

15-Aprel, 2026-yil

**ASINXRON MOTOR TASHQI MAGNIT MAYDONINING MATEMATIK
MODELI VA HISOBLASH ALGORITMI**

Pirmatov Nurali Berdiyrovich

Toshkent davlat texnika universiteti

Elektr mashinalari va yuritmalari muhandisligi kafedrasi professori

E-mail: npirmatov@mail.ru

ORCID: 0000-0001-5212-2593

Bekishev Allabergen Yergashevich

Toshkent davlat texnika universiteti

Elektr mashinalari va yuritmalari muhandisligi kafedrasi dotsenti, PhD.

E-mail: allabergenbekisev@gmail.com

ORCID: 0000-0003-3019-2050

Kurbonov Najmiddin Abduxamidovich

Qarshi davlat texnika universiteti

Elektr ta‘minoti va intellektual energetik tizimlar kafedrasi dotsenti, PhD.

E-mail: Elmeh1212@mail.ru

ORCID: 0000-0003-4152-4006

Jalilov Akobir Abror o‘g‘li

Qarshi davlat texnika universiteti magistranti

Murodullayev Jahongir Rahmatullo o‘g‘li

Qarshi davlat texnika universiteti magistranti

Annotatsiya: *Ushbu maqolada asinxron motorning tashqi magnit maydonini matematik modellashtirish usullari va uni hisoblash algoritmlari ko‘rib chiqiladi. Magnit zanjir tenglamalari, Maksvell tenglamalari asosida maydon taqsimoti aniqlanadi. Shuningdek, sonli usullar (ayniqsa, chekli elementlar usuli) orqali hisoblash algoritmi taklif etiladi.*

Kalit so‘zlar: *asinxron motor, magnit maydon, Maksvell tenglamalari, chekli elementlar usuli, matematik model.*

KIRISH

Asinxron motorlar sanoatda eng keng tarqalgan elektr mashinalaridan biri hisoblanadi. Ularning ish samaradorligi va ishonchliligi tashqi va ichki magnit maydonlarning to‘g‘ri tahliliga bog‘liq [1].

Tashqi magnit maydonni o‘rganish quyidagi holatlarda muhim:

- energiya yo‘qotishlarini baholash;
- elektromagnit shovqinni tahlil qilish;
- yaqin joylashgan uskunalarga ta‘sirini aniqlash [2].

Asinxron motorlarning tashqi magnit maydon parametrlarini kuzatish va tahlil qilish orqali motorda shikastlanish holatlarini diganostika qilishni ko‘rib chiqiladi.

15-Aprel, 2026-yil

Elektr mashinalarda elektr mexanik energiya o‘zgarishi mashinaning havo bo‘shlig‘ida sodir bo‘ladi. Hosil qilingan maydon tashqi muhitga o‘z ta‘sirini ko‘rsatadi. Faradey nazariyasiga ko‘ra hosil qilingan magnit maydoni magnit oqimlaridan iborat bo‘lib, berk kuch chiziqlaridan tashkil topadi. Bu kuch chiziqlari elektr mexanik jarayonlarda asosiy o‘rinni egallaydi. Faradey taqdim etgan ushbu elektr mexanik energiya o‘zgarishi jarayonini D. Maksvell matematik ko‘rinishida ifodalagan. Elektr mashinasi xavo bo‘shlig‘ida hosil bo‘ladigan uyurmaviy magnit kuch chiziqlarining shakli yuklama, berilgan kuchlanish, mashinaning ish rejimi hamda magnit sistemaning geometrik holatiga bog‘liq ravishda o‘zgaradi [57; 29-31-b.].

MAVZUGA OID ADABIYOTLAR SHARHI

Asinxron motorlarda magnit maydonlarni tahlil qilish masalasi elektr mashinasozligida muhim ilmiy yo‘nalishlardan biri hisoblanadi. Ushbu sohada olib borilgan tadqiqotlar asosan uchta yo‘nalishda rivojlangan:

- analitik modellar;
- ekvivalent sxemalar;
- sonli (numerical) modellashtirish usullari.

1. Analitik modellar asosida tadqiqotlar. Ilk tadqiqotlarda asinxron motor magnit maydoni analitik usullar orqali o‘rganilgan. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems asarida dq-koordinatalar tizimida motorning elektromagnit jarayonlari modellangan va magnit maydonning vaqt bo‘yicha o‘zgarishi tahlil qilingan [1]. Shuningdek, Electric Machinery manbada asinxron motorning magnit zanjiri va uning soddalashtirilgan analitik ifodalari keltirilgan [2]. Ushbu yondashuvlar hisoblashni osonlashtiradi, ammo tashqi magnit maydonni aniq aks ettirishda cheklangan.

2. Elektromagnit maydon nazariyasi asosida yondashuvlar. Magnit maydonni aniqroq tavsiflash uchun tadqiqotchilar Maksvell tenglamalariga asoslangan modellarni qo‘llashgan. Elements of Electromagnetics kitobida magnit maydonlarning umumiy nazariy asoslari, ayniqsa, vektor potensial usuli keng yoritilgan [3]. Bu yondashuv asinxron motor tashqi maydonini hisoblash uchun fundamental baza hisoblanadi. Analysis and Computation of Electric and Magnetic Field Problems asarida elektr mashinalardagi tarqaluvchi (leakage) magnit maydonlarni hisoblash usullari keltirilgan [4]. Mualliflar tashqi maydonlarni analitik hisoblash murakkab ekanligini ta‘kidlaydilar.

3. Chekli elementlar usuli (FEM) bo‘yicha tadqiqotlar. Zamonaviy tadqiqotlarda eng keng tarqalgan usul — chekli elementlar usuli (Finite Element Method) hisoblanadi. Finite Elements for Electrical Engineers asarida FEM usulining nazariy asoslari va elektr mashinalarga qo‘llanilishi batafsil keltirilgan [5]. Ushbu usul murakkab geometriyali asinxron motorlarda magnit maydonni yuqori aniqlikda hisoblash imkonini beradi. The Induction Machine Handbook kitobida asinxron motorlarning magnit maydoni, ayniqsa, tashqi va tarqaluvchi maydonlar eksperimental va sonli usullarda tahlil qilingan [6].

4. Zamonaviy hisoblash algoritmlari. So‘nggi yillarda tadqiqotlar quyidagi yo‘nalishlarga qaratilgan:

- adaptiv mesh algoritmlari;

15-Aprel, 2026-yil

- ko‘pfizikali modellashtirish (multiphysics);
- tezkor iterasion yechish usullari.

Ayrim ilmiy ishlar FEM ni optimallashtirish orqali hisoblash vaqtini kamaytirishga qaratilgan [7]. Shu bilan birga, sun‘iy intellekt va mashinali o‘rganish usullari ham magnit maydonni prognozlashda qo‘llanilmoqda [8].

5. Ilmiy muammolar va tadqiqotdagi bo‘shliqlar. Adabiyotlar tahlili shuni ko‘rsatadiki:

- analitik modellar tashqi magnit maydonni to‘liq aks ettirmaydi;
- FEM yuqori aniqlik beradi, ammo hisoblash resursi katta talab qiladi;
- tashqi magnit maydonning atrof muhitga ta’siri yetarlicha o‘rganilmagan.

Shu sababli, samarali va tezkor hisoblash algoritmlarini ishlab chiqish dolzarb masala bo‘lib qolmoqda.

Maksvell tenglamasiga ko‘ra, magnit maydon kuchlanganligi quyidagi ko‘rinishda ifodalanadi.

$$\operatorname{rot}\vec{H} = \vec{j} \quad (1)$$

Magnit maydon kuchlanganligi bilan magnit induksiyasi quyidagicha bog‘langan [57;30-b.]:

$$\vec{B} = \mu_a \vec{H} \quad (2)$$

Agar, magnit maydon kuch chiziqlari berk ekanligi hisobga olinsa, u holda magnit induksiyasi $\operatorname{div}\vec{B} = 0$ ko‘rinishiga ega bo‘ladi.

Real holatlarda murakkab magnit o‘zakli elektr mashinalarida elektr mashinaning sirti, toklarning taqsimlanishi tashqi muhit xossalari va harakat qonunlariga asosan bir necha taxminlarga yo‘l qo‘yiladi.

Maksvell tenglamasiga ko‘ra elektr maydon kuchlanganligi magnit induksiyasi bilan quyidagicha bog‘langan [57;31-b.].

$$\operatorname{rot}\vec{E} = -\partial\vec{B}/\partial t \quad (3)$$

Ushbu magnit induksiyasi elektr maydon kuchlanganligi magnit maydoni haqida ma’lumot beradi. Ya’ni magnit maydonining tabiatini ifodalaydi.

Elektr mashinasining havo bo‘shlig‘idagi magnit yurituvchi kuchi quyidagi formula orqali ifodalanadi:

$$F_\delta = k_\delta H_\delta \delta \quad (4)$$

Umumiy holatda elektr mashinaning magnit yurituvchi kuchi quyidagiga teng:

$$\sum F = F_\delta + F_{st} \quad (5)$$

Stator hamda rotor orasidagi bo‘shliqda garmonik magnit maydonning spektri paydo bo‘lishi sababli mashinaning tashqi magnit maydoni bo‘shlig‘da analogli spektr hosil bo‘ladi. Tashqi magnit maydonning induksiyasi manbadan uzoqlashgan sari $-B = \frac{1}{R^{n+2}}$ qonunga muvofiq kamayadi; bu erda n=magnit garmonikasining tartib raqami. Elektr

15-Aprel, 2026-yil

mashinasining asosiy n tartibli garmonikaga ega tashqi magnit maydoni (n+k) tartibli garmonikaga nisbatan juda kichikligi sababli hisobga olinmaydi.

Tashqi magnit maydon elektr mashina korpusi orqali ekranlashadi. Ekranlash koeffisienti orqali ushbu holatni e‘tiborga olish zarur. U holda, elektr mashinaning tashqi magnit maydonining radial induksiyasi quyidagi ko‘rinishga ega [69;62-b.].

$$B_{AT} = B_m \sin(\omega t + p\varphi) \quad (6)$$

bu yerda $\varphi = \varphi_0 + \Omega_r t$ statik va dinamik eksentristik turini belgilovchi ko‘rsatgich;

$\Omega_r = \Omega_0 + \Delta\Omega_r \cos(2s\omega t + \gamma)$ buchak tezlanishi; s-sirpanish;

$\Omega_0 - \Omega_r$ o‘rtacha qiymati bo‘lib, berilgan yuklama momentidagi shikastlangan sterjenlar soniga bog‘liq;

β_0 – elektr mashinaning o‘zagidagi eksentristiklik turini belgilovchi kattalikning boshlang‘ich qiymati (statik yoki dinamik);

p-juft qutblar soni [70;3-b.].

Sterjen shikastlanganda tashqi magnit magnit maydonining tezligi qiymati ham o‘zgaradi, ushbu holatni hisobga olsak:

$$B_{AT} = \hat{B} \cos[\omega t - p(\beta_0 + \Omega_r t)] \quad (7)$$

bu yerda: B_{AT} –eksentristikligi buzilgan tashqi magnit maydon induksiyasi [Tesla];

\hat{B} –magnit maydon induksiyasining amplituda qiymati [Tesla];

Ushbu formulani quyidagicha yozishimiz mumkin [70; 3-b.]:

$$B_{AT} = \hat{B} \cos[s\omega t - \Delta\Omega_r p t \cos(2s\omega t + \gamma) - p\beta_0] \quad (8)$$

Asinxron motorda hosil bo‘layotgan magnit maydon induksiyasi manbadan uzoqlashgan sari masofaga teskari proporsional tarzda kamayadi. Real eksperiment tadqiqotlar davomida aniqlangan tashqi magnit maydon induksiyasi asinxron motorning stator va rotor oralig‘idagi havo bo‘shlig‘ida hosil bo‘layotgan magnit maydon kuchining birinchi garmonik qiymati moduliga to‘g‘ri proporsional hamda umumiy magnit maydon kuchining amplituda qiymatining moduliga teskari proporsionl bo‘lgan ekranlash koeffitsiyenti - K_3 tushunchasini kiritamiz. K_3 -ekranlash koeffisienti bo‘lib, asinxron motor stator va rotor chulg‘ami havo oralig‘ida hosil bo‘layotgan magnit yurituvchi kuchning 1-garmonika tashkil etuvchi qiymati– $F_\delta^{(1)}$ hamda umumiy stator chulg‘amida hosil bo‘layotgan magnit yurituvchi kuch- $\sum F^{(0)}$ orasidagi nisbatga teng:

$$K_3 = \frac{|F_\delta^{(1)}|}{|\sum F^{(0)}|} \quad (9)$$

Agar ekranlash koeffisientini hisobga olsak quyidagi ifodaga kelamiz [69;5-b]:

$$\hat{B} = k_3 \cdot B_m \quad (10)$$

bu yerda: B_m –asinxron mashinaning statorida hosil bo‘lgan magnit maydon induksiyasining maksimal qiymati;

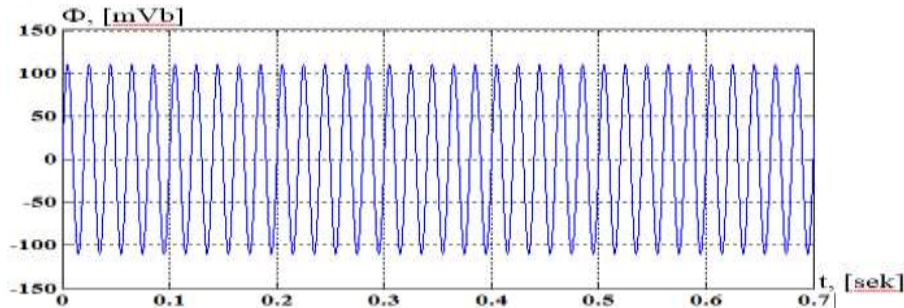
k_3 - ekranlash koeffisienti (ekranlash funksiyasi sifatida tashqi va statorida hosil bo‘lgan magnit maydon induksiyalari nisbati olingan [89; 24-b.]).

$$B_{AT} = k_3 \cdot B_m \cos[s\omega t - \Delta\Omega_r p t \cos(2s\omega t + \gamma) - p\beta_0] \quad (11)$$

15-Aprel, 2026-yil

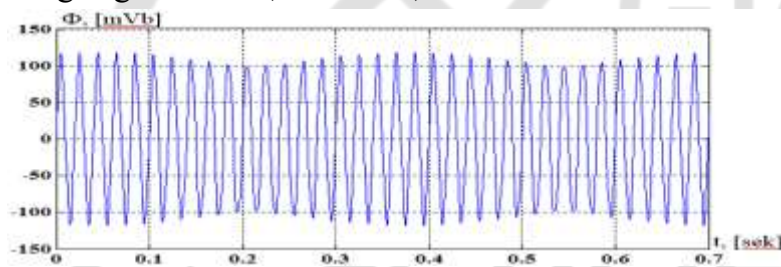
bu yerda: k_3 - ekranlash koeffitsienti bu elektr mashinaning stator qismida hosil bo‘layotgan magnit induksiyasi miqdorining tashqi havo bo‘shlig‘ida $k_e < 1$ kamayishini ko‘rsatuvchi koeffitsient.

Shunday qilib, tashqi magnit maydoni induksiyasi vaqt birligi ichida normal ishlab turgan elektr mashinalarda quyidagi ko‘rinishdagi grafik bo‘yicha o‘zgaradi (1-rasm).



1-rasm. Matematik modelda olingan asinxron motorning normal holatdagi tashqi magnit maydoni ossillogramasi

Yuklama momentida faza uzulganda, tebranishning ma‘lum burchak oralig‘idagi burchak tezligi ortadi, u holda tashqi magnit maydon induksiyasi o‘zgarish grafigi quyidagi ko‘rinishga ega bo‘ladi (2.12-rasm)



2-rasm. Matematik modelda olingan asinxron motorning bir faza uzilgandagi havo oralig‘ining magnit maydoni ossillogramasi

Asinxron mashinaning tashqi magnit maydon induksiyasini hisoblash algortimining ishlash tartibi. Yuqoridagi 2.13-rasmda keltirilgan alogritm boshlanishida quyidagi parametrlarni kiritish zarur. Kirish parametrlari asinxron motorning boshlang‘ich parametrlari bo‘lib har bir markadagi asinxron motor uchun ma‘lumotnomalarda keltiriladi:

k_δ – Asinxron motor stator va rotor oralig‘idagi xavo bo‘shlig‘ining koeffitsienti;

H_δ – havo bo‘shlig‘idagi magnit maydonining kuchlanganligi;

δ – havo bo‘shlig‘i;

k_{ob1} – stator chulg‘aming koeffitsienti;

w_1 – stator chulg‘aming o‘ramlar soni;

I - asinxron motorning stator cho‘lg‘amiga berilgan tok kuchi;

p - motorning juft qutblar soni, $\cos \varphi$ - berilayotgan elektr tokining quvvat koeffitsiyenti;

β_0 - berilayotgan elektr toki fazasining siljish burchagi;

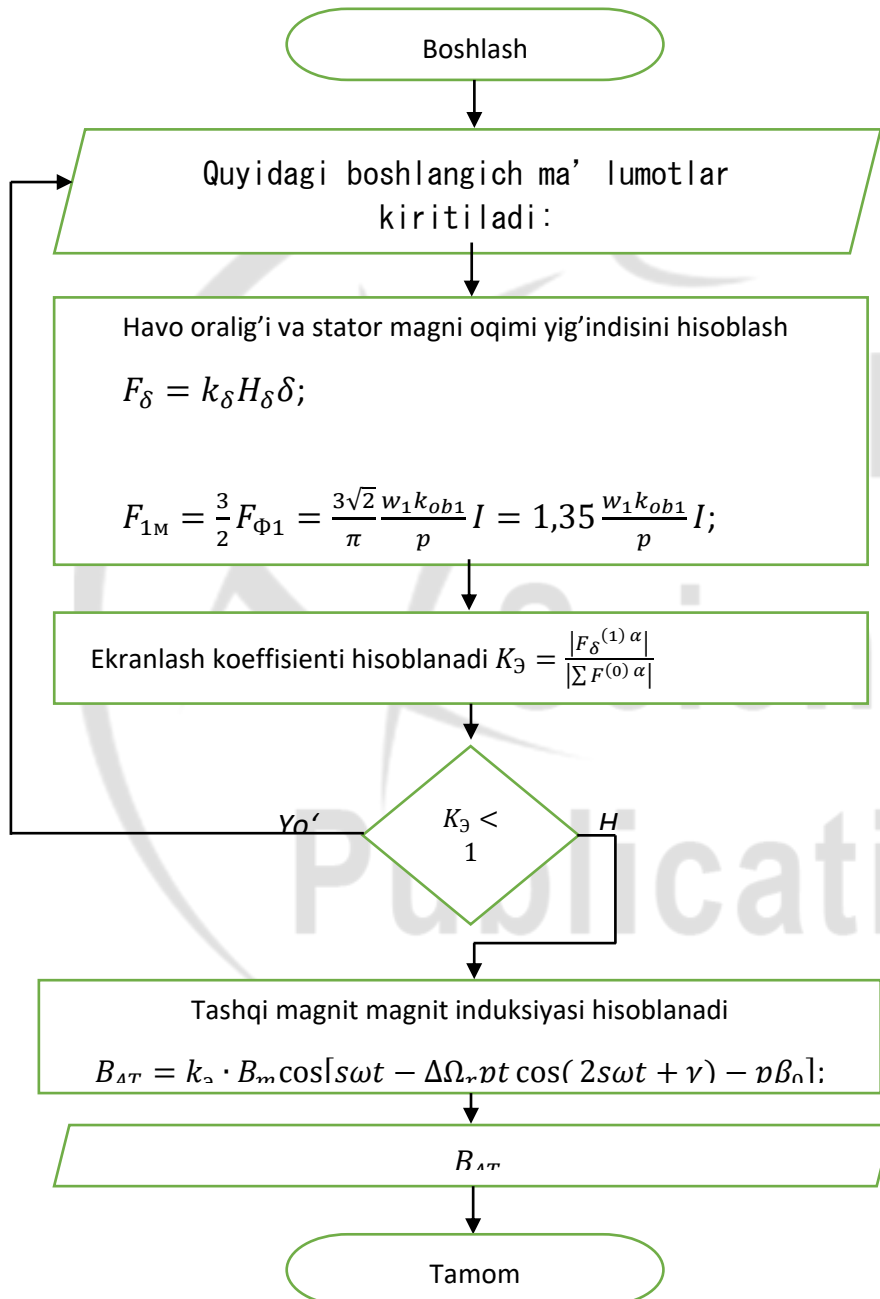
$\Delta\Omega_r$ - rotorning tezlik o‘zgarishi;

s – sirpanish;

15-Aprel, 2026-yil

γ – rotorning sirpanishi natijasida fazaning siljish burchagi. Matematik modelni hisoblashda quvvati 0,75 kW bo‘lgan qisqa tutashgan rotorli asinxron motorning qiymatlari olingan. Ushbu qiymatlar asinxron motorga tegishli malumotnomalardan oligan [15-19 b.].

Yuqoridagi paramterlar kiritilgandan so‘ng asinxron motorga berilayotgan elektr energiyasi natijasida stator va rotor cho‘lg‘amlarida hosil bo‘layotgan tashqi maydon magnit yurituvchi kuchi va magnit maydoni induksiyasi (1), (2), (3), (7), (8) ifodalardan foydalanib topiladi.



3-rasm. Asinxron motorning tashqi magnit maydon induksiyasini hisoblash algoritmi

Hisoblab topilgan tashqi va ichki magnit maydon induksiyalaridan ekranlash koeffitsiyentini (5) ifodadan foydalangan holda hisoblanadi, ya'ni:

So‘ngra quyidagi shart bo‘yicha tekshiramiz:

15-Aprel, 2026-yil

a) Agar $K_3 < 1$ –bo‘lsa algoritmgga kiritilgan parametrlar to‘g‘ri va algoritmda **“HA”** sharti qabul qilinadi keyingi bosqichga o‘tiladi.

b) Agar $K_3 \geq 1$ –aniqlansa, demak kiritilgan parametrlarda xatolik mavjud va algoritmda **“YO‘Q”** sharti qabul qiladi, hamda kiritilgan parametrlar blogiga qaytadi. Bunday holatda odatda rotorning sirpanishi yuklamaga bog‘liq holda o‘zgarganligi tufayli sirpanish parametrini tekshirib qaytadan kiritiladi.

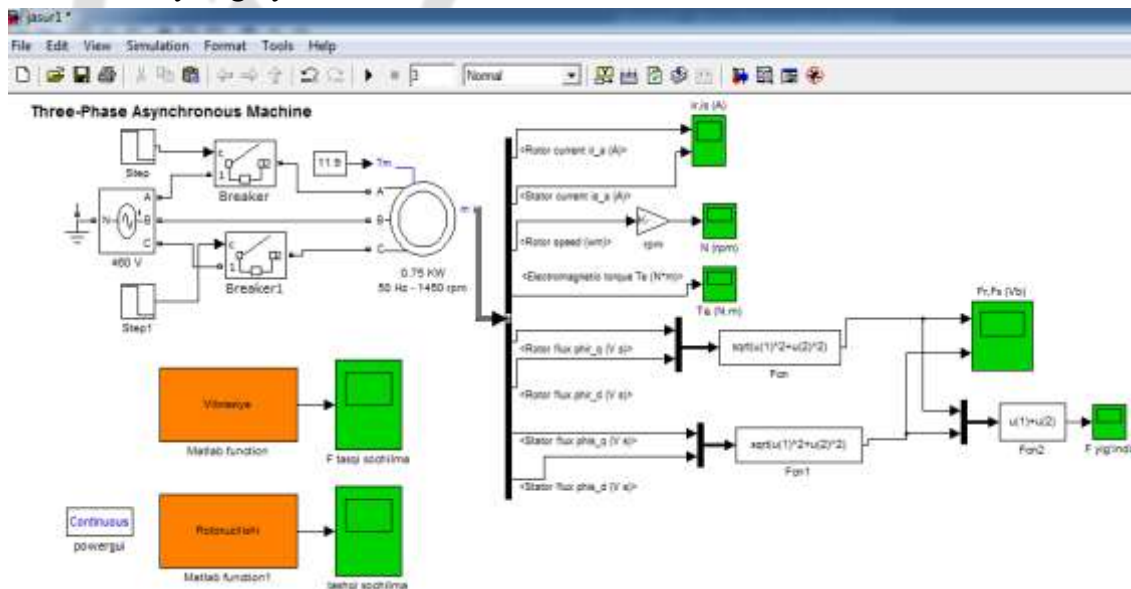
Mavjud ekranlash koeffisienti A.Y. Aleksenko [6] ishida quyidagi ifoda orqali aniqlangan:

$$K_3 = \frac{B_{tashqi}}{B_{ichki}},$$

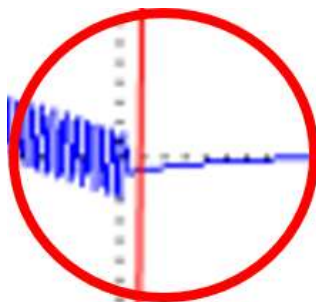
bu yerda, B_{tashqi} -tasqi sochilma magnit maydoni induksiyasi, B_{ichki} – havo oralig‘idagi magnit maydoni induksiyasi.

Taklif qilinayotgan ekranlash koeffisientini aniqlashda havo oralig‘idagi magnit yurituvchi kuchning asosiy garmonikasi hamda tashqi yig‘indi magnit yurituvchi kuchi e‘tiborga olingan.

Keyingi bosqichda (2.28) ifoda orqali asinxron motorda hosil bo‘lgan tashqi magnit maydon induksiyasi sinusoidal qonun bo‘yicha oniy vaqtdagi qiymati aniqlanadi va ekranga natija sifatida chiqariladi. Dasturiy ta‘minotdan foydalangan holda magnit maydoni induksiyasini ma‘lum vaqt intervalidagi grafisini hosil qilishimiz mumkin. Shu bilan algoritm o‘z nihoyasiga yetadi.



4-rasm. Asinxron motorning tashqi magnit maydonini hisoblash uchun yaratilgan Matlab immitasion modeli



15-Aprel, 2026-yil

Yuqoridagi asinxron motorning tashqi magnit maydonini hisoblash uchun yaratilgan Matlab immitasion modeli yordamida quyidagi nosozliklarni modellashtirish asosidagi natijalar keltirilgan.

5-rasm. Matlab immitasion modelda olingan asinxron motorning stator va rotor toklari ossilogrammalari

6-rasm. Matlab immitasion modelda olingan asinxron motorning tezligi va elektromagnit momenti ossilogrammalari

7-rasm. Matlab immitasion modelda olingan asinxron motorning stator va rotor natijaviy magnit maydonining ossilogrammasi

8-rasm. Matlab immitasion modelda olingan asinxron motor rotorining bitta sterjeni uzilgan holatdagi tashqi sochilma magnit maydoni ossilogrammasi

9-rasm. Asinxron motorning vibrasiya mavjud bo‘lgan holatdagi tashqi magnit maydonini

10-rasm. Asinxron motorning bitta fazasi uzilgan holatdagi tashqi magnit maydonining ossilogrammasi

XULOSA

Adabiyotlar sharhi shuni ko‘rsatadiki, asinxron motor tashqi magnit maydonini modellashtirish sohasi klassik analitik usullardan tortib zamonaviy sonli algoritmlargacha rivojlangan. Hozirgi kunda eng samarali yondashuv — FEM asosidagi modellar bo‘lib, kelajakda ularni optimallashtirish va intellektuallashtirish asosiy tadqiqot yo‘nalishi hisoblanadi.

Asinxron motor tashqi magnit maydonini matematik modellashtirish elektr mashinalarni optimal loyihalashda muhim ahamiyatga ega. Chekli elementlar usuli asosida ishlab chiqilgan algoritim yuqori aniqlikda natija beradi va sanoatda qo‘llash uchun qulay hisoblanadi.

1. Matlab dasturi yordamida asinxron motorining tashqi magnit maydoni va havo bo‘shlig‘idagi magnit maydonini hisoblashning matematik modeli va algoritmi takomillashtirildi.

2. Asinxron motorining tashqi magnit maydonining matematik ifodasiga havo oralig‘ida hosil bo‘layotgan magnit yurituvchi kuchning 1-garmonika tashkil etuvchi qiymati— $F_{\delta}^{(1)}$ hamda umumiy stator chulg‘amida hosil bo‘lgan magnit yurituvchi kuch— $\sum F^{(0)}$ orasidagi nisbatni, ya’ni ekranlash koefitsiyentini kiritish orqali hisoblash usuli takomillashtirildi.

15-Aprel, 2026-yil

3. Asinxron motorning tashqi magnit maydonini hisoblash uchun Matlab imitasion modeli yaratilgan.

4.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO‘YXATI:

[1] P. C. Krause, O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff, and S. D. Pekarek, *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*. Hoboken, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, 2013.

[2] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, and S. D. Umans, *Electric Machinery*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2003.

[3] M. N. O. Sadiku, *Elements of Electromagnetics*. Oxford, U.K.: Oxford Univ. Press, 2014.

[4] K. J. Binns and P. J. Lawrenson, *Analysis and Computation of Electric and Magnetic Field Problems*. Oxford, U.K.: Pergamon Press, 1973.

[5] P. P. Silvester and R. L. Ferrari, *Finite Elements for Electrical Engineers*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 1996.

[6] I. Boldea and S. A. Nasar, *The Induction Machine Handbook*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2002.

[7] S. J. Salon, *Finite Element Analysis of Electrical Machines*. Boston, MA, USA: Springer, 1995.

[8] M. Amrhein and P. T. Krein, “Induction machine modeling approach based on 3-D magnetic equivalent circuit framework,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 25, no. 2, pp. 339–347, 2010, doi: 10.1109/TEC.2010.2046998.

[9] J. Le Besnerais et al., “Multiphysics modeling of PWM-fed induction machines,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 4, pp. 1279–1287, 2010, doi: 10.1109/TIE.2009.2029526.

[10] N. R. Tavana and V. Dinavahi, “Real-time nonlinear magnetic equivalent circuit model of induction machine,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 31, no. 2, pp. 520–530, 2016, doi: 10.1109/TEC.2015.2514099.