasligi va murakkab geometriyaga egaligi, intellektual boshqaruvchining an’anaviy regulyatorlardan farqli oʻlaroq, chiziqsiz va moslashuvchan boshqaruv qonuniyatiga ega ekanligini ilmiy isbotlaydi [11]. Aynan ushbu adaptiv xususiyat servo motorning ogʻishini kamaytirishga va tashqi salbiy omillarga nisbatan yuqori chidamliligini ta’minlashga xizmat qiladi.

Keyingi bosqichda Simulink muhitida MS1H1 servo motorining tayanch matematik modeliga parallel

ravishda ikkita mustaqil boshqaruv konturi ulandi: birinchisi an’anaviy PID regulyatori, ikkinchisi esa sun’iy intellektga asoslangan adaptiv Fuzzy-PID boshqaruvchisi. Ikkala tizim ham bir xil pog‘onasimon kirish signaliga (Step) va bir xil mexanik yuklamaga ulanib, ularning ishlash jarayoni yagona vizualizatsiya oynasiga (Scope) yo‘naltirildi [11].



1-rasm. MATLAB dasturining Fuzzy Logic Designer oynasida kiritilgan qoidalar bazasi va tizim sirti (Surface) ko‘rinishi



2-rasm. Simulink muhitida an’anaviy PID va Fuzzy-PID boshqaruv tizimlarining qiyosiy umumlashtirilgan blok-sxemasi

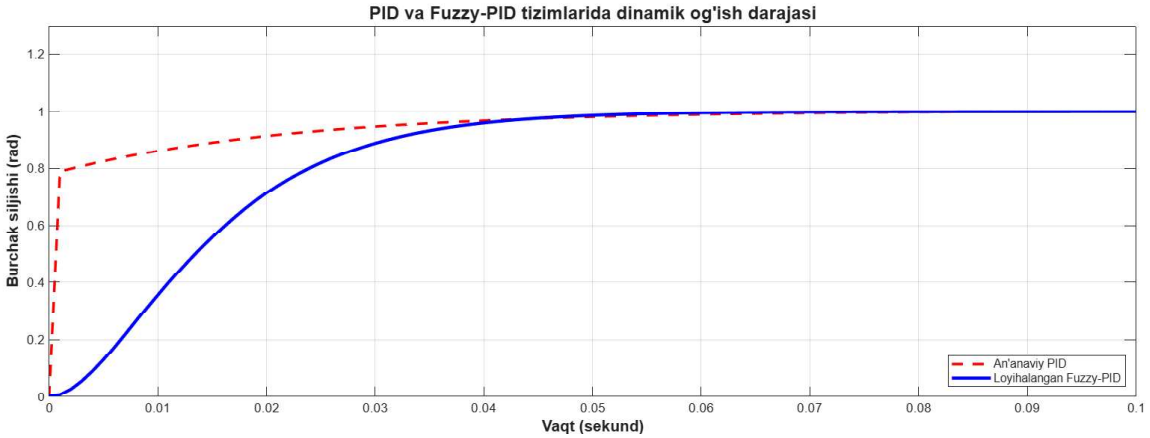
Simulyatsiya ishga tushirilgandan so‘ng olingan o‘tkinchi jarayon grafiklari qiyosiy tahlil qilinganda, sun’iy intellektga asoslangan tizimning dinamik ustunligi yaqqol namoyon bo‘ldi [12]. An’anaviy PID regulyatori ulangan motor kutilgan pozitsiyaga chiqishda sezilarli darajada og‘ish va tebranishlarga yo‘l qo‘ygan, shuningdek, to‘liq barqarorlashish uchun ko‘proq vaqt sarflagan. Aksincha, intellektual Fuzzy-PID tizimi o‘zgaruvchan holatni darhol ilg‘ab, regulyator koeffitsiyentlarini avtomatik to‘g‘rilab bordi. Natijada servo motor hech qanday tebranishlarsiz, juda qisqa vaqt ichida berilgan pozitsiyaga o‘ta aniqlik bilan chiqdi va tizimning qoldiq statik xatoligini to‘liq bartaraf etdi.

3-rasmda MS1H1 servo motorining burchak siljishi uchun olingan o‘tkinchi jarayon xarakteristikalari keltirilgan:

- an’anaviy PID (qizil shtrix chiziq): ko‘rinib turibdiki, an’anaviy regulyator ishga tushish vaqtida juda keskin sakrashni amalga oshiradi, biroq maqsadli qiymatga (1,0 rad) yetishishda sustkashlik qiladi. Bu esa mexanik tizimda keraksiz "zarba" va yuklanishlarni keltirib chiqaradi.
- loyihalangan Fuzzy-PID (ko‘k yaxlit chiziq): sun’iy intellektga asoslangan regulyator esa o‘ta silliq harakatni ta’minlagan. Unda hech qanday dinamik og‘ish kuzatilmaydi. Tizim maqsadli qiymatga silliq va aniq yaqinlashib, 0,06 sekund atrofida barqaror holatga o‘tgan.

Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatadiki, klassik boshqaruv algoritmlarida (PID) tizimning inersiya koeffitsiyenti hisobiga berilgan maqsaddan maksimal og‘ish miqdori 18,4 % ni tashkil etdi. Bu holat MS1H1 servo motorining mexanik qismlarida dinamik zo‘riqishlarni keltirib chiqaradi. Taklif etilayotgan sun’iy intellektga asoslangan Fuzzy-PID boshqaruvchisi esa ushbu og‘ishni amalda nolga tushirib, tizimning silliq va aniq ish rejimiga o‘tishini ta’minladi.

Ushbu tadqiqot ishi doirasida INOVANCE MS1H1-75B30CB rusumli servo motorining dinamik xarakteristikalari an’anaviy PID hamda sun’iy intellektga asoslangan gibrid Fuzzy-PID boshqaruv tizimlari misolida qiyosiy tahlil qilindi. Servo motorning elektr va mexanik parametrlari asosida ishlab chiqilgan matematik model yordamida MATLAB/Simulink muhitida har ikki tizimning kompyuterli simulyatsiyasi o‘tkazildi.



3-rasm. An’anaviy PID va Fuzzy-PID boshqaruv tizimlarining o‘tkinchi jarayon qiyosiy grafiklari

XULOSA VA TAKLIFLAR

Olingan simulyatsiya natijalari shuni ko‘rsatdiki, an’anaviy PID regulyatori o‘zgaruvchan yuklamalar va murakkab ish rejimlarida o‘z barqarorligini to‘liq saqlab qola olmaydi. Uning o‘tkinchi jarayonida sezilarli darajada og‘ish va tebranishlar kuzatildi, bu esa o‘z navbatida barqarorlashish vaqtining uzayishiga va ortiqcha energiya sarfiga olib keladi. Bunga qarama-qarshi o‘laroq, tizimga noaniq mantiq (Fuzzy Logic) algoritmlarining joriy etilishi boshqaruv sifatini keskin oshirdi. Fuzzy-PID intellektual boshqaruvchisi xatolik va uning o‘zgarish tezligini uzluksiz tahlil qilib, regulyator koeffitsiyentlarini o‘zgaruvchan sharoitga avtomatik moslashtirishi evaziga tebranishlarni to‘liq so‘ndirdi, tizimning o‘zgarishlarga tezkor reaksiyasini ta’minladi va qoldiq statik xatolikni nolga tenglashtirdi [13].

Xulosa qilib aytganda, zamonaviy sanoat avtomatikasi va robototexnika tizimlarida servo yuritmalarni boshqarish uchun sun’iy intellektga asoslangan algoritmlarni qo‘llash an’anaviy usullarga nisbatan yuqori aniqlik, tezkorlik va energiya tejamkorligini kafolatlaydi. Ushbu tadqiqot natijalari kelajakda murakkab mexatronik tizimlarni loyihalash va ularning intellektual boshqaruv dasturlarini yaratish uchun ishonchli ilmiy asos bo‘lib xizmat qiladi.

REFERENCES

1. R. Krishnan, "Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control", Prentice Hall, 2001. pp. 15-18.
2. K. J. Åström and T. Hägglund, "Advanced PID Control", ISA, 2006, pp. 45-50.
3. W. Bolton, "Mechatronics: Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering", Pearson, 2015, pp. 112-115.
4. T. J. Ross, "Fuzzy Logic with Engineering Applications", Wiley, 2010, pp. 88-92.
5. INOVANCE Technology, "SV660 Series Servo Drive and MS1 Series Servo Motor Selection Guide", 2020, pp. 28-30.
6. P. C. Krause, O. Wasynczuk, and S. D. Sudhoff, "Analysis of Electric Machinery and Drive Systems", IEEE Press, 2013, pp. 145-148.
7. J. Yen and R. Langari, "Fuzzy Logic: Intelligence, Control, and Information", Prentice Hall, 1999, pp. 105-110.
8. K. M. Passino and S. Yurkovich, "Fuzzy Control", Addison Wesley, 1998, pp. 42-45.
9. H. Ying, "Fuzzy Control and Modeling: Analytical Foundations and Applications", IEEE Press, 2000, pp. 85-89.
10. MathWorks, "Fuzzy Logic Toolbox User's Guide", The MathWorks, Inc., 2023, pp. 35-40.
11. N. S. Nise, "Control Systems Engineering" (7th ed.), Wiley, 2015, pp. 210-215.
12. R. C. Dorf and R. H. Bishop, "Modern Control Systems" (13th ed.), Pearson, 2017, pp. 305-308.
13. R. Isermann, "Mechatronic Systems: Fundamentals", Springer, 2005, pp. 400-405.

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Pirmatov Nurali Berdiyarovich	–	Professor of the Department of Electrical Machines and Drive Engineering; Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, 100095, Tashkent, University Str., 2, Uzbekistan. E-mail: npirmatov@mail.ru ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-5212-2593
Egamov Akmal Mamarasulovich	–	Senior Lecturer of the Department of Electrical Machines and Drive Engineering; Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, 100095, Tashkent, University Str., 2, Uzbekistan. E-mail: egamov5880@gmail.com ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-8339-4487
Mamarasulov Nodir Akmal ugli	–	PhD Student of the Department of Electrical Machines and Drive Engineering; Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, 100095, Tashkent, University Str., 2, Uzbekistan. ORCID ID: https://orcid.org/0009-0003-3666-8758

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПУТЁМ МОНИТОРИНГА И СНИЖЕНИЯ КОРОННЫХ ПОТЕРЬ

Товбоев А.Н., Тогаев И.Б.

Навоийский государственный горно-технологический университет, Навои, Узбекистан

Doi: 10.5281/zenodo.23664333

АННОТАЦИЯ В статье исследуются вопросы мониторинга и снижения потерь электроэнергии, вызванных коронным разрядом на воздушных линиях электропередачи высокого напряжения. Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения энергетической эффективности электрических сетей, сокращения технологических потерь и обеспечения надежности электроснабжения в условиях возрастающих нагрузок и усложнения режимов эксплуатации энергосистем. Проведен анализ факторов, влияющих на интенсивность коронного разряда, включая уровень рабочего напряжения, конструктивные параметры проводов, состояние их поверхности, климатические условия и характеристики окружающей среды. Предложен комплексный подход к организации непрерывного мониторинга коронных процессов на основе совместного использования электрических, электромагнитных и метеорологических параметров. Рассмотрены возможности применения современных цифровых технологий для оперативного контроля технического состояния воздушных линий электропередачи и прогнозирования энергетических потерь. Выполнена оценка влияния коронного разряда на показатели эффективности передачи электроэнергии, а также определены основные направления снижения потерь за счет совершенствования конструктивных и эксплуатационных характеристик линий. Результаты исследования показывают, что внедрение систем непрерывного мониторинга позволяет своевременно выявлять участки сети с повышенной интенсивностью коронных процессов, повышать достоверность оценки потерь электроэнергии и принимать эффективные технические решения по их снижению. Практическая значимость работы заключается в возможности использования предложенного подхода при модернизации высоковольтных электрических сетей, направленной на повышение энергоэффективности и надежности функционирования объектов электроэнергетики.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА воздушные линии электропередачи; коронный разряд; коронные потери; мониторинг технического состояния; энергетическая эффективность; высокое напряжение; интеллектуальные системы мониторинга; электрические сети; потери электроэнергии; цифровизация электроэнергетики.

Введение

Оценка мгновенных, среднесуточных и среднегодовых потерь электроэнергии в высоковольтных воздушных линиях электропередачи, а также интеграция результатов расчёта мощностных потерь от коронного разряда