

# ELEKTR DVIGATELLARINING TEXNIK HOLATINI NAZORAT QILISH VA DIAGNOSTIKA QILISH UCHUN PARK MODELLARI ASOSIDA SUNIY INTELLEKTGA ASOSLANGAN MATEMATIK MODELLAR YARATISH

*Djurayev Sherzod Sobirjonovich*

*Namangan muhandislik-texnologiya instituti*

*Ga'ynazarova Qizlarxon Isroilovna*

*Namangan muhandislik-texnologiya instituti*

**Annotatsiya.** Elektr dvigatellarining texnik holatini real vaqt rejimida samarali monitoring qilish va nosozliklarni erta aniqlash sanoat uchun dolzarb masalalardan biridir. Ushbu maqolada kengaytirilgan Park modeli va sun'iy intellekt (SI) yondashuvlaridan foydalanib, elektromagnit maydon asosidagi dvigatel diagnostikasi va prognozi usullari tahlil qilinadi. Modellar elektr dvigatelining uch fazali tizimini ikki fazali d-q koordinatalar tizimiga o'tkazish orqali soddalashtirilgan. Sun'iy neyron tarmoqlari (ANN) va takroriy neyron tarmoqlar (RNN) yordamida dvigatelning vaqt bo'yicha dinamikasini kuzatish, elektromagnit maydon parametrlarini prognoz qilish va real vaqt rejimida diagnostika qilish usullari ko'rib chiqiladi. Maqola neyron tarmoqlari yordamida elektromagnit maydonni model qilishning matematik asoslarini ham yoritadi.

**Kalit so'z.** Elektr dvigatellar, texnik holat, diagnostika, Park modeli, sun'iy intellekt, elektromagnit maydon, neyron tarmoqlar, RNN, real vaqt monitoring, dvigatel samaradorligi, magnit qarshilik, to'yinganlik, adaptiv boshqaruv, gibrid modellar, nosozliklar prognozi.

## 1. Kirish

Elektr dvigatellarining ishlashi davomida elektromagnit maydon o'zgarishlarini aniq kuzatish va tahlil qilish texnik xizmat ko'rsatishni optimallashtirish uchun muhim ahamiyatga ega. Park modeli elektr dvigatellarning uch fazali tizimini ikki fazali d-q sinxron koordinatalar tizimiga o'tkazish orqali dvigatel dinamikasini soddalashtiradi. Biroq, to'yinganlik, magnit qarshilik, va magnit maydonning doimiy hamda o'zgaruvchan komponentlari hisobga olinmasa, model samaradorligi pasayishi mumkin. Shuningdek, real vaqt monitoring va prognoz qilishda aniq tahlil va diagnostika uchun sun'iy intellekt (SI) algoritmlaridan foydalanish talab etiladi.

## 2. Kengaytirilgan Park modeli

Park modeli birinchi marta Robert H. Park tomonidan 1929 yilda joriy qilingan. Park asosan uch fazali elektr mashinalarini ikkita fazaviy (statik) va ikkita sinxron (dinamik) koordinatalar tizimiga aylantirishni taklif etdi. Bu yondashuv elektr mashinalarining dinamik analizini ancha soddalashtirdi, chunki bu usul yordamida

elektr dvigatelining uch fazali tenglamalari ikki fazali tenglamalar bilan almashtiriladi, bu esa hisob-kitoblarni soddalashtiradi.

**Park modeli asoslari**

Park modeli uch fazali kuchlanish va toklarni ikki fazali d-q koordinatalar tizimiga o‘tkazish orqali elektromagnit maydonni soddalashtiradi. Ushbu transformatsiya quyidagi tenglamalar orqali ifodalanadi:

$$\begin{pmatrix} d \\ q \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - 120^\circ) & \sin(\theta + 120^\circ) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}$$

Bu yerda:

- $\theta$  — rotorning burchak holatini ifodalaydi.
- a,b,c — uch fazali kuchlanish yoki tok komponentlari.
- d,q — sinxron o'qlardagi ekvivalent komponentlar.

Bu transformatsiya asosida elektr dvigatelining sinxron o'qi bilan bog'liq fazaviy komponentlarini hisoblash osonlashadi. Ushbu model asosida diagnostika va monitoring jarayonlarini soddalashtirish mumkin.

Park transformatsiyasi asosiy teoremasi shundan iboratki, uch fazali elektr tizimini ikkita sinxron koordinatalar tizimiga (d-q koordinatalar) o‘zgartirish jarayonida tizimning dinamikasi o'zgarmaydi, faqat koordinatalarning ifodalanish usuli o‘zgaradi. Bu teoremaning isboti quyidagicha:

**Teoremaning isboti:**

Uch fazali sistemaning kuchlanish tenglamalari uch fazali stator fazalarida quyidagicha ifodalanadi:

$$\begin{aligned} v_a &= Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a \\ v_b &= Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b \\ v_c &= Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c \end{aligned}$$

Bu uchta tenglama  $\alpha$ - $\beta$  o'qi bo'yicha qayta yozilganda, tenglamalar quyidagi ko'rinishni oladi:

$$\begin{aligned} v_\alpha &= Ri_\alpha + L \frac{di_\alpha}{dt} + e_\alpha \\ v_\beta &= Ri_\beta + L \frac{di_\beta}{dt} + e_\beta \end{aligned}$$

Park transformatsiyasi yordamida olingan d-q koordinatalaridagi tenglamalar esa shu ko'rinishda bo'ladi:



$$v_d = Ri_d + L \frac{di_d}{dt} + e_d$$
$$v_q = Ri_q + L \frac{di_q}{dt} + e_q$$

Bu yerdan ko'rinadiki, tizimning dinamikasi Park transformatsiyasi orqali o'zgarmaydi, faqat yangi koordinatalar tizimida ifodalanadi. Bu esa Park transformatsiyasining asosiy teoremasining to'g'riligini isbotlaydi.

Park modelining matematik asoslari quyidagi aksiomalarga asoslanadi:

1. **Uch Fazali Tizim Simmetriyasi:** Uch fazali tizimlar simmetrik bo'lib, har bir faza o'rtasidagi burchak 120 darajani tashkil qiladi.
2. **Linearlik:** Elektr dvigateli tizimining o'qi bo'yicha ishlashi linear munosabatlarni qanoatlantiradi, ya'ni kuchlanish va toklar orasidagi bog'liqlik chiziqli tenglamalar bilan ifodalanadi.
3. **Transformatsiya Invariantligi:** Park transformatsiyasi vaqt bo'yicha o'zgarmas bo'lib, u faqatgina koordinatalar tizimini o'zgartiradi, tizimning fizik xossalariga ta'sir qilmaydi.

Park modellarining samaradorligini oshirish elektr dvigatellarining texnik holatini aniqroq tahlil qilish va nosozliklarni erta aniqlash imkonini beradi. Bu borada bir nechta yo'nalishlarda tadqiqotlar va texnologik yaxshilanishlar amalga oshirilishi mumkin. Quyida Park modellarining samaradorligini oshirish uchun qo'llanishi mumkin bo'lgan usullar va yondashuvlar keltirilgan.

O'tkazuvchanlikka asoslangan modellashtirishni kengaytirish

Park modeli odatda elektromagnit maydonning elektr o'q komponentlarini tasvirlash uchun qo'llaniladi. Biroq, dvigatelning magnit va elektromagnit xususiyatlari dvigatelning umumiy samaradorligiga katta ta'sir ko'rsatadi. O'tkazuvchanlikka asoslangan modellar, masalan, magnit qarshilik va to'yinganlik holatlarini hisobga oladigan modellar, Park transformatsiyasiga kiritilishi mumkin. Bu o'zgarishlar modellarni elektromagnit maydon va dvigatelning haqiqiy xatti-harakatlarini aniqroq ifodalashga imkon beradi.

#### Amalga oshirish bo'yicha chora-tadbirlar:

- Dvigatelning elektromagnit oqimlarini o'lchash uchun ilg'or o'lchov tizimlari va sensorlardan foydalanish.
- Magnit maydonning doimiy va o'zgaruvchan komponentlarini modelga integratsiya qilish.
- To'yinganlik va magnit oqimdagi qarshiliklarni o'lchab, ularni modelda aks ettirish.

Gibrid modellarni qo'llash

Park modeli elektr dvigatellarning elektromagnit dinamikasini soddalashtiradi, ammo boshqa jismoniy jarayonlar ham dvigatel samaradorligiga ta'sir ko'rsatadi. Park

modelini mexanik va termal modellar bilan birlashtirish orqali dvigatelning kengroq ko'lamdagi holatini tahlil qilish mumkin. Bu usul dvigatelning mexanik qismida yuzaga keladigan nosozliklar yoki issiqlikning dvigatelning umumiy ishlashiga ta'sirini o'rganishga imkon beradi.

#### **Amalga oshirish bo'yicha chora-tadbirlar:**

- **Mexanik modellar:** Dvigatelning mexanik qismlari, masalan, rulmanlar va rotor holatini kuzatish uchun mexanik modellarni Park modeliga integratsiya qilish.

- **Termal modellar:** Dvigatelning harorat o'zgarishlarini kuzatish va termal o'zgarishlarning elektromagnit maydon va dvigatelning samaradorligiga ta'sirini hisobga olish.

Sun'iy intellekt algoritmlarini qo'llash

Sun'iy intellekt va mashinani o'rganish algoritmlari Park modellarini optimallashtirish va real vaqt rejimida diagnostika samaradorligini oshirishda muhim rol o'ynashi mumkin. Dvigatelning ishlash parametrlarini o'rganish va ularning optimal qiymatlarini bashorat qilish uchun sun'iy neyron tarmoqlaridan foydalanish mumkin. Shuningdek, mashinani o'rganish yondashuvlari orqali dvigatelning anomaliyalarini avtomatik aniqlash va nosozliklarni erta bosqichda aniqlash mumkin.

#### **Amalga oshirish bo'yicha chora-tadbirlar:**

- **Neyron tarmoqlarni o'rgatish:** Park modeliga asoslangan diagnostika tizimlarini sun'iy neyron tarmoqlari orqali real vaqt rejimida anomaliyalarni kuzatadigan tizimlarga aylantirish.

- **Kuzatuv algoritmlari:** Mashinani o'rganish algoritmlari dvigatelning o'zgaruvchan parametrlarini kuzatadi va nosozliklarni prognoz qilish uchun o'rganadi.

Ko'p sensorli tizimlarni integratsiya qilish

Dvigatelning elektromagnit maydonini aniqroq tahlil qilish uchun ko'p sensorli tizimlarni Park modeliga integratsiya qilish Park modelining samaradorligini oshiradi. Harorat, tebranish, kuchlanish va tok o'zgarishlarini kuzatadigan sensorlar orqali yig'ilgan ma'lumotlar Park modeliga real vaqt rejimida kiritilishi mumkin. Bu o'zgarishlar asosida elektromagnit maydonning dinamikasini yanada aniqroq modellashtirishga erishiladi.

#### **Amalga oshirish bo'yicha chora-tadbirlar:**

- **Sensorlar joylashtirilishi:** Sensorlarni dvigatelning muhim joylariga joylashtirish orqali elektromagnit maydon, harorat va tebranish kabi parametrlarni doimiy kuzatib borish.

- **Sensordan kelgan ma'lumotlarni birlashtirish:** Sensordan olingan ma'lumotlarni Park modeliga qo'shish va bu orqali dvigatelning real holatini aniqroq aks ettirish.



### Real vaqt rejimida optimallashtirish

Park modeli real vaqt rejimida ishlaydigan tizimlarga integratsiya qilinishi mumkin. Bunda dvigatelning texnik holatini doimiy ravishda kuzatib borish va nosozliklar paydo bo'lganda avtomatik ravishda ogohlantirish tizimini yaratish muhimdir. Sun'iy intellekt algoritmlari real vaqt ma'lumotlarini qayta ishlash uchun ishlatilishi mumkin, bu esa dvigatelning texnik xizmat ko'rsatish rejalarini optimallashtirish va xarajatlarni kamaytirishga yordam beradi.

#### Amalga oshirish bo'yicha chora-tadbirlar:

- **Real vaqt kuzatuv:** Dvigatel parametrlari va elektromagnit maydonning real vaqt rejimida o'lchovlarini Park modeliga kiritish.
- **Avtomatik diagnostika tizimlari:** Anomaliyalarni real vaqt rejimida avtomatik aniqlaydigan sun'iy intellekt asosidagi tizimlarni yaratish.

### Adaptiv boshqaruv tizimlari

Park modelining dinamikasini adaptiv boshqaruv tizimlariga qo'llash dvigatel ishlashini avtomatik optimallashtirishga imkon beradi. Bu usul orqali elektromagnit maydonning o'zgarishlariga moslashish va real vaqt rejimida dvigatelni boshqarish orqali samaradorlikni oshirish mumkin.

#### Amalga oshirish bo'yicha chora-tadbirlar:

- **Adaptiv boshqaruv algoritmlari:** Dvigatelning elektromagnit maydonini doimiy ravishda tahlil qiladigan va dinamik ravishda dvigatel parametrlarini moslashtiradigan boshqaruv algoritmlarini ishlab chiqish.
- **Moslashuvchan diagnostika:** Elektromagnit maydonning anomal o'zgarishlariga moslashadigan diagnostika tizimlarini yaratish.

### Modelning noaniqliklarini kamaytirish

Elektr dvigatelining elektromagnit maydoni murakkab fizik jarayonlar orqali boshqariladi. Park modelidagi hisoblash va o'lchash noaniqliklarini kamaytirish orqali modelning aniqligini oshirish mumkin. Murakkab o'lchov tizimlari, optimallashtirilgan hisoblash usullari va yuqori aniqlikdagi sensorlar Park modelidagi noaniqliklarni kamaytirishga yordam beradi.

#### Amalga oshirish bo'yicha chora-tadbirlar:

- **Hisoblash algoritmlarini yaxshilash:** Park transformatsiyasini amalga oshiradigan algoritmlarning aniqligini oshirish.
- **Aniqroq o'lchov asboblari:** Elektromagnit maydon va dvigatelning boshqa parametrlarini aniq o'lchash uchun yuqori darajadagi sensorlardan foydalanish.

Park modellarining samaradorligini oshirish uchun elektromagnit maydon o'zgarishlarini yanada chuqurroq va aniqroq tahlil qiladigan texnikalar va texnologiyalarni qo'llash muhimdir. Gibrid modellarni yaratish, sun'iy intellekt algoritmlarini integratsiya qilish, ko'p sensorli tizimlardan foydalanish va real vaqt

rejimida optimallashtirish orqali Park modelining diagnostik imkoniyatlarini kengaytirish mumkin. Shu bilan birga, adaptiv boshqaruv tizimlari va elektromagnit maydonning dinamikasiga moslashuvchan yondashuvlar yordamida elektr dvigatellarining samaradorligini sezilarli darajada oshirishga erishiladi.

Magnit maydonning doimiy va o'zgaruvchan komponentlarini Park modeliga integratsiya qilish orqali yangi matematik model yaratish dvigatelning elektromagnit maydonini yanada aniqroq ifodalashga va diagnostika samaradorligini oshirishga imkon beradi. Ushbu yangi model elektr dvigatelining ishlashini yaxshiroq tahlil qilish uchun magnit maydonning dinamikasini hisobga oladi. Quyida bunday modelni yaratish jarayoni keltirilgan.

## 2. Magnit maydonning doimiy va o'zgaruvchan komponentlari

Elektr dvigatellarida magnit maydon ikki asosiy qismdan iborat bo'ladi:

• **Doimiy komponent (DC):** Bu komponent magnit maydonning doimiy qismi bo'lib, stator yoki rotor magnit oqimining doimiy komponentini aks ettiradi. Bu komponent odatda stator yoki rotorning asosiy magnitlanishiga javob beradi.

• **O'zgaruvchan komponent (AC):** Bu komponent dvigatelning elektromagnit maydonining o'zgaruvchan qismi bo'lib, u elektr o'ramlarda hosil bo'ladigan dinamik kuchlanish va toklar bilan bog'liq.

Magnit maydonning bu ikkala komponentini integratsiya qilish Park modeli asosida amalga oshiriladi.

### Park transformatsiyasining kengaytirilgan matematik modeli

Park transformatsiyasi odatda uch fazali tizimni ikki fazali sinxron tizimga o'tkazish uchun qo'llaniladi. Doimiy va o'zgaruvchan magnit maydon komponentlarini hisobga olish uchun Park modeliga qo'shimcha komponentlarni kiritamiz. Quyidagi tenglamalar orqali Park transformatsiyasining kengaytirilgan versiyasini yaratish mumkin.

Uch fazali tizimdagi kuchlanish tenglamalariga doimiy va o'zgaruvchan komponentlarni kiritamiz. Har bir faza uchun kuchlanish tenglamalari quyidagicha yoziladi:

$$\begin{aligned}v_a &= Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a + V_{DC} + V_{AC}(t) \\v_b &= Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b + V_{DC} + V_{AC}(t) \\v_c &= Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c + V_{DC} + V_{AC}(t)\end{aligned}$$

Bu yerda:

- $v_a, v_b, v_c$  — uch fazali kuchlanishlar,
- $i_a, i_b, i_c$  — uch fazali toklar,



- $R$  — elektr qarshilik,
- $L$  — induktivlik,
- $e_a, e_b, e_c$  — elektromagnit maydonning elektromotor kuch (EMK) komponentlari,
- $V_{DC}$  — magnit maydonning doimiy komponenti,
- $V_{AC}(t)$  — magnit maydonning vaqtga bog‘liq o‘zgaruvchan komponenti.

Doimiy va o‘zgaruvchan magnit maydon komponentlarini hisobga olgan holda, Park transformatsiyasi quyidagi kengaytirilgan shaklda yozilishi mumkin:

$$\begin{pmatrix} d \\ q \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - 120^\circ) & \sin(\theta + 120^\circ) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_{DC} \\ V_{AC}(t) \\ 0 \end{pmatrix}$$

Bu kengaytirilgan Park transformatsiyasi uch fazali tizimning magnit maydonidagi doimiy va o‘zgaruvchan komponentlarni alohida ifodalaydi va ular d-q o‘q tizimiga o‘tkaziladi.

$$\begin{aligned} v_d &= Ri_d + L \frac{di_d}{dt} + e_d + V_{DC} + V_{AC}(t) \\ v_q &= Ri_q + L \frac{di_q}{dt} + e_q + V_{DC} + V_{AC}(t) \end{aligned}$$

Kengaytirilgan model dvigatelning magnit maydonidagi doimiy va o‘zgaruvchan komponentlarni bir vaqtning o‘zida tahlil qilish imkonini beradi. Bu dvigatelning elektromagnit maydonini yanada aniqroq ifodalaydi va diagnostika jarayonlarida samaradorlikni oshiradi.

O‘zgaruvchan magnit maydon komponenti  $V_{AC}(t)$  dvigatelning dinamik xatti-harakatlarini ifodalaydi. Bu komponent elektromagnit maydonning real vaqt rejimidagi o‘zgarishlari bilan bog‘liq. O‘zgaruvchan komponentdagi o‘zgarishlar dvigatelning mexanik qismi (masalan, rotor tebranishlari yoki aylanish muammolari) bilan bog‘liq nosozliklarni aniqlashda yordam beradi.

Magnit to‘yinganlik materialning magnit xususiyatlariga bog‘liq bo‘lib, bu dvigatelning magnit zanjirining haddan tashqari magnitlanishi natijasida yuzaga keladi. Magnit materiallarda oqim kuchi ma'lum darajaga yetganda, magnit maydon kuchi va oqimning ortishi bilan magnitlanish darajasi pasayadi. Bu hodisa magnit materialning **to‘yinganligi** deb ataladi. To‘yinganlik holati dvigatelning elektromagnit maydoni va magnit oqimiga ta’sir qiladi.

Magnit maydon va oqim to‘yinganlikka kirganda, magnitlanishning kuchlanishga bog‘liqligi chiziqli bo‘lmay qoladi. Bu nisbiy magnitlanish koeffitsiyenti va magnit oqim  $\Phi$  o‘rtasidagi nolinear bog‘liqlik orqali ifodalanadi:

$$\Phi = \frac{V_m}{R_m} \left( 1 - \frac{\Phi}{\Phi_{sat}} \right)$$

Bu yerda:

- $\Phi$  — magnit oqim,
- $V_m$  — magnitlangan kuch (MMF, magnit harakat kuchi),
- $R_m$  — magnit qarshilik (magnit rezistans),
- $\Phi_{sat}$  — to‘yinganlik darajasidagi maksimal magnit oqim.

Ushbu tenglama to‘yinganlik hodisasini ifodalaydi, ya'ni magnit oqimning oshishi magnitlangan kuchning ortishi bilan kamayadi va materialning to‘yinganligi oshib boradi.

Ushbu uch fazali tenglamalarni Park transformatsiyasi yordamida ikki fazali sinxron tizimga o‘tkazamiz, bu d-q koordinatalarida elektromagnit maydonni tahlil qilishni osonlashtiradi:

$$\begin{pmatrix} d \\ q \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - 120^\circ) & \sin(\theta + 120^\circ) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_{DC} \\ V_{AC}(t) \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{V_m}{R_m} \left(1 - \frac{\Phi}{\Phi_{sat}}\right) \\ \frac{V_m}{R_m} \left(1 - \frac{\Phi}{\Phi_{sat}}\right) \\ 0 \end{pmatrix}$$

Park transformatsiyasini qo‘llagan holda d-q tizimidagi kuchlanish tenglamalari quyidagi shaklni oladi. Bu tenglamalarda magnit maydonning doimiy, o‘zgaruvchan komponentlari, to‘yinganlik va magnit qarshilik birgalikda ifodalanadi:

$$\begin{aligned} v_d &= Ri_d + L \frac{di_d}{dt} + e_d + V_{DC} + V_{AC}(t) + \frac{V_m}{R_m} \left(1 - \frac{\Phi}{\Phi_{sat}}\right) \\ v_q &= Ri_q + L \frac{di_q}{dt} + e_q + V_{DC} + V_{AC}(t) + \frac{V_m}{R_m} \left(1 - \frac{\Phi}{\Phi_{sat}}\right) \end{aligned}$$

Bu tenglamalar dvigatelning elektromagnit maydonini aniq ifodalashga imkon beradi, chunki ular:

- **Doimiy komponent  $V_{DC}$ :** Magnit maydonning doimiy qismi bilan bog‘liq bo‘lgan kuchlanish.
- **O‘zgaruvchan komponent  $V_{AC}(t)$ :** Magnit maydonning vaqt bo‘yicha o‘zgaruvchi dinamik komponenti.
- **To‘yinganlik  $\Phi_{sat}$ :** Magnit oqim to‘yinganlikka yetganida elektromagnit dinamikani nolinearlashtiradi.
- **Magnit qarshilik  $R_m$ :** Magnit zanjirda energiya yo‘qotishlarini aks ettiradi.

### 3. Sun'iy intellekt yordami bilan kengaytirilgan Park modeli

#### 3.1. Sun'iy neyron tarmoqlari (ANN) yordamida prognoz



Park modelini **takroriy neyron tarmoqlar (RNN)** yordamida prognoz qilish samarali usullardan biri bo'lishi mumkin, ayniqsa **vaqt bo'yicha ketma-ketlik ma'lumotlarini** qayta ishlash va elektromagnit maydon dinamikasini aniqlashda. Takroriy neyron tarmoqlar vaqt o'tishi bilan o'zgaruvchan dinamik tizimlar uchun mos bo'lib, elektr dvigatelning vaqt o'zgarishiga asoslangan parametrlarini aniq prognozlash imkonini beradi.

Takroriy neyron tarmoqlar (RNN) vaqt bo'yicha ketma-ketlikli ma'lumotlarni qayta ishlash uchun qo'llaniladi. Oddiy neyron tarmoqlardan farqli o'laroq, RNNlar vaqt bo'yicha oldingi qadamlarning natijasini eslab, kelgusi qadamlarni hisoblash uchun ishlatadi. Bu elektr dvigatel parametrlarining vaqt bo'yicha dinamikasini kuzatishda juda qulay.

RNN har bir qadamda kiruvchi ma'lumotlarni qabul qiladi va o'zining oldingi qadamda olingan holatini hisoblashga qo'shadi. Matematik ifoda quyidagicha bo'ladi:

$$h_t = f(W_x x_t + W_h h_{t-1} + b)$$

Bu yerda:

- $h_t$  — t-vaqtdagi yashirin holat (hidden state),
- $x_t$  — t-vaqtdagi kiruvchi ma'lumotlar (kuchlanish, tok, magnit oqim, va boshqa parametrlarga oid ma'lumotlar),
- $h_{t-1}$  — oldingi qadamdagi yashirin holat,
- $W_x, W_h$  — kirish va yashirin holatlar o'rtasidagi vaznlar,
- $b$  — og'ish (bias) koeffitsiyenti,
- $f$  — faollashtiruvchi funksiya (sigmoid, tanh, relu kabi).

RNN vaqt bo'yicha ketma-ket olingan elektromagnit maydon parametrlarini eslaydi va keyingi qadamlarni prognoz qilishda bu ma'lumotlardan foydalanadi.

### RNN afzalliklari

• **Vaqt ketma-ketligini tahlil qilish:** RNN vaqt bo'yicha o'zgaruvchi parametrlar, masalan, kuchlanish, tok va magnit oqimni hisobga olib, kelgusi vaqt uchun aniq prognozlarni hosil qilishi mumkin.

• **Dinamik jarayonlarni eslash:** Oldingi vaqt qadamlaridagi ma'lumotlar kelgusi qadamlarni hisoblashda foydalaniladi, bu esa dvigatelning vaqt bo'yicha dinamikasini aniqroq ifodalaydi.

Kengaytirilgan Park modelidagi elektromagnit maydon parametrlarini takroriy neyron tarmoq yordamida prognoz qilishning asosiy qadamlarini ko'rib chiqamiz.

RNNga kiritiladigan ma'lumotlar dvigatelning vaqt bo'yicha ketma-ket o'lchangan parametrlaridir: **Kiritmalar:**

$$x_t = \{v_a(t), v_b(t), v_c(t), i_a(t), i_b(t), i_c(t), \Phi_d(t), \Phi_q(t), V_{DC}(t), V_{AC}(t), R_m(t)\}$$

- t vaqtidagi kuchlanish, tok, magnit oqim va boshqa parametrlar.

**Chiqishlar:**

- $y_t = \{v_d(t+1), v_q(t+1), \Phi_d(t+1), \Phi_q(t+1), V_{DC}(t+1), V_{AC}(t+1)\}$
- $t+1$  vaqt uchun elektromagnit maydonning prognoz qilingan qiymatlari.

RNNda har bir vaqt bo'yicha kiritma ma'lumotlari o'z vaqt qadamidagi yashirin holatni  $h_t$  yangilaydi va chiqish  $y_t$  ni hisoblaydi:

**Yashirin holatning yangilanishi:**

$$h_t = \sigma(W_x x_t + W_h h_{t-1} + b)$$

Bu yerda  $\sigma$  odatda tanh yoki sigmoid kabi faollashtiruvchi funksiya bo'ladi.

**Chiqishlar (prognoz):**

$$y_t = W_o h_t + c$$

Bu yerda  $W_o$  — yashirin qatlam bilan chiqish qatlam o'rtasidagi vazn,  $c$  esa chiqish uchun bias.

RNNning chiqishlari elektromagnit maydon parametrlarining prognozi sifatida ishlatiladi va bu prognozlar real o'lchovlar bilan solishtiriladi. Yo'qotish funksiyasi sifatida kvadrat yo'qotish funksiyasi (mean squared error) ishlatiladi:

$$L = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

Bu yerda:

- $y_i$  — real ma'lumotlar,
- $\hat{y}_i$  — RNN tomonidan prognoz qilingan qiymatlar.

Orqaga tarqatish (backpropagation through time, BPTT) algoritmi yordamida neyron tarmoqning vazn va biaslarini yangilab borish orqali RNN o'rgatiladi.

Oddiy RNNlarning ba'zi kamchiliklari bor, masalan, uzoq muddatli bog'lanishlarni (long-term dependencies) eslab qolishda qiyinchiliklar. Buning oldini olish uchun **LSTM (Long Short-Term Memory)** va **GRU (Gated Recurrent Unit)** kabi takomillashtirilgan RNN arxitekturalarini qo'llash mumkin. LSTM va GRU bir nechta darvozalar (gates) yordamida uzoq muddatli va qisqa muddatli ma'lumotlarni saqlaydi va muhim ma'lumotlarni uzatadi.

LSTM tarmog'i RNN ning kengaytirilgan versiyasi bo'lib, unda har bir vaqt qadamida kiruvchi ma'lumotlar va oldingi yashirin holat o'zaro bog'liq bo'lgan darvozalar orqali boshqariladi:

- **Kirish darvozasi (Input gate):** Yangi kiruvchi ma'lumotlar qanchalik darajada muhim ekanini aniqlaydi.
- **Chiqarish darvozasi (Output gate):** Kelgusi vaqt uchun qanday ma'lumotlar kerakligini aniqlaydi.
- **Unutish darvozasi (Forget gate):** Oldingi yashirin holatlardan qaysi birlari eslab qolinishi kerakligini boshqaradi.

Matematik ifoda quyidagicha bo'ladi:



$$\begin{aligned}
 f_t &= \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f) \\
 i_t &= \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i) \\
 o_t &= \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o) \\
 C_t &= f_t \cdot C_{t-1} + i_t \cdot \check{C}_t \\
 h_t &= o_t \cdot \tanh(C_t)
 \end{aligned}$$

Bu yerda:

- $f_t, i_t, o_t$  — darvozalar (gates),
- $C_t$  — hujayra holati (cell state),
- $h_t$  — yashirin holat.

GRU (Gated Recurrent Unit) — LSTMning soddalashtirilgan versiyasi bo‘lib, unda bir nechta darvoza birlashtiriladi. GRUda faqat ikkita darvoza mavjud: **yangilanish (update gate)** va **unutish (reset gate)** darvozalari.

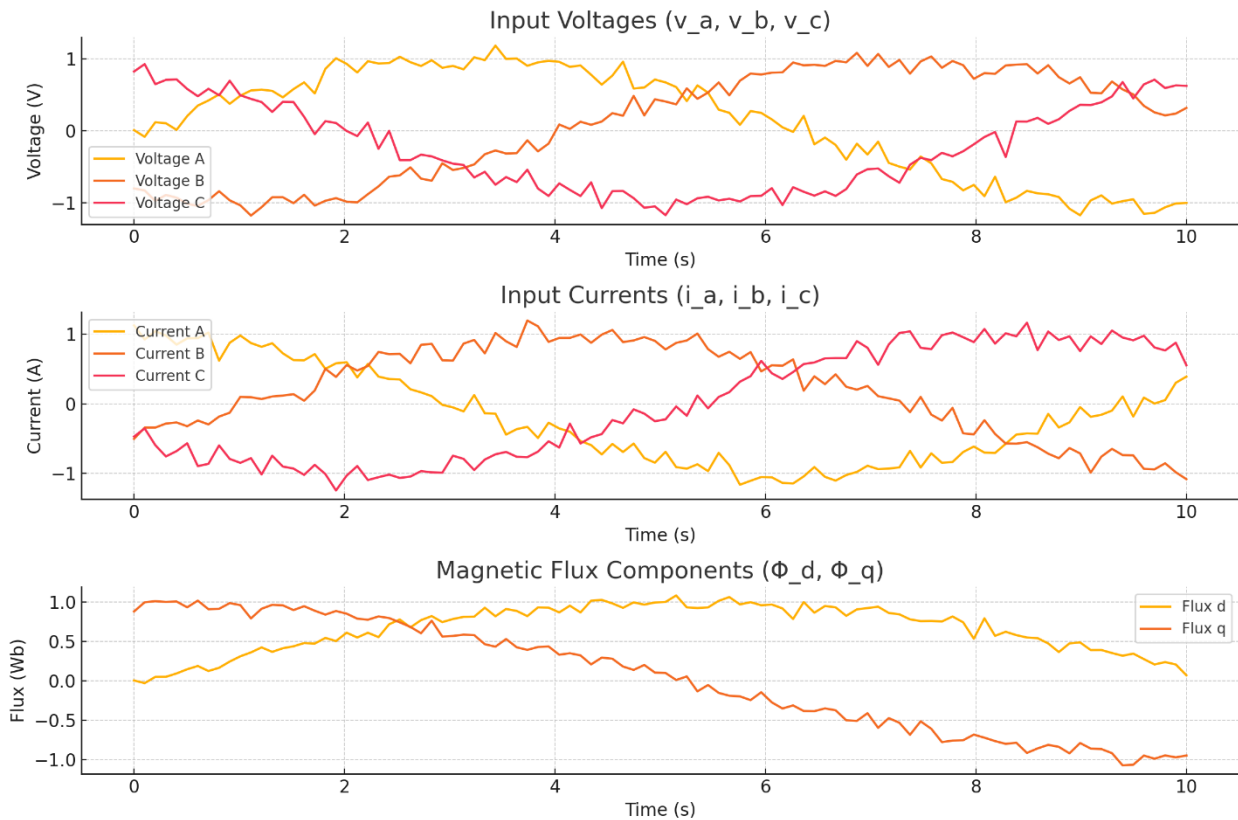
GRUning matematik ifodasi quyidagicha bo‘ladi:

$$\begin{aligned}
 z_t &= \sigma(W_z \cdot [h_{t-1}, x_t]) \\
 r_t &= \sigma(W_r \cdot [h_{t-1}, x_t]) \\
 \check{h}_t &= \tanh(W \cdot [r_t \cdot h_{t-1}, x_t]) \\
 h_t &= (1 - z_t)h_{t-1} + z_t\check{h}_t
 \end{aligned}$$

RNN, LSTM yoki GRU yordamida kengaytirilgan Park modeli asosida elektromagnit maydon parametrlarini prognozlash quyidagi bosqichlarni o‘z ichiga oladi:

1. **Kiritma ma'lumotlarini qabul qilish:**  $v_a(t), v_b(t), v_c(t), i_a(t), i_b(t), i_c(t), \Phi_d(t), \Phi_q(t), V_{DC}(t), V_{AC}(t)$  va boshqa parametrlar.
2. **Yashirin holatni yangilash:** RNN tarmog‘i har bir vaqt qadamida oldingi yashirin holatni yangilaydi.
3. **Kelgusi vaqt qadamlarini prognoz qilish:** Tarmoq real vaqt bo‘yicha elektromagnit maydonning kelgusi o‘zgarishlarini prognoz qiladi.
4. **Anomaliyalarni aniqlash va diagnostika:** RNN tarmoq nosozliklarni prognoz qilish uchun ishlatiladi va dvigatelning texnik holatini baholashga yordam beradi.

Takroriy neyron tarmoqlar (RNN), ayniqsa LSTM va GRU arxitekturalari, kengaytirilgan Park modeli asosida elektromagnit maydonni prognoz qilish uchun kuchli vositadir. RNN yordamida dvigatel parametrlarining vaqt bo‘yicha o‘zgarishini aniqlash va real vaqt diagnostika tizimlarini yaratish imkoniyatini beradi. LSTM va GRU tarmoqlari uzoq muddatli bog‘lanishlarni eslab qolish orqali yanada aniq prognozlar beradi va dvigatelning ishlash holatini samarali tahlil qilishga yordam beradi.



Birinci grafikda uch fazali kuchlanishlar ( $v_a, v_b, v_c$ ) tasvirlangan:

- **Voltage A, B, C:** Bu uch fazali kuchlanishlar elektr dvigatelining uch fazali tizimiga beriladigan kuchlanishlarni ifodalaydi. Grafikda ko'rilgan sinusoidal signallar faza oralig'ida bo'lib, ular bir-biridan  $120^\circ$  burchakda o'tadi (faza oralig'i). Kuchlanishlardagi kichik tebranishlar real holatda signalda bo'ladigan shovqinlarni ko'rsatadi.

- Bu kuchlanishlar Park modelida uch fazali tizimni ikki fazali sinxron d-q tizimiga o'tkazish uchun asos bo'ladi.

Ikkinchi grafikda uch fazali toklar ( $i_a, i_b, i_c$ ) ko'rsatilgan:

- **Current A, B, C:** Uch fazali toklar ham sinusoidal shaklda bo'lib, ular fazalar orasida  $120^\circ$  oralig'ida o'tadi, bu uch fazali tizimning tipik xatti-harakatidir.

- Ushbu toklar dvigatel ichidagi elektromagnit maydonni hosil qiladi va ular kuchlanish bilan bog'liq ravishda o'zgaradi. Toklarning bu fazalar oralig'i dvigatelning mexanik aylanishiga va elektromagnit maydonning hosil bo'lishiga ta'sir ko'rsatadi.

Uchinchi grafikda d-q koordinatalarida magnit oqim ko'rsatilgan:

- **Flux d ( $\Phi_d$ ):** d-o'q bo'yicha magnit oqim. Bu komponent elektromagnit maydonning haqiqiy qismiga mos keladi va dvigatelning elektromagnit ishini ifodalaydi.



• **Flux  $q$  ( $\Phi_q$ ):**  $q$ -o'q bo'yicha magnit oqim. Bu komponent elektromagnit maydonning reaktiv qismiga mos keladi, ya'ni dvigatelning magnitlanishi va aylanish momenti bilan bog'liq.

• Grafikda ko'rilganidek,  $\Phi_d$  va  $\Phi_q$  sinusoiddir va ular dvigatelning harakatlanishi davomida o'zgarib turadi.

Ushbu grafiklar kengaytirilgan Park modelining elektromagnit maydonga bog'liq xatti-harakatlarini tasvirlaydi. Kuchlanishlar va toklar uch fazali tizimda o'zgaradi, ular  $d$ - $q$  koordinatalariga o'tkazilgach, magnit oqim shaklida ifodalanadi. Magnit oqimning  $d$ - $q$  komponentlari dvigatelning ishlash samaradorligini va elektromagnit maydonning dinamikasini aniqlashga yordam beradi. Bu grafiklar real vaqt monitoring va dvigatel diagnostikasi uchun foydali bo'ladi.

Kengaytirilgan Park modeli va sun'iy intellekt yordamida elektr dvigatelining texnik holatini samarali monitoring qilish va nosozliklarni aniqlash mumkin. Neyron tarmoqlar va RNN yordamida elektromagnit maydonni aniq prognozlash va real vaqt rejimida diagnostika qilish tizimlari dvigatelning samaradorligini oshirishga yordam beradi. Ushbu yondashuvlar dvigatelning texnik xizmat ko'rsatish jarayonlarini optimallashtirish va nosozliklarni erta aniqlash imkoniyatini beradi.

#### Adabiyotlar:

1. Park, R. H. (1929). *Two-Reaction Theory of Synchronous Machines*. AIEE Transactions.
2. Vas, P. (1990). *Vector Control of AC Machines*. Clarendon Press.
3. Chau, K. T. (2015). *Electric Vehicle Machines and Drives*. Wiley.
4. ПАРПИЕВ, Х., ГАФУРОВ, А., ЛАСТОЧКИН, П., & ПАРПИЕВА, Н. ПРОЧНАЯ СУПЕРГИДРОФОБНАЯ ХЛОПЧАТОБУМАЖНАЯ ТКАНЬ ДЛЯ ФИЛЬТРАЦИИ МАСЛЯНО-ВОДЯНЫХ СМЕСЕЙ SUPERHYDROPHOBIC COTTON FABRIC FOR FILTRATION OF OIL-WATER MIXTURES.
5. Adkhamjon, G., & Bilolxon, T. (2022). PREPARATION AND APPLICATION OF COLORED ANTIBACTERIAL COTTON FIBER BASED ON MICROSTRUCTURAL CONTROL. *Conferencea*, 9-13.
6. Тошпулатов, К. (2023). МЕНЕДЖМЕНТ: ПРИРОДА И СТРУКТУРА ОРГАНИЗАЦИЙ, И РОЛЬ ОРГУПРАВЛЕНЧЕСКОГО МЫШЛЕНИЯ. *Новости образования: исследование в XXI веке*, 1(11), 279-282.
7. Тошпулатов, К. (2023). СОВРЕМЕННАЯ ТЕОРИЯ УПРАВЛЕНИЯ: НОВЫЕ ПОДХОДЫ И МЕТОДЫ. *JOURNAL OF INNOVATIONS IN SCIENTIFIC AND EDUCATIONAL RESEARCH*, 6(5), 288-292.

8. Насритдинов, Б., & Тошпулатов, К. (2023). АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ЭКОНОМИКИ: ЭВОЛЮЦИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ. *Научный Фокус, 1(2)*, 485-489.
9. Насритдинов, Б., & Тошпулатов, К. (2023). ЭКОНОМИКА БУДУЩЕГО: КАК АВТОМАТИЗАЦИЯ ИЗМЕНИТ СТРУКТУРУ ПРОИЗВОДСТВА. *Новости образования: исследование в XXI веке, 1(12)*, 25-28.
10. Yoqubjanov, A. (2024). EKSPERT TIZIMINING TUZILISHI VA HUSUSIYATLARI. Interpretation and researches.
11. Ёкубжанов, А. (2023). РОЛЬ АВТОМАТИЗАЦИИ В ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ. *Новости образования: исследование в XXI веке, 1(12)*, 51-54.