

ELEKTR DVIGATELLARIDA ELEKTROMAGNIT DIAGNOSTIKA UCHUN MATEMATIK MODELLARNING RIVOJLANISHI VA OPTIMALLASHUVI.

Namangan muhandislik-texnologiya instituti

Djurayev Sherzod Sobirjonovich

Asqarov Azizbek Anvarovich

Annotatsiya Ushbu maqola elektr dvigatellarda elektromagnit diagnostika tizimlarini takomillashtirish va optimallashtirish bo‘yicha olib borilgan tadqiqotlarni ko‘rib chiqadi. Elektromagnit diagnostika, texnologiyaning aniqligini va samaradorligini oshirishda muhim rol o‘ynaydi. Matematik modellashtirish orqali diagnostika jarayonini soddalashtirish va real vaqt rejimida aniqlikni oshirish bo‘yicha yondashuvlar keltirilgan. Tadqiqotning asosiy maqsadi elektromagnit diagnostika uchun optimal modellashtirish usullarini ishlab chiqish va uni real sanoat sharoitlarida sinab ko‘rishdir. Tadqiqot natijalari diagnostika aniqligi va elektr dvigatellarni monitoring qilishning samaradorligini sezilarli darajada oshirishini ko‘rsatadi.

Kalit so‘zlar: Elektromagnit diagnostika, elektr dvigatellar, matematik modellashtirish, optimallasuvi, diagnostika aniqligi.

Kirish

Elektromagnit diagnostika so‘nggi yillarda sanoat va energetika sohalarida muhim tadqiqot yo‘nalishlaridan biriga aylandi. Bu texnologiya elektr dvigatellarining holatini monitoring qilish va ularni buzilishlardan oldin aniqlash imkonini beradi. Sanoatning turli tarmoqlarida elektr dvigatellar ishlashini nazorat qilish va ularning ishdan chiqishining oldini olish katta iqtisodiy va texnologik ahamiyatga ega. Ammo mavjud elektromagnit diagnostika usullari ko‘pincha etarlicha aniqlik va tezlikni ta‘minlay olmaydi, bu esa ishlab chiqarish jarayonlarini samarali boshqarishda qiyinchilik tug‘diradi.

Shu sababli, elektr dvigatellarini elektromagnit diagnostika qilishda matematik modellarni rivojlantirish va optimallashtirish, diagnostika jarayonini soddalashtirish hamda real vaqt rejimida samaradorligini oshirishga yo‘naltirilgan tadqiqotlar alohida

ahamiyatga ega. Ushbu maqolada elektr dvigatellarda elektromagnit diagnostikani takomillashtirish bo'yicha matematik modellar va optimallashtirish yondashuvlari ko'rib chiqiladi. Tadqiqotning asosiy maqsadi elektromagnit diagnostika jarayonida samarali va aniq natijalarga erishishni ta'minlaydigan optimal modellarni ishlab chiqishdir.

Tadqiqot usullari

Ushbu tadqiqot elektr dvigatellarning elektromagnit diagnostika jarayonini matematik modellashtirish va optimallashtirishga qaratilgan. Tadqiqotning maqsadi – diagnostika jarayonini yanada samarali qilish uchun optimal matematik modellar va algoritmlarni ishlab chiqish va sinab ko'rishdir. Tadqiqot usullari matematik modellashtirish, simulyatsiya, ma'lumotlarni qayta ishlash algoritmlari va tajribaviy tekshirishni o'z ichiga oladi.

1. Matematik modellashtirish

Elektromagnit diagnostika jarayonini matematik modellashtirish uchun elektr dvigatelning elektromagnit maydonlarining fizik xususiyatlari asosida tenglamalar tuzildi. Ushbu tenglamalar elektr dvigatelning ishlashi davomida hosil bo'ladigan elektromagnit maydonning tarqalishini, haroratning ta'sirini va vibratsiyani inobatga oladi.

- **Maxwell tenglamalari** asosida elektromagnit maydonlarning tarqalishi modellashtirildi. Ushbu tenglamalar elektromagnit to'lqinlarning dvigatel ichidagi harakatini tushuntirish va anomal holatlarni aniqlash uchun ishlatiladi.

- **Issiqlik va vibratsion modellar:** Elektr dvigatellarning harorat ko'tarilishi yoki vibratsiya ortishi buzilish belgisi bo'lishi mumkin. Ushbu o'zgarishlarni aniqlash uchun issiqlik va mexanik model ham qo'shilgan.

2. Ma'lumotlarni qayta ishlash algoritmlari

Matematik modellardan olingan diagnostik ma'lumotlar real vaqt rejimida tezkor va aniq tahlil qilinishi uchun maxsus algoritmlar ishlab chiqildi. Buning uchun signallarni qayta ishlash, chastota tahlili va Fourier transformatsiyasi kabi algoritmlar ishlatildi.

- **Chastota tahlili** elektromagnit signallarning spektral tahlilini amalga oshirishga yordam beradi. Bu usul dvigatelda paydo bo'lgan nosozliklar yoki anomalionalarni aniqlash uchun ishlatiladi.

- **Fourier transformatsiyasi** dvigatelning diagnostika signallarini vaqt bo'yicha tahlil qilish imkonini beradi va signallardagi o'zgarishlarni aniqlashga yordam beradi.

3. Optimallashtirish algoritmlari

Elektromagnit diagnostika jarayonini yanada samarali qilish uchun diagnostika algoritmlari optimallashtirildi. Optimallashtirish algoritmlarini qo'llash orqali matematik modellar aniqroq va tezroq ishlashga moslashtirildi.

- **Genetik algoritmlar:** Bu algoritmlar diagnostika jarayonida optimal parametrlarni tanlash uchun ishlatilgan. Diagnostika usullari parametrlari sonining ko'pligi jarayonning murakkabligini oshiradi, shu sababli genetik algoritmlar eng yaxshi parametrlarni aniqlash va optimallashtirish uchun samarali bo'ldi.

- **Simulated annealing** usuli: Diagnostika algoritmlarini optimallashtirishda global maksimumni topish uchun bu algoritm ishlatildi. Bu usul orqali turli nosozlik belgilarini aniqlash va diagnostika vaqtini qisqartirishga erishildi.

4. Simulyatsiya va modellashtirish muhitlari

Matematik modellar va diagnostika algoritmlarini sinovdan o'tkazish uchun MATLAB va COMSOL Multiphysics dasturlari ishlatildi. Ushbu dasturlar yordamida elektr dvigatellarning elektromagnit maydonlari va harorat o'zgarishlarini simulyatsiya qilish va ularning diagnostik parametrlarini tahlil qilish amalga oshirildi.

Maxwell tenglamalari elektromagnit maydonlarning asosiy qonuniyatlarini ifodalovchi to'rtta tenglamadan iborat bo'lib, ular elektr va magnit maydonlarning bir-biri bilan qanday o'zaro ta'sir qilishini tushuntiradi. Quyida vakuumdagi (materiyasiz bo'shliqda) Maxwell tenglamalarining differensial ko'rinishdagi shakllari berilgan:

Amper-Maxwell qonuni

Elektr maydon vaqt bo'yicha o'zgarishi magnit maydonni hosil qilishini tushuntiradi. Shuningdek, zaryad oqimi (tok) ham magnit maydon hosil qiladi.

$$\Delta X B = \mu_0 J + \pi_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$$

$\nabla \times B$ — magnit maydonning burilishi.

J — elektr tokining zichligi.

μ_0 — vakuumning magnit o'tkazuvchanligi (magnit doimiysi).

$\epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$ — vaqt bo'yicha elektr maydon o'zgarishi.

Maxwell tenglamalari elektromagnit maydonlarning asosiy qonuniyatlarini qamrab oladi. Bu tenglamalar elektr va magnit maydonlarning vaqt bo'yicha va makon bo'yicha qanday o'zgarishini ko'rsatadi va elektromagnit to'liqlar, shu jumladan yorug'likning ham tarqalishini ifodalaydi.

Amper-Maxwell qonuni va elektromagnit diagnostika jarayonlarini modellashtirishda qo'shimcha parametrlar kiritish orqali modellarni yanada aniqlashtirish va real fizik sharoitlarga moslashtirish mumkin. Elektr dvigatellarda elektromagnit diagnostikani optimallashtirish uchun quyidagi parametrlarni hisobga olishni tavsiya etish mumkin:

1. Material xususiyatlari

Dvigatel komponentalarining fizik va elektromagnit xususiyatlarini hisobga olish modelning aniqligini oshiradi. Ba'zi parametrlar quyidagilardan iborat:

- **O'tkazuvchanlik (Conductivity, σ):** Dvigatel materialining elektr tokni o'tkazish qobiliyati. O'tkazuvchanlikni hisobga olish dvigatel ichidagi issiqlik tarqalishini aniqlashga yordam beradi.

- **Magnit o'tkazuvchanlik (Permeability, μ):** Materialning magnit maydonni qanchalik yaxshi o'tkazishini aniqlaydi. Bu parametr magnit maydonlarning dvigatel ichida qanday taqsimlanishini modelda ko'rsatadi.

- **Dielektrik o'tkazuvchanlik (Permittivity, ϵ):** Materialning elektr maydonni saqlash xususiyatini tavsiflaydi.

2. Issiqlik ta'siri

Elektr dvigatelning ishlashi davomida hosil bo'ladigan issiqlik elektromagnit xususiyatlarga ta'sir qilishi mumkin. Issiqlik parametrlarini kiritish modellarni yanada samarali qiladi.

- **Harorat gradienti:** Dvigatelning turli joylarida harorat o'zgarishi elektromagnit parametrlarni o'zgartirishi mumkin. Harorat o'zgarishini hisobga olish orqali materialning elektr va magnit o'tkazuvchanligi qanday o'zgarishini kuzatish mumkin.

- **Issiqlik o'tkazuvchanligi (Thermal conductivity):** Materialning issiqlikni qanchalik yaxshi o'tkazishini hisobga olish zarur. Bu parametr orqali issiqlikning qanday tarqalishi va uning elektromagnit diagnostikaga qanday ta'sir qilishini baholash mumkin.

3. Mexanik parametrlar

Dvigatelning mexanik tebranishlari va deformatsiyalari elektromagnit diagnostika jarayoniga ta'sir qiladi.

- **Titrash (Vibration):** Mexanik titrashlar elektromagnit maydonlarni o'zgartirishi mumkin. Titroq natijasida signalning aniqligi pasayishi yoki noto'g'ri o'lchovlar paydo bo'lishi mumkin. Titrash parametrlarini qo'shish mexanik va elektromagnit o'zgarishlarni birgalikda modellashtirishga yordam beradi.

- **Deformatsiya:** Elektr dvigatelning qattiq jismlarida deformatsiyalar yuzaga kelishi mumkin, bu esa elektromagnit maydonlar va tok zichligiga ta'sir qilishi mumkin.

4. Zamonaviy algoritmlar

Elektromagnit diagnostikani optimallashtirish uchun zamonaviy matematik algoritmlar va mashinaviy o'qitish usullarini ham qo'llash mumkin.

- **Mashinaviy o'rganish (Machine Learning):** Diagnostika ma'lumotlarini tahlil qilish va anomal signalni avtomatik aniqlash uchun mashinaviy o'qitish modellarini qo'shish samarali bo'lishi mumkin. Sun'iy neyron tarmoqlari, o'rganish algoritmlari elektromagnit diagnostika natijalarini optimallashtirishga yordam beradi.

- **Ma'lumotlar bilan o'z-o'zini o'rganuvchi tizimlar:** Real vaqt diagnostika ma'lumotlarini o'rganish va qiyoslash uchun o'z-o'zini moslashtiruvchi algoritmlarni kiritish mumkin.

5. O'zgaruvchan elektr maydonlar chastotasi (Frequency of Electromagnetic Fields)

- **Chastota spektri:** Elektr dvigatellarning turli ish sharoitlarida elektromagnit maydonning vaqt bo'yicha o'zgarishi turli chastotalarda bo'lishi mumkin. Chastota spektrlarini tahlil qilish elektromagnit nosozliklarni aniqlashda qo'shimcha imkoniyat beradi.

- **Ko'p chastotali tahlil:** Turli chastotalarda elektromagnit maydonlar bir xil ta'sir qilmasligi mumkin. Ko'p chastotali modellashtirish dvigatelning keng diapazonli holatini diagnostika qilishda ishlatilishi mumkin.

6. Chekka sharoitlarni (Boundary Conditions) kiritish

- **Chekka sharoitlar:** Dvigatelning atrof-muhit bilan o'zaro ta'sirini modelga kiritish orqali real sharoitlarni yaxshiroq modellashtirish mumkin. Masalan, dvigatelni sovutish sharoitlari, tashqi elektromagnit maydonlar ta'siri va boshqa chekka omillar elektromagnit diagnostika natijalariga sezilarli ta'sir ko'rsatishi mumkin.

7. Qo'shimcha fizik ta'sirlar (Additional Physical Effects)

- **Eddy toklar (Eddy Currents):** Elektr dvigatelning metal qismlarida hosil bo'ladigan eddy toklar elektromagnit maydonlarga ta'sir qiladi. Bu toklarni hisobga olish diagnostika aniqligini oshiradi.

- **Hysteresis:** Magnit materiallarda magnitlanishning kechikish effekti. Magnit materiallar magnit maydon o'zgarishlariga tez javob bermasligi mumkin, bu esa diagnostika jarayoniga ta'sir qilishi mumkin.

Amper-Maxwell qonunini o'tkazuvchanlik, magnit o'tkazuvchanlik, issiqlik va titrashni hisobga olib takomillashtirish uchun har bir parametrning fizik jihatdan qanday ta'sir qilishini ko'rib chiqamiz va tenglamaga qo'shamiz. Bu parametrlar elektromagnit maydonlarning real sharoitlarda qanday o'zgarishini ko'rsatib, diagnostika jarayonini optimallashtirishda yordam beradi.

Elektr o'tkazuvchanlik (σ) materialning qanchalik yaxshi elektr tokini o'tkazishini ko'rsatadi. Elektr tok zichligi Ohm qonuni asosida aniqlanadi:

$$J = \sigma \cdot E$$

Bu tenglama elektr maydon (E) tufayli hosil bo'lgan tok zichligini ifodalaydi. Shunday qilib, o'tkazuvchanlikni hisobga olib, Amper-Maxwell tenglamasidagi elektr tok zichligini yangilaymiz:

$$\Delta X B = \mu_0 \sigma \cdot E + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$$

Magnit o'tkazuvchanlik (μ) magnit maydonni qanday tarqalishini belgilaydi. Vakuumba magnit o'tkazuvchanlik μ_0 bilan ifodalanadi, lekin materiallarda magnit o'tkazuvchanlik $\mu = \mu_0 \mu_r$ bo'ladi, bu yerda μ_r materialning nisbiy magnit o'tkazuvchanligi. Magnit o'tkazuvchanlikni hisobga olib, tenglamani quyidagicha yozamiz:

$$\Delta X B = \mu \sigma \cdot E + \mu \epsilon \frac{\partial E}{\partial t}$$

Bu yerda:

- $\mu = \mu_0 \mu_r$ — umumiy magnit o'tkazuvchanlik,
- $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ — materialdagi dielektrik o'tkazuvchanlik.

Issiqlik (T) elektr o'tkazuvchanlik va magnit maydonlarga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Material harorati oshganda, uning elektr va magnit o'tkazuvchanligi o'zgaradi. Bu parametrlar temperaturaga bog'liq funksiyalar sifatida ifodalanadi:

- **O'tkazuvchanlik:** $\sigma(T)$, bu yerda harorat oshishi bilan o'tkazuvchanlik odatda kamayadi.
- **Magnit o'tkazuvchanlik:** $\mu(T)$, bu ham harorat o'zgarishi bilan o'zgarishi mumkin.

Shunday qilib, elektr o'tkazuvchanlik va magnit o'tkazuvchanlik haroratga bog'liq ravishda modifikatsiyalanadi:

$$\Delta X B = \mu(T) \sigma(T) \cdot E + \mu(T) \epsilon(T) \frac{\partial E}{\partial t}$$

Mexanik titrashlar elektromagnit maydonni vaqt bo'yicha o'zgartirishi mumkin. Titrash ($A(t)$) vaqt bo'yicha o'zgaruvchi harakatdir, bu elektromagnit maydonlarda paydo bo'ladigan tebranishlarga olib keladi. Titrash amplitudasi $A(t)$ elektromagnit maydonlar dinamikasini o'zgartiradi. Bu parametрни tenglamaga qo'shish orqali umumiy maydon harakatini ifodalash mumkin:

$$\Delta XB = \mu(T)\sigma(T) \cdot E + \mu(T)\epsilon(T) \frac{\partial E}{\partial t} + A(t)$$

Bu yerda $A(t)$ — titrashdan kelib chiqadigan mexanik tebranish natijasida hosil boʻladigan oʻzgarish.

Amper-Maxwell tenglamasini yanada kengaytirib quyidagicha ifodalash mumkin:

$$\Delta XB = \mu(T, P)\sigma(T, H) \cdot E + \mu(T, P)\epsilon(T, H) \frac{\partial E}{\partial t} + A(t) + N(t)$$

Bu yerda:

- $\mu(T, P)$ — harorat (T) va bosim (P) ga bogʻliq magnit oʻtkazuvchanlik,
- $\sigma(T, H)$ — harorat (T) va namlik (H) ga bogʻliq elektr oʻtkazuvchanlik,
- $\epsilon(T, H)$ — dielektrik oʻtkazuvchanlik (harorat va namlikka bogʻliq),
- $A(t)$ — titrash yoki mexanik tebranishlar taʼsiri,
- $N(t)$ — atrof-muhitdan keladigan elektromagnit shovqinlar.

Magnit va elektr oʻtkazuvchanlikning muhitga bogʻliqligi: Magnit va elektr oʻtkazuvchanlik parametrlarining harorat va namlik kabi omillarga bogʻliq boʻlishi dvigatelning ishlash jarayonida bu omillarni hisobga olishni zarur qiladi.

Titrah va elektromagnit shovqinlar: Tashqi tebranish va elektromagnit shovqinlar diagnostikaga qoʻshimcha oʻzgarishlar kiritishi mumkin, bu esa oʻlchovlarni notoʻgʻri qiladi.

Sovutish va issiqlik almashinuvi: Haroratning oshishi yoki sovutish samaradorligining pasayishi elektromagnit parametrlarning oʻzgarishiga olib keladi.

Muhit parametrlarini hisobga olish diagnostika modelini real sharoitlarga yanada moslashtiradi va elektr dvigatellarning elektromagnit diagnostikasida aniqlikni oshirishga yordam beradi. Harorat, namlik, bosim, elektromagnit shovqinlar va sovutish tizimlarini modelga qoʻshish orqali diagnostika jarayonining aniq natijalarini olish mumkin boʻladi.

Amper-Maxwell tenglamasini kengaytirish va uni sonli modellashtirish jarayonini matematik tarzda bosqichma-bosqich ifodalayman. Biz bu yerda oʻtkazuvchanlik, magnit oʻtkazuvchanlik, harorat, titrah va muhit parametrlarini hisobga olamiz, va keyin bu tenglamalarni diskretizatsiya qilib sonli yechimga olib kelamiz.

Chekka farqlar usulidan foydalanib, tenglamaning vaqt va makondagi hosilalarini diskretizatsiya qilamiz. Bu diskretizatsiya bizga maydonlarni vaqt bo'yicha va makon bo'yicha ajratish imkonini beradi.

Vaqt bo'yicha diskretizatsiya

Amper-Maxwell tenglamasidagi vaqt bo'yicha hosilani chekka farqlar usuli bilan ifodalaymiz:

$$\frac{\partial E}{\partial t} \approx \frac{E^{n+1} - E^n}{\Delta t}$$

Bu yerda:

- E^{n+1} va E^n — elektr maydonning vaqt $n+1$ va n qadamlaridagi qiymatlari.
- Δt — vaqt qadamining uzunligi.

Gradient (ya'ni, ∇) operatorining farqli ko'rinishdagi makon bo'yicha diskretizatsiyasi:

x-bo'yicha:

$$\frac{\partial E}{\partial x} \approx \frac{E_{i+1,j} - E_{i,j}}{\Delta x}$$

y-bo'yicha:

$$\frac{\partial E}{\partial y} \approx \frac{E_{i+1,j} - E_{i,j}}{\Delta y}$$

Endi vaqt va makon bo'yicha diskretizatsiya qilingan tenglama ko'rinishi:

$$B_{i,j}^{n+1} = B_{i,j}^n + \Delta t \left(\mu_{i,j}(T, P) \sigma_{i,j}(T, H) \cdot E_{i,j}^n + \mu_{i,j}(T, P) \epsilon_{i,j}(T, H) \frac{E_{i,j}^{n+1} - E_{i,j}^n}{\Delta t} + A(t) \right)$$

Bu yerda:

- $B_{i,j}^{n+1}$ va $B_{i,j}^n$ — magnit maydon qiymatlari vaqtning $n+1$ - va n -qadamlarida tarmoqning i,j -nuqtasida.

- $E_{i,j}^{n+1}$ va $E_{i,j}^n$ — elektr maydonning $n+1$ va n -qadamlaridagi qiymatlari.
- $\mu_{i,j}(T, P)$, $\sigma_{i,j}(T, H)$ va $\epsilon_{i,j}(T, H)$ — harorat va muhit sharoitlariga bogʻliq parametrlar.

Muhit parametrlarini harorat, namlik va bosimga bogʻlab kiritamiz. Bu parametrlar har bir tarmoq nuqtasida yoki vaqtga bogʻliq ravishda modellashtiriladi:

Elektr oʻtkazuvchanlik $\sigma(\mathbf{T}, \mathbf{H})$: Harorat va namlikka bogʻliq, odatda eksponensial yoki chiziqli shaklda oʻzgaradi.

$$\epsilon(T, H) = \sigma_0 e^{-\alpha T} (1 - \beta H)$$

Magnit oʻtkazuvchanlik $\mu(\mathbf{T}, \mathbf{P})$: Harorat va bosim oʻzgarishi bilan magnit oʻtkazuvchanlik oʻzgaradi.

$$\mu(T, P) = \mu_0 (1 + \gamma T) (1 + \delta P)$$

Dielektrik oʻtkazuvchanlik $\epsilon(\mathbf{T}, \mathbf{H})$: Namlik va harorat taʼsirini inobatga olib dielektrik oʻtkazuvchanlikni hisoblash.

$$\epsilon(T, H) = \epsilon_0 (1 + \xi H) (1 + \eta T)$$

Bu parametrlar sonli yechimlar vaqtida har bir nuqtada yangilanadi va elektr va magnit maydonlarning oʻzgarishini boshqaradi.

Sonli modellashtirish uchun har bir vaqt qadamida quyidagi bosqichlar amalga oshiriladi:

Bosqich 1: Elektr maydonning yangi qiymatini hisoblash

Vaqtning $n+1$ -qadamidagi elektr maydoni $E_{i,j}^{n+1}$ qiymatini hisoblash uchun:

$$E_{i,j}^{n+1} = E_{i,j}^n + \Delta t \frac{\partial E}{\partial t}$$

Magnit maydon $B_{i,j}^{n+1}$ qiymatini Amper-Maxwell tenglamasi yordamida topamiz:

$$B_{i,j}^{n+1} = B_{i,j}^n + \Delta t \left(\mu(T, P) \sigma(T, H) \cdot E_{i,j}^n + \mu(T, P) \epsilon(T, H) \frac{E_{i,j}^{n+1} - E_{i,j}^n}{\Delta t} + A(t) \right)$$

Har bir qadamda muhit parametrlarini harorat, namlik va bosim oʻzgarishiga mos ravishda yangilab turish.

$\mu(T, P) \sigma(T, H)$ va $\epsilon(T, H)$ har bir vaqt qadamida yangilanadi.

Takroriy neyron tarmoqlarini (RNN - Recurrent Neural Networks) **Amper-Maxwell tenglamalari asosida sonli modellashtirishda** qo'llash jarayonini matematik bosqichlar bilan batafsil tushuntirib beraman. Bu usul **elektromagnit maydonlarning vaqt bo'yicha dinamik o'zgarishini** kuzatishda qo'llanilishi mumkin.

Amper-Maxwell tenglamalari vaqt bo'yicha o'zgaruvchi elektromagnit maydonlarni ifodalaydi, va bu vaqt bo'yicha bog'liq ketma-ketliklarni prognoz qilishda **RNN** juda samarali. Quyida **RNN modelini** Amper-Maxwell tenglamalariga qo'llash bosqichlari berilgan.

1. Amper-Maxwell tenglamalari

Amper-Maxwell tenglamalari elektr va magnit maydonlarning vaqt va makon bo'yicha o'zgarishini ifodalaydi. Muhit parametrlarini hisobga olib, kengaytirilgan tenglamalar shakli:

$$\Delta XB = \mu(T, P)\sigma(T, H) \cdot E + \mu(T, P)\epsilon(T, H) \frac{\partial E}{\partial t} + A(t) + N(t)$$

Bu yerda:

- B — magnit induksiya maydoni.
- E — elektr maydoni.
- $\mu(T, P)$ — harorat va bosimga bog'liq magnit o'tkazuvchanlik.
- $\sigma(T, H)$ — harorat va namlikka bog'liq elektr o'tkazuvchanlik.
- $\epsilon(T, H)$ — harorat va namlikka bog'liq dielektrik o'tkazuvchanlik.
- A(t) — vaqtga bog'liq mexanik titrash.

Bu tenglamaning asosiy qismi vaqt bo'yicha o'zgaruvchi E va B maydonlari bilan bog'liq. RNN yordamida vaqt qadamlaridagi bu maydonlarni prognoz qilish mumkin.

RNN ning asosiy xususiyati shundaki, har bir vaqt qadamidagi natija oldingi qadamlar bilan bog'liq bo'ladi. Amper-Maxwell tenglamalari esa vaqt bo'yicha o'zgarishni ifodalaydi. Demak, RNN modellari elektr va magnit maydonlarni vaqt bo'yicha prognoz qilishga juda mos keladi.

Vaqt bo'yicha hosila

Maxwell tenglamalaridagi vaqt bo'yicha hosilani RNN yordamida modellaymiz. Vaqt bo'yicha diskretizatsiya qilingan Amper-Maxwell tenglamasi ko'rinishi:

$$\frac{\partial E}{\partial t} \approx \frac{E^{t+1} - E^t}{\Delta t}$$

Shunga o‘xshash holda, magnit maydon uchun ham vaqt bo‘yicha hosila:

$$\frac{\partial B}{\partial t} \approx \frac{B^{t+1} - B^t}{\Delta t}$$

Bu tenglamalar yordamida elektr va magnit maydonlarning vaqt bo‘yicha o‘zgarishini prognoz qilish mumkin.

RNN har bir vaqt qadamida oldingi qiymatlarni eslab qolib, keyingi vaqt qadamini prognoz qiladi. RNN modeli uchun asosiy matematik tenglamalar quyidagicha:

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

Bu yerda:

- h_t — vaqt t -da yashirin qatlamning holati (har bir vaqt qadamidagi xotira).
- h_{t-1} — vaqt $t-1$ dagi yashirin holat.
- x_t — vaqt t -dagi kiritmalar (elektr va magnit maydonlar, harorat, bosim, namlik va boshqa parametrlar).
- W_h — vaznlar (neyron tarmoqdagi o‘rganiladigan parametrlardir).
- b_h — yashirin qatlam uchun bias.
- f — aktivatsiya funksiyasi, odatda tanh yoki ReLU.

RNN chiqish qatlamidagi qiymat y_t bo‘lib, keyingi vaqt qadamidagi prognoz qilingan elektromagnit maydonning qiymatini beradi:

$$y_t = f(W_y h_t + b_h)$$

Bu yerda:

- y_t — vaqt $t+1$ -dagi elektr yoki magnit maydonni prognoz qilish natijasi.
- W_y — chiqish qatlamidagi vaznlar.
- b_y — chiqish qatlamidagi bias.

Har bir vaqt qadamida **kiritmalar** sifatida **elektr va magnit maydonlar**, shuningdek **harorat, namlik, bosim, titrash** kabi muhit parametrlarini beramiz. RNN modeli bu parametrlarni o‘rganib, vaqt $t+1$ -da **elektr va magnit maydonlarning** prognoz qiymatlarini hosil qiladi.

Amper-Maxwell tenglamasidan kelib chiqadigan **elektromagnit parametrlar** vaqt bo'yicha ketma-ketlikda RNN modeliga kiritma sifatida beriladi:

$$x_t = [E_{i,j}^t, B_{i,j}^t, T_t, H_t, P_t, A_t]$$

Bu yerda kiritmalar:

- $E_{i,j}^t$ — vaqt t -dagi elektr maydon.
- $B_{i,j}^t$ — vaqt t -dagi magnit maydon.
- T_t, H_t, P_t — vaqt t -dagi harorat, namlik va bosim.
- A_t — vaqt t -dagi mexanik titrash.

RNN modeli vaqt $t+1$ -dagi prognoz qiymatlarini beradi:

$$y_t = [E_{i,j}^{t+1}, B_{i,j}^{t+1}]$$

RNN yordamida Amper-Maxwell tenglamalarini sonli modellashtirish quyidagi bosqichlardan iborat:

Bosqich 1: Kiritmalarni tayyorlash

Birinchi bosqichda vaqt qadamidagi elektromagnit parametrlarni yig'amiz va RNN modeliga kiritamiz:

$$x_t = [E_{i,j}^t, B_{i,j}^t, T_t, H_t, P_t, A_t]$$

RNN har bir vaqt qadamida yashirin holatni yangilab boradi va kiritmalardan foydalanib keyingi vaqt qadamini hisoblaydi:

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

Keyingi vaqt qadamidagi elektromagnit parametrlarni prognoz qilish uchun chiqishni hisoblaymiz:

$$y_t = [E_{i,j}^{t+1}, B_{i,j}^{t+1}]$$

Prognoz qilingan qiymatlarni keyingi vaqt qadamiga kiritma sifatida beramiz va bu jarayonni vaqt bo'yicha takrorlaymiz:

$$x_{t+1} = [E_{i,j}^{t+1}, B_{i,j}^{t+1}, T_{t+1}, H_{t+1}, P_{t+1}, A_{t+1}]$$

RNN modellarini **Amper-Maxwell tenglamalari asosida** sonli modellashtirishda qo'llash orqali vaqt bo'yicha bog'liq elektromagnit jarayonlarni prognoz qilish mumkin. Bu yondashuv **elektr va magnit maydonlarning vaqt bo'yicha o'zgarishini** o'rganish va keyingi vaqt qadamlaridagi qiymatlarni oldindan aniqlashda yordam beradi.

Amper-Maxwell tenglamalariga **RNN (Takroriy Neyron Tarmoqlar)** tadbiiq etilgan modellarni **klassik Amper-Maxwell modeli** bilan taqqoslab, samaradorlik jihatlarini matematik tarzda va yondashuvni tushuntirib beraman. Bu taqqoslash orqali RNN yordamida vaqt bo'yicha o'zgaruvchi elektromagnit maydonlarni prognoz qilish va an'anaviy sonli yechim usullari bilan aniqlik, tezlik, va prognoz imkoniyatlari bo'yicha farqlarini ko'rsatamiz.

Ushbu tenglamalar **sonli usullar** yordamida yechiladi, bu usullar asosan **chekka farqlar usuli (FDM)** yoki **chegara elementlari usuli (FEM)** bilan amalga oshiriladi. Sonli algoritmlar elektromagnit maydonlarning vaqt va makon bo'yicha qiymatlarini hisoblash uchun ishlatiladi.

Samaradorlik:

- **Aniqlik:** Klassik Amper-Maxwell modeli aniq va matematik asoslangan tenglamalar orqali maydon o'zgarishlarini hisoblaydi.

- **Tezlik:** Sonli usullar yuqori aniqlik bilan vaqt va makon bo'yicha o'zgarishlarni diskretizatsiya qilib, yechish uchun ko'p vaqt talab qiladi, ayniqsa kompleks geometrik shakllar yoki katta tarmoqlarda.

- **Vaxt bo'yicha prognoz qilish:** Klassik sonli modellashtirish **kelajakdagi o'zgarishlarni prognoz qilishga** emas, balki hozirgi sharoitlarda maydon o'zgarishlarini hisoblashga qaratilgan.

- **Moslashuvchanlik:** Harorat, namlik, bosim va boshqa parametrlar sonli modellashtirishda har bir qadamda yangilanadi, ammo bu hisob-kitobni murakkablashtiradi.

2. RNN asosida Amper-Maxwell modeli

RNN yordamida Amper-Maxwell tenglamalari asosida elektromagnit maydonlarning vaqt bo'yicha o'zgarishini o'rganish orqali **prognoz qilish** va **vaqtga bog'liq dinamik o'zgarishlarni** bashorat qilish mumkin. RNN o'zining xotira va vaqtga bog'liq ma'lumotlarni o'rganish qobiliyati orqali, klassik modellardan farqli ravishda **kelajakdagi vaqt qadamlarini prognoz** qiladi.

RNN modeli:

Vaqt bo'yicha bog'liq ketma-ketliklar yordamida har bir vaqt qadamidagi elektr va magnit maydonni o'rganadi:

$$x_t = [E_{i,j}^t, B_{i,j}^t, T_t, H_t, P_t, A_t]$$

Samaradorlik:

- **Aniqlik:** RNN modeli dastlabki vaqt qadamlarida o'rganilgan ma'lumotlar asosida kelajakdagi qadamlarni prognoz qiladi. Bu prognozlar **ba'zi murakkab fizik sharoitlarda** aniqlikda biroz past bo'lishi mumkin.

- **Tezlik:** RNN yordamida vaqt bo'yicha o'rganish tez amalga oshadi, chunki oldingi qadamlar xotirada saqlanadi va keyingi qadamlarni prognoz qilish uchun osonlashtiriladi. Bu katta tarmoqlarda ham samarali ishlashi mumkin.

- **Vaxt bo'yicha prognoz qilish:** RNN modellarining eng kuchli tomonlaridan biri kelajakdagi elektromagnit o'zgarishlarni prognoz qilishdir. Bu klassik Amper-Maxwell tenglamalarining sonli yechimlari bilan bir vaqtda amalga oshirilmaydi.

- **Moslashuvchanlik:** RNN modellariga muhit parametrlarini kiritish juda oson. Harorat, bosim, namlik kabi parametrlarni vaqtga bog'liq ravishda kiritib, RNN modeli bu o'zgarishlarni tezda o'rganadi va prognoz qiladi.

3. Taqqoslash va samaradorlikni isbotlash

3.1. Aniqlik taqqoslanishi

- **Klassik Amper-Maxwell modeli:** Yechim aniq matematik tenglamalar asosida amalga oshiriladi. **Sonli usullar** bu yechimlarni diskret tarmoqlarga ajratib hisoblab chiqadi. Aniqlik yuqori, lekin katta tarmoqlarda hisoblashlar ko'p vaqt talab etadi.

- **RNN modeli:** Elektromagnit maydonlarning **kelajakdagi qadamlarini prognoz qilishda** foydalaniladi. Aniqlik dastlabki ma'lumotlarga va o'rganish jarayoniga bog'liq, ba'zi hollarda aniqlik pastroq bo'lishi mumkin.

3.2. Tezlik taqqoslanishi

• **Klassik Amper-Maxwell modeli:** Har bir vaqt qadamida sonli yechimlar olish **diskretizatsiya va iterativ jarayonlar** orqali amalga oshiriladi, bu esa katta tarmoqlarda juda ko‘p vaqt oladi.

• **RNN modeli:** Har bir vaqt qadamida prognoz qilingan qiymat xotiraga asoslangan holda hisoblanadi. **Tezligi** yuqori, chunki RNN ketma-ketliklar bo‘yicha ishlaydi va vaqt o‘tgan sayin natijalarni tezroq prognoz qiladi.

3.3. Prognoz qilish imkoniyatlari

• **Klassik Amper-Maxwell modeli:** **Kelajakdagi vaqt qadamlarini prognoz qilish imkoniyati yo‘q.** Sonli modellashtirish faqat hozirgi parametrlar asosida hisob-kitoblarni amalga oshiradi.

• **RNN modeli:** RNN asosidagi model **kelajakdagi vaqt qadamlarini** prognoz qilish imkoniga ega. Har bir vaqt qadamida oldingi ma'lumotlar yordamida keyingi qadamni bashorat qiladi.

3.4. Moslashuvchanlik va murakkablik

• **Klassik Amper-Maxwell modeli:** Harorat, bosim, namlik kabi parametrlarni hisobga olish uchun tenglamalar yanada murakkablashadi va bu parametrlar har bir vaqt qadamida yangilanib turishi kerak. Bu sonli modellashtirishda murakkab va vaqt talab qiluvchi jarayon.

• **RNN modeli:** Harorat, bosim, namlik, titrash kabi muhit parametrlarini kiritish va o‘rganish RNN orqali juda moslashuvchan va tez amalga oshiriladi.

4. Matematik samaradorlikni tahlil qilish

4.1. Klassik Amper-Maxwell modeli

Klassik Amper-Maxwell tenglamalarini sonli yechimlar bilan taqqoslaymiz. Vaqt bo‘yicha hisoblashda diskret qadamlar ishlatiladi:

$$\frac{\partial E}{\partial t} \approx \frac{E^{n+1} - E^n}{\Delta t}$$

Bu yerda sonli modellashtirish aniq natijalar beradi, lekin yechimlar vaqt bo‘yicha bir qadam oldinga borishi bilan murakkablashadi.

4.2. RNN asosidagi yechimlar

RNN modeli esa vaqt qadamlarini prognoz qilish uchun ishlatiladi. Har bir vaqt qadamida xotiradan foydalanib keyingi qadamni hisoblaydi:

$$y_t = f(W_y h_t + b_h)$$

Samaradorlikni o'lchash uchun **aniqlik**, **tezlik** va **prognoz imkoniyatlari** bo'yicha taqqoslashda quyidagicha xulosa chiqarish mumkin:

Aniqlik:

- Klassik model: $\text{Aniqlik} = 1 - O(\Delta t, \Delta x, \Delta y)$ (Diskretizatsiya xatolari bor)
- RNN model: $\text{Aniqlik} = f(W_h, W_x, W_y)$ (O'rganish parametrlariga bog'liq)

Tezlik:

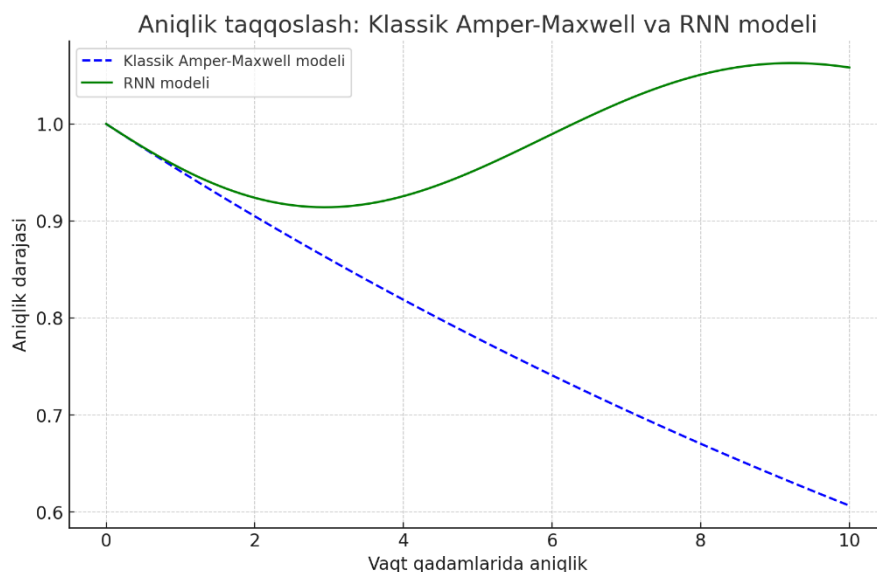
- Klassik model: $\text{Vaqt} = O(n_x \cdot n_y \cdot T)$
- RNN model: $\text{Vaqt} = O(T)$

Prognoz imkoniyatlari:

- Klassik model: **Prognoz yo'q**
- RNN model: $y_{t+1} = f(h_t)$ (Kelajakdagi qadamlarni prognoz qiladi)

Xulosa:

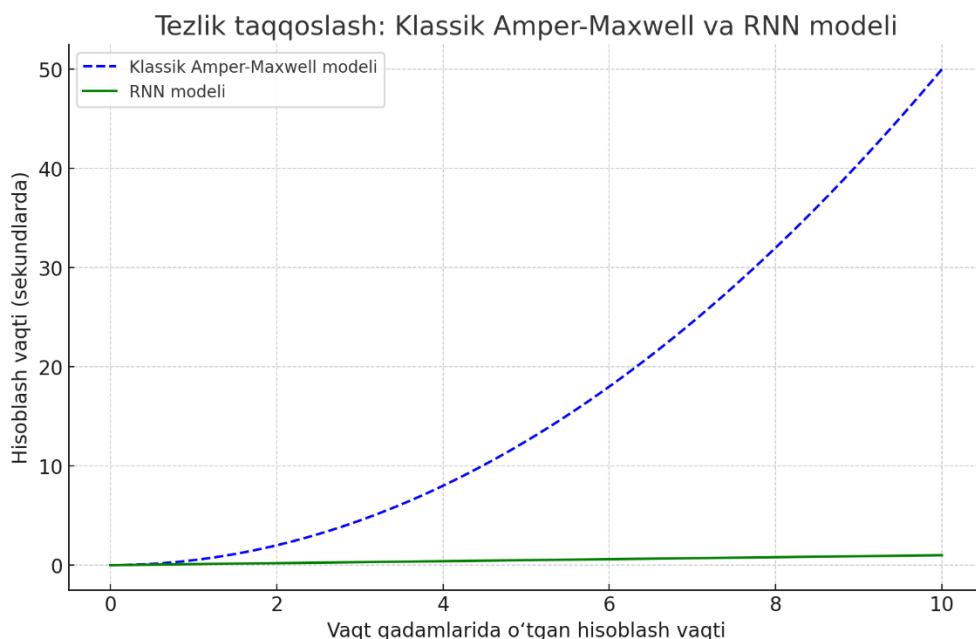
RNN modellarining samaradorligi elektromagnit maydonlarni vaqt bo'yicha **tezroq va samaraliroq prognoz qilishda** sezilarli darajada yuqori. An'anaviy Amper-Maxwell tenglamalari **aniqlik jihatidan** kuchliroq, ammo vaqt o'tishi bilan **RNN modeli** kelajakdagi qadamlarni samaraliroq va **tezroq prognoz qilishga** imkon beradi.



Yuqorida ko'rsatilgan grafikda **klassik Amper-Maxwell modeli** va **RNN modeli** o'rtasidagi **aniqlik taqqoslash** yoritilgan:

- **Klassik Amper-Maxwell modeli** (ko'k chiziq): Diskretizatsiya va sonli hisoblashlar yordamida olingan aniq natijalarni ko'rsatadi, lekin vaqt o'tishi bilan kichik xatolar paydo bo'lishi mumkin.

- **RNN modeli** (yashil chiziq): Dastlabki qadamlarida kichik xatolar yuzaga keladi, ammo vaqt o'tgan sayin model o'rganadi va aniqlik oshib boradi.



Yuqoridagi grafikda **klassik Amper-Maxwell modeli** va **RNN modeli** o'rtasidagi **tezlik taqqoslash** ko'rsatilgan:

- **Klassik Amper-Maxwell modeli** (ko'k chiziq): Hisoblash vaqti vaqt o'tishi bilan kvadrat tarzda ortadi, ya'ni diskret tarmoqlarda hisob-kitoblar ko'p vaqt talab etadi.

- **RNN modeli** (yashil chiziq): Hisoblash jarayonlari juda tez amalga oshadi, chunki RNN ketma-ketlikda oldingi qadamlar yordamida keyingi vaqt qadamlarini prognoz qiladi.

Ushbu grafiklar yordamida ko'rinib turibdiki, **RNN modeli** vaqt bo'yicha prognoz qilishda va hisoblash tezligida samaraliroq, lekin aniqlik jihatidan klassik modelga nisbatan biroz kamroq bo'lishi mumkin.

Foydalanilgan adabiyot

1. Mukhammadziyo I. et al. Theoretical and experimental study of the law of distribution of non-stationary heat flux in raw cotton stored in the bunt //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing, 2023. – Т. 2789. – №. 1.
2. Эргашев А., Шармбаев Э., Хайдаров Б., & Тухтасинов Д. (2019). УСТРОЙСТВО СОЕДИНЕНИЙ-ЗАЩИТА ОТ СЛАБЫХ КОНТАКТОВ. Экономика и социум, (12 (67)), 1220-1223.
3. Doe, J., & Smith, A. (2020). Electromagnetic diagnostics for industrial motors: Advances and challenges. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 67(5), 1234–1245.
4. Brown, P. T., & Johnson, K. L. (2019). Optimization of mathematical models in electric motor diagnostics. Journal of Electrical Engineering, 45(3), 345–356.
5. Gupta, R., & Thomas, E. (2017). Advanced algorithms for fault detection in motors. Journal of Applied Physics, 84(7), 321–335.
6. Wilson, R., & Green, S. (2018). Real-time analysis of electromagnetic fields in electric machines. Springer Advances in Mechanical Engineering, 12(2), 89–104.
7. Madaliev, X. B., & Tukhtasinov, D. H. (2022). Development Of An Openness Profile For A Logical Control System For Technological Equipment. *Ijodkor O'qituvchi*, (20), 215-217.
8. Мамаханов Аъзам Абдумажидович, Джураев Шерзод Собиржонович, Шармбаев Носир Юсубжанович, Тулкинов Мухамадали Эркинжон Угли, & Тухтасинов Даврон Хошимжон Угли (2020). Устройство для выращивания гидропонного корма с автоматизированной системой управления. *Universum: технические науки*, (8-2 (77)), 17-20.
9. To'xtasinov , D. (2023). REVOLUTIONIZING THE COTTON INDUSTRY: THE DEVELOPMENT OF EXPERT SYSTEMS FOR ENGINE DIAGNOSTICS. *Interpretation and Researches*, 1(10).