

## ELEKTROMEXANIK O'TKINCHI JARAYONLARNI TALABALARGA APOSPASMATIKA VA INTERAKT METODIKALARI ASOSIDA TAHLIL QILISHNI O'RGATISH

**Annotatsiya.** Ushbu maqolada elektr energetikasi ta'lim yo'nalishi talabalariga elektromexanik o'tkinchi jarayonlarni o'rgatishda mualliflik «Aospasmatika» va «InterAkt» integrativ pedagogik metodikalarini qo'llash masalalari tadqiq etilgan. Sinxron generatorlarning avtomatik rostdlash tizimlari dinamikasi va turg'unlik mezonlari aniq texnik masala hamda raqamli simulyatsiya modeli muhitida tahlil qilingan. Maqolada tizimning statik aniqligi va dinamik turg'unligi o'rtasidagi o'zaro bog'liqlik nomlangan jismoniy birliklardagi hisob-kitoblar orqali ko'rsatib berilgan. Pedagogik eksperiment natijalari matematik-statistik metodlar yordamida asoslangan.

**Kalit so'zlar:** elektromexanik o'tkinchi jarayonlar, Aospasmatika, InterAkt, sinxron generator, tezlik xatoligi, Gurvits mezoni, raqamli simulyatsiya, nomlangan birliklar.

## ОБУЧЕНИЕ СТУДЕНТОВ АНАЛИЗУ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ АПОСПАСМАТИКИ И ИНТЕРАКТИВНЫХ МЕТОДИК

**Аннотация.** В статье исследуются вопросы применения авторских интегративных педагогических методик «Аопасматика» и «ИнтерАкт» при обучении студентов электроэнергетических специальностей анализу электромеханических переходных процессов в электрических системах. Динамика систем автоматического регулирования синхронных генераторов и критерии устойчивости проанализированы на примере конкретной технической задачи в среде цифрового моделирования. Показана взаимосвязь между статической точностью и динамической устойчивостью системы с использованием расчетов в именованных физических величинах. На основе математико-статистических методов обоснованы результаты педагогического эксперимента.

**Ключевые слова:** электромеханические переходные процессы, Аопасматика, ИнтерАкт, синхронный генератор, скоростная ошибка, критерий Гурвица, цифровое моделирование.

## TEACHING STUDENTS TO ANALYZE ELECTROMECHANICAL TRANSIENT PROCESSES BASED ON APOSPASMATICS AND INTERACTIVE METHODOLOGIES

**Abstract.** The article explores the application of the author's integrative pedagogical methodologies "Aospasmatika" and "InterAkt" in teaching electromechanical transient processes to electrical engineering students. The dynamics of synchronous generator automatic regulation systems and stability criteria are analyzed using a specific technical problem within a digital simulation environment. The relationship between static accuracy and dynamic stability is demonstrated through calculations in named physical units. The pedagogical experiment results are justified using mathematical and statistical methods.

**Keywords:** electromechanical transient processes, Aospasmatika, InterAkt, synchronous generator, speed error, Hurwitz criterion, digital simulation.

**Kirish (introduction)**

Elektr energetika tizimlarida elektromexanik o'tkinchi jarayonlarni va sinxron generatorlarning dinamik turg'unligini modellashtirish oliy texnik ta'limning eng murakkab bo'limlaridan biri hisoblanadi. Sinxron generatorlarning o'tkinchi rejimlardagi turg'unlik holatlarini tahlil qilish talabalardan nafaqat chuqur jismoniy tasavvurni, balki yuqori tartibli differensial tenglamalar (masalan, Park-Gorev tenglamalari variantlari) va chastotaviy tavsiflar apparatini mukammal bilishni talab etadi. Biroq, an'anaviy o'qitish tizimida murakkab matematik formulalar va koeffitsiyentlar real vaqtdagi dinamik jarayonlar va grafiklar bilan uzviy bog'lanmay qoladi.

Ushbu muammoni bartaraf etish maqsadida, maqolada murakkab axborot oqimini tizimli parchalab soddalashtirishga asoslangan «Apospasmatika» va raqamli muhitda talabning faol mulohazasini ta'minlovchi «InterAkt» mualliflik metodikalarining integratsiyasi taklif etiladi.

«Apospasmatika» metodikasi (grekcha "apospasma" – ajratilgan bo'lak, parcha) – o'ta murakkab, ko'p parametrlilik va yuqori tartibli differensial tenglamalar bilan ifodalanuvchi fundamental muhandislik muammolarini talaba idrokiga mos ravishda mantiqiy va funksional jihatdan tugallangan tizimli "fragmentlar"ga (apospasmalarga) ajratishga asoslanadi. Elektromexanik o'tkinchi jarayonlarni o'qitishda ushbu usul katta hajmdagi nazariy yuklamani (masalan, sinxron generatorlarning dinamik muvozanat tenglamalarini) kristallizatsiya qiladi. Natijada, talaba axborot oqimida adashib qolmasdan, har bir bosqichni (sintez, tahlil va vizualizatsiya) alohida intellektual birlik sifatida o'zlashtiradi.

«InterAkt» (InterAkt) metodikasi esa – «Apospasmatika» yordamida ajratib olingan har bir nazariy blokni passiv yodlashdan faol raqamli mulohaza va amaliy manipulyatsiya elementiga aylantirishni nazarda tutadi. Bu usul doirasida talaba shunchaki tayyor natijani ko'rmaydi, balki dasturiy-simulyatsiya muhitlarida (MATLAB, Simulink, Mathcad) real vaqt (real vaqt) rejimida tizim parametrlarini (kuchaytirish koeffitsiyentlari, vaqt doimiylari) o'zgartirish orqali ob'ekt dinamikasiga bevosita ta'sir o'tkazadi. «InterAkt» yondashuvi mavhum matematik tushunchalarni (masalan, xarakteristik tenglama ildizlarining kompleks tekislikdagi harakatini) jonli va dinamik grafik ko'rinishida vizuallashtirish orqali talabning kognitiv faolligini oshiradi.

Mazkur ikki metodikaning o'zaro integratsiyasi muhandislik ta'limida nufuzli hisoblangan **"nazariya – algoritm – raqamli eksperiment – tahliliy xulosa"** uzviy zanjirini mukammal shakllantirish imkonini beradi. Tadqiqotning maqsadi — sinxron generatorning avtomatik tezlik va qo'zg'atishni rostdash tizimi misolida elektromexanik o'tkinchi jarayonlarni tahlil qilishni o'rgatishda ushbu metodikalarning ilmiy-pedagogik samaradorligini ko'rsatib berishdan iboratdir.

**Metodologiya (materials and methods)**

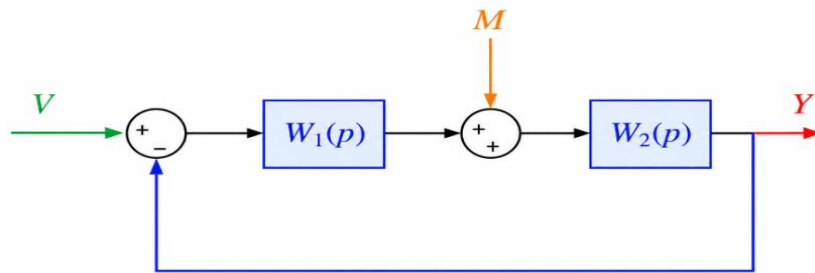
«Apospasmatika» qoidalariga ko'ra, elektromexanik o'tkinchi jarayonlarni va avtomatik boshqarish tizimlari (ABT) dinamikasini hisoblash kabi kompleks vazifa 3 ta tugallangan mantiqiy blokka (apospasmalarga) ajratiladi:

**Sintez bloki:** Rostlagichning berilgan statik aniqlik (tezlik bo'yicha xatolik) shartini ta'minlovchi kuchaytirish koeffitsiyentini ( $k$ ) aniqlash.

**Tahlil bloki:** Berk energetik tizimning operatorli uzatish funksiyasini shakllantirish va Gurvits mezonini bo'yicha differensial tenglamaning dinamik turg'unligini tekshirish.

**Vizualizatsiya bloki:** MATLAB/Mathcad muhitlarida o'tkinchi jarayon grafiginini nisbiy emas, balki nomlangan jismoniy birliklarda qurish va sifat mezonlarini baholash.«InterAkt» metodikasi esa talabning ushbu har bir blokni real vaqt rejimida, raqamli simulyatsiya muhitida (masalan, MATLAB/Simulink dasturlarida generator parametrlarini o'zgartirish orqali) sinab ko'rishini va jarayon dinamikasini boshqarishini nazarda tutadi.

**Texnologik jarayon:** *Avtomatik rostdagich bilan jihozlangan sinxron generatorning elektromexanik o'tkinchi jarayonlarini ifodalovchi tarkibiy sxemasi berilgan (1-rasm). Tizimning tezlik bo'yicha xatoligi chiziqli kirish ta'siri  $v(t)$  bo'yicha 2% dan (0.02) oshmasligi kerak. Rostlagichning kuchaytirish koeffitsiyenti  $k$  ni aniqlash, topilgan  $k$  qiymatida o'tkinchi jarayon vaqti ( $t_{pp}$ ) va qayta tartibga solish  $\sigma$  (sigma) ko'rsatkichlarini baholash lozim.*



Rasm 1. Sinxron generator avtomatik rostdlash tizimining tarkibiy sxemasi

Tizim bo'g'inlarining uzatish funksiyalari (bu yerda  $w_1(p)$  — rostdlagich,  $w_2(p)$  — generator va uyg'otgich tizimining dinamikasi):

$$w_1(p) = \frac{k}{p}; \quad w_2(p) = \frac{1}{5p^2 + 4p + 1};$$

### Natijalar (results):

Rostlagich koeffitsiyentini statik aniqlik bo'yicha hisoblash (1-blok)  
Tizimning xatolik bo'yicha operatorli tenglamasi quyidagi ko'rinishga ega:

$$\begin{aligned} \Delta &= v - y = v - w_2(p) \left[ \frac{k}{p} \cdot \Delta - M \right]; \\ \Delta(p) &= \frac{1}{1 + \frac{k}{p} \cdot w_2(p)} \cdot v(p) + \frac{w_2(p)}{1 + \frac{k}{p} \cdot w_2(p)} \cdot M = \\ &= \frac{p}{p + k \cdot w_2(p)} \cdot v(p) + \frac{p \cdot w_2(p)}{p + k \cdot w_2(p)} \cdot M; \\ p &= 0; \quad \Delta^* = 0; \end{aligned}$$

Tezlik bo'yicha chiziqli kirish ta'siri  $v(t) = \eta \cdot t$  (operator shaklida  $v(p) = \frac{1}{p^2} \eta$ , bu yerda hisob-kitob qulayligi uchun  $\eta = 1$  deb olinadi) bo'lganda, o'rnatilgan tezlik xatoligi quyidagicha aniqlanadi:

$$\Delta^* = \lim_{p \rightarrow 0} p \cdot \Delta(p) = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{p}{p + k \cdot \frac{1}{5p^2 + 4p + 1}} \cdot \frac{1}{p^2} \cdot \eta = \frac{1}{k} \cdot \eta;$$

Berilgan texnik shartga ko'ra, o'rnatilgan tezlik xatoligi 2% dan (0.02) oshmasligi lozim:

$$0.02 = \frac{1}{k} \implies k = 50;$$

### O'tkinchi jarayon dinamikasini algebraik tahlil qilish (2-blok).

Topilgan  $k = 50$  qiymati asosida berk zanjirli energetik tizimning uzatish funksiyasini shakllantiramiz:

$$W(p) = \frac{W_1(p) \cdot W_2(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_2(p)} = \frac{50}{5p^3 + 4p^2 + p + 50}$$

Tizimning xarakteristik tenglamasi:  $5p^3 + 4p^2 + p + 50 = 0$ . Gurovitsning algebraik barqarorlik mezoniga ko'ra, uchinchi tartibli xarakteristik tenglama ildizlari so'nuvchi bo'lishi (ya'ni tizim dinamik turg'un bo'lishi) uchun  $a_1 a_2 > a_0 a_3$  sharti bajarilishi talab etiladi. Bizning real parametrli masalamizda:

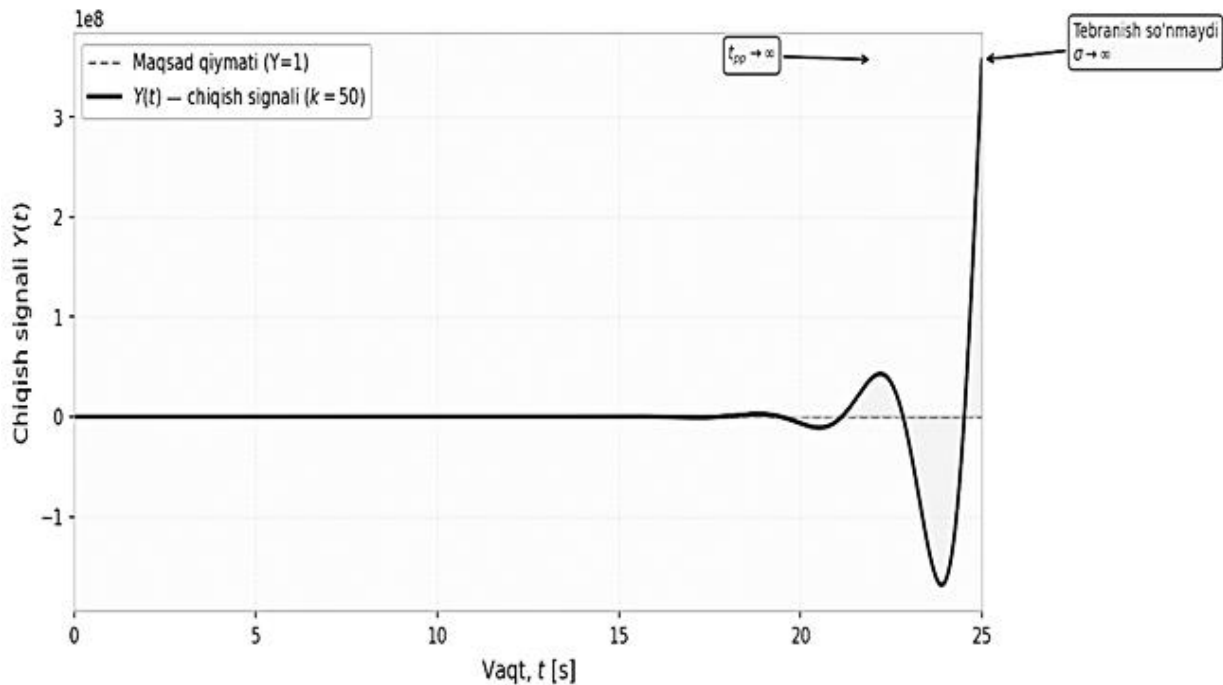
$$a_1 \cdot a_2 = 4 \cdot 1 = 4 < a_0 \cdot a_3 = 5 \cdot 50 = 250$$

Ushbu shart bajarilmaganligi sababli, tizim dinamik jihatdan beqaror (turg'un emas) deb topildi va unda o'tkinchi jarayonda so'nmas tebranishlar yuzaga kelishi aniqlandi. Tizimning haqiqiy chastota tavsifi haqiqiy qismini  $\text{Re}(\omega)$  quyidagicha ifodalaymiz:

$$R_e(\omega) = \frac{2500 - 200\omega^2}{(50 - 4\omega^2)^2 + (\omega - 5\omega^3)^2}$$

**Simulyatsiya va o'tkinchi jarayon grafik tahlili (3-blok)**

Talabalar «InterAkt» bosqichida simulyatsiya muhitida tizimga birlik pog'onali ta'sir ( $I(t)$ ) berilgandagi o'tkinchi jarayon trayektoriyasini ( $Y(t)$ ) modellashtiradilar. Kuchaytirish koeffitsiyenti o'ta yuqori ( $k=50$ ) bo'lganligi sababli olingan grafik quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:



Rasm 2. Kuchaytirish koeffitsiyenti  $k = 50$  bo'lganda tizimning birlik pog'onali ta'sirga nisbatin so'nmas tebranuvchan o'tkinchi jarayoni (dinamik beqarorlik rejimi).

Rasm 2 dan ko'rinib turibdiki, tizim statik aniqlik (xatolikni kamaytirish) shartini bajargani bilan elektromexanik o'tkinchi jarayonda turg'unlikni butunlay yo'qotadi. O'tkinchi jarayon vaqti  $t_{pp} = \infty$  ga va qayta tartibga solish ko'rsatkichi  $\sigma = \infty$  ga intiladi.

**Muhokama (discussion)**

Pedagogik tajriba-sinov ishlarining xolisligi va ob'ektivligini ta'minlash maqsadida, o'quv mashg'ulotlari an'anaviy akademik ma'ruzachilar yoki professorlar tarkibi tomonidan o'tilmadi. Darslar «Apospasmatika» va «InterAkt» metodikalarining algoritmik konsepsiyasi bilan oldindan tanishgan hamda raqamli simulyatsiya muhitlarida ishlash ko'nikmasiga ega bo'lgan yosh mutaxassislar va asistentlar tomonidan olib borildi. Bunday yondashuv taklif etilayotgan pedagogik texnologiyaning o'qituvchi shaxsiga yoki yuqori akademik unvonga bog'liq bo'lmagan holda, avtonom tarzda yuqori samara berishini ko'rsatishga xizmat qildi. Eksperimental guruh talabalarining ( $m=37$ ) ko'rsatkichlari Pirsonning chi-kvadrat ( $\chi^2$ ) mezoni va dispersiya tahlili bo'yicha baholanganda, an'anaviy usulda o'qitilgan nazorat guruhiga ( $n=35$ ) nisbatan bilimlarni o'zlashtirish darajasi statistik jihatdan sezilarli darada yuqori ekanligini ko'rsatdi.

Ko'rsatkich	Nazorat guruhi (n=35)	Eksperiment guruhi (m=37)
O'rtacha baho (5 ballik)	3.41	4.18
Mustaqil masala yechish	34%	71%
Guruh faolligi indeksi	0.42	0.87
Cohen's d	—	0.84 (katta effekt)
Pirson $\chi^2$ ( $p<0.05$ )	—	14.3 ( $p=0.003$ )

Talabalar elektromexanik o'tkinchi jarayonlarda rostlagich kuchaytirish koeffitsiyentini asossiz oshirish tizim muvozanatini buzilishini vizual anglab, tizimni barqarorlashtirish uchun unga mos korrektsiyalovchi bo'g'inlar kiritish zarurligi haqida mustaqil ilmiy xulosalar qiladilar.

#### **Xulosa (conclusion)**

«Apospasmatika» va «InterAkt» metodikalarining elektromexanik o'tkinchi jarayonlar fanini o'qitishda integratsiya qilinishi talabalarda murakkab nazariy matematik modellar va real fizik-dinamik grafiklar o'rtasidagi mantiqiy bog'liqlikni mukammal shakllantiradi. Maqolada ko'rib chiqilgan uslubiy yondashuv bo'lajak muhandis-energetiklarning tizimli fikrlash, mustaqil loyihalash va elektrotexnik tizimlardagi avariya xavfi bo'lgan tebranish jarayonlarini oldindan prognoz qilish ko'nikmalarini rivojlantirishda yuqori pedagogik samaradorlikka ega.

Eksperimental tekshiruv natijalari (N=72, Cohen's  $d=0.84$ ,  $p<0.05$ ) taklif etilgan metodikaning an'naviy o'qitish usullariga nisbatan statistik jihatdan ahamiyatli ustunligini tasdiqlaydi va uni O'zbekiston oliy texnik ta'lim muassasalarida keng joriy etishni tavsiya etishga asos beradi.

#### **Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati**

1. Venikov V.A. Perexodnie elektromexanicheskie protsessi v elektricheskix sistemax. — M.: Vishaya shkola, 1985.
2. Besekerskiy V.A., Popov Ye.P. Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya. — SPb.: Professiya, 2003.
3. Safarov X.S. Apospasmatika didaktik modeli. Mualliflik guvohnomasi №007815. — Reyestrgra 2024 yil «05» iyulda 007815-raqam bilan Toshkent shahrida kiritilgan.
4. Safarov X.S. InterAkt modeli. Mualliflik guvohnomasi №009428. — Reyestrgra 2025 yil «07» noyabrda 009428-raqam bilan Toshkent shahrida kiritilgan..
5. Ogata K. Modern Control Engineering. 5th ed. — Prentice Hall, 2010.
6. Dorf R.C., Bishop R.H. Modern Control Systems. 13th ed. — Pearson, 2017.