



# Mashina havo oraliq'iga statorning fazoviy garmonik maydonlari ta'sirida po'latning to'yinishini tadqiq qilish

Kudrat G. Abidov<sup>1</sup>, Giyosiddin M. Maxmadiev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> DSc, dots, Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; [abidoff@rambler.ru](mailto:abidoff@rambler.ru) <https://orcid.org/0000-0001-8315-0351>;

<sup>2</sup> SIFAT-SENTR" MChJ "Elektrotexnika" laboratoriyasi mutaxassisi, Toshkent, 100157, O'zbekiston; [giyos2007@rambler.ru](mailto:giyos2007@rambler.ru) <https://orcid.org/0000-0002-4325-0216>;

**Dolzarbliq:** o'zgaruvchan tok elektr mashinalarining ishlashi ko'p jihatdan havo oraliq'idagi magnit maydonning xususiyatlariga, jumladan, uning spektral tarkibiga bog'liq. Maydon taqsimotiga ta'sir etuvchi muhim omillardan biri — magnit o'tkazgichdagi po'latning to'yinishidir. Ushbu ta'sir ilgari mashinaning integral parametrlari doirasida o'rganilgan bo'lsa-da, ayniqsa bir qutb va fazaga nisbatan kasr sondagi pazlarga ega mashinalarda fazoviy garmonikalar bilan bog'liq jihatlari yetarlicha tadqiq etilmagan. Garmonikalarni tahlil qilishda to'yinishni inobatga olish moment pulsatsiyalari, shovqin darajasi va qizish jarayonlari bo'yicha hisob-kitoblarning aniqligini oshiradi. Shu sababli magnit maydon spektriga to'yinish ta'sirini aks ettiruvchi modellarni ishlab chiqish elektr mashinalarini yanada aniqroq loyihalash va modellashtirish uchun dolzarb ahamiyatga ega.

**Maqsad:** o'zgaruvchan tok elektr mashinalarining havo oraliq'idagi magnit maydonning fazoviy garmonik tarkibiga magnit o'tkazgichning po'lat qismlarining to'yinishi qanday ta'sir ko'rsatishini, chulg'am konstruktiviyasi hamda magnit materiallar xususiyatlarini inobatga olgan holda o'rganish.

**Usullar:** ushbu tadqiqotda stator va rotor magnit o'tkazgichining po'lat qismlaridagi to'yinishni hisobga olgan holda, o'zgaruvchan tok elektr mashinalarining havo oraliq'idagi magnit maydon taqsimotini tahlil qilish uchun analitik va sonli modellashtirish usullari qo'llanilgan.

**Natijalar:** tadqiqotlar natijasida stator va rotor po'latining to'yinishi mashinaning havo oraliq'idagi magnit maydonning asosiy garmonik tarkibi amplitudasini sezilarli darajada kamaytirishi aniqlangan. Magnit o'tkazuvchanlikning ekvivalent qiymati  $\mu = 4000$  dan  $\mu = 100$  gacha kamaytirilganda, asosiy garmonikaning amplitudasi taxminan 1,5 barobarga kamayadi.

**Kalit so'zlar:** magnit to'yinish, asinxron mashina, maydon garmoniklari, havo oraliq'i, magnit o'tkazuvchanlik, fazoviy garmonik tarkib, stator, rotor, tishli garmonikalar, magnit maydon taqsimoti.

## Исследование влияния насыщения стали на пространственные гармонические поля статора в воздушном зазоре машины

Кудрат Г. Абидов<sup>1</sup>, Гиёсиддин М. Махмадиев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> DSc, доц., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; [abidoff@rambler.ru](mailto:abidoff@rambler.ru) <https://orcid.org/0000-0001-8315-0351>;

<sup>2</sup> специалист лаборатории «Электротехника» ООО «СИФАТ-ЦЕНТР», Ташкент, 100157, Узбекистан; [giyos2007@rambler.ru](mailto:giyos2007@rambler.ru) <https://orcid.org/0000-0002-4325-0216>;

**Актуальность:** работа электрических машин переменного тока во многом зависит от характеристик магнитного поля в воздушном зазоре, включая его спектральный состав. Одним из факторов, влияющих на распределение поля, является насыщение стали в магнитопроводе. Хотя этот эффект ранее изучался в контексте интегральных параметров машин, его влияние на пространственные гармоники поля, особенно в машинах с дробным числом пазов на полюс и фазу, остается недостаточно исследованным. Учет насыщения при анализе гармоник позволяет уточнить расчеты пульсаций момента, уровней шума и нагрева. Поэтому разработка моделей, отражающих влияние насыщения на спектр магнитного поля, представляет интерес для более точного проектирования и моделирования электрических машин.

**Цель:** исследовать влияние насыщения стальных участков магнитопровода на пространственные гармонические составляющие магнитного поля в воздушном зазоре электрических машин переменного тока с учетом конструкции обмоток и свойств магнитных материалов.

**Методы:** в настоящей работе применяются аналитические и численные методы моделирования распределения магнитного поля в воздушном зазоре электрических машин переменного тока с учётом насыщения стальных участков магнитопровода статора и ротора.

**Результаты:** установлено, что насыщение стали статора и ротора существенно снижает амплитуду основной гармонической составляющей магнитного поля в воздушном зазоре машины. При снижении эквивалентной магнитной проницаемости с  $\mu = 4000$  до  $\mu = 100$ , основная гармоника уменьшается в 1,5 раза.

**Ключевые слова:** магнитное насыщение, асинхронная машина, гармоники поля, воздушный зазор, магнитная проницаемость, пространственные гармонические составляющие, статор, rotor, зубцовые гармоники, распределение магнитного поля.

For citation: K.G. Abidov, G.M. Makhmadiev. Investigation of the effect of steel saturation on the spatial harmonic fields of the stator in the air gap of an electrical machine. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2025, no. 4, pp. 309-316.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.18640082>

Received: 03.04.2025  
Revised: 17.04.2025  
Accepted: 08.07.2025  
Published: 27.12.2025

**Copyright:** © Kudrat G. Abidov, Giyosiddin M. Makhmadiev, 2025. Submitted to Problems of Energy and Sources Saving for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



# Study of the Influence of Steel Saturation on the Spatial Harmonic Fields of the Stator in the Machine Air Gap

Kudrat G. Abidov<sup>1</sup>, Giyosiddin M. Makhmadiev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> DSc, assoc.prof, Tashkent State Technical University, Tashkent 100095, Uzbekistan; [abidoff@rambler.ru](mailto:abidoff@rambler.ru) <https://orcid.org/0000-0001-8315-0351>;

<sup>2</sup> Specialist of the "Electrical Engineering" Laboratory at SIFAT-CENTER LLC, Tashkent 100157, Uzbekistan; [giyos2007@rambler.ru](mailto:giyos2007@rambler.ru) <https://orcid.org/0000-0002-4325-0216>;

**Relevance:** the performance of alternating current electrical machines largely depends on the characteristics of the magnetic field in the air gap, including its spectral composition. One of the factors influencing the field distribution is the magnetic core steel saturation. Although this effect has previously been studied in the context of integral machine parameters, its influence on the spatial harmonics of the field—especially in machines with a fractional number of slots per pole per phase—remains insufficiently explored. Considering magnetic saturation in harmonic analysis makes it possible to refine calculations of torque pulsations, noise levels, and heating. Therefore, the development of models that reflect the influence of saturation on the magnetic field spectrum is of great interest for more accurate design and simulation of electrical machines.

**Aim:** to investigate the influence of magnetic core steel saturation on the spatial harmonic components of the magnetic field in the air gap of alternating current electrical machines, taking into account the winding configuration and magnetic material properties.

**Methods** this study employs analytical and numerical modeling methods to analyze the distribution of the magnetic field in the air gap of alternating current electrical machines, considering the saturation of the stator and rotor core steel sections.

**Results:** it has been established that saturation of the stator and rotor steel significantly reduces the amplitude of the fundamental harmonic component of the magnetic field in the air gap. When the equivalent magnetic permeability decreases from  $\mu = 4000$  to  $\mu = 100$ , the fundamental harmonic amplitude drops by a factor of 1.5.

**Keywords:** magnetic saturation, induction motor, field harmonics, air gap, magnetic permeability, spatial harmonic components, stator, rotor, slot harmonics, magnetic field distribution.

## 1. Введение (Introduction)

Как известно, работа электрической машины переменного тока в основном определяется формой кривой распределения магнитного поля по окружности ее воздушного зазора. Последний находится в глубокой зависимости от степени насыщения стальных участков магнитной цепи машины [1]. В работах [2,3] в той или иной мере рассмотрены вопросы учета насыщения при расчете дифференциального рассеяния машин переменного тока. В [2] отмечается, что при определении влияния конечной магнитной проницаемости на дифференциальные рассеяния необходимо иметь в виду то обстоятельство, что потоки высших гармоник замыкаются по более коротким путям, чем поток основной гармоники или потоки 5-й и 7-й гармоник, а потоки более высших гармоник замыкаются главным образом прямо по коронкам зубцов и поэтому влияние конечной магнитной проницаемости стали на высшие гармонические поля воздушного зазора будет малым. Далее в [4] рассматривается возрастание коэффициента дифференциального рассеяния обмотки по отношению к полю рабочей гармоники машины из-за уменьшения индуктивности обмотки, соответствующей первой гармоники поля, т.к. поток рабочей гармоники замыкается по зубцам и спинкам статора и ротора машины. В [3] отмечается, что реактивное сопротивление в воздушном зазоре машин переменного тока и особенно у асинхронных машин, зависит от насыщения стальных участков магнитопровода машины, однако эта зависимость имеет весьма сложный характер и до сих пор еще достаточно не изучена. Отмечается также, что уменьшение высших гармонических из-за насыщения зубцов расчету не поддается. Далее в [3] рассмотрены вопросы снижения реактивных сопротивлений рассеяния асинхронных двигателей при прямом включении, на сеть когда токи достигают 4-6 кратной величины по отношению номинальному току машины. Однако в работах [2,3] недостаточно внимания уделялось исследованию влияния насыщения стальных участков магнитопровода на отдельные гармонические составляющие поля в воздушном зазоре машины.

## 2. Методы и материалы (Methods and materials)

Исследование влияния конечных величин магнитных проницаемостей стальных участков магнитопровода в статоре и роторе машины на пространственные гармонические ее поля в воздушном зазоре, создаваемой обмоткой статора могут быть проведены с помощью моделей радиальной составляющей поля, описываемых выражениями (1)



$$H_0 = 4w_{kpq} \sum_{n=1}^{\infty} K_n k_{обн} k_{pqn} \sin n \left( \varphi - \frac{2p-1}{p} \frac{\pi}{2} \right), \quad (1)$$

где

$$k_{pqn} = \frac{\sin(-n\pi)}{2p \cos \left( n \frac{\pi}{2p} \right)} \quad (2)$$

для однофазной двухслойной, (3)

$$H_T = 4pw_k q \sum_{n=1}^{\infty} K_n k_{обн} k_{pqn} \left[ \sin n \left( \varphi - \frac{2p-1}{p} \frac{\pi}{2} \right) \sin \left( \omega_1 t + \frac{2\pi}{3} \right) + \right. \\ \left. + \sin \left( \varphi - \frac{2p-1}{p} \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3p} \right) \sin \left( \omega_1 t - \frac{2\pi}{3} \right) + \sin n \left( \varphi - \frac{2p-1}{p} \frac{\pi}{2} - \frac{4\pi}{3p} \right) \sin \omega_1 t \right], \quad (3)$$

где  $\omega_1 = 2\pi f_1$  – угловая частота;  $t$  – время.

для трехфазной двухслойной, (4)

$$H_0 = 2w \sum_{n=1}^{\infty} K_n k_{обн} k_{0qn} \cos n\varphi'. \quad (4)$$

для однослойной однофазной, (5)

$$k_{pqn} = \frac{\sin(-n\pi)}{2p \cos \left( n \frac{\pi}{2p} \right)} \quad (5)$$

для трехфазной однослойной обмоток статора с целым  $q$ , а также по (6)

$$H_0 = 2w_{kp} \sum_{n=1}^{\infty} K_n k_{сл.n} k_{yn} \left[ u_n \cos n \left( \varphi + \frac{\pi}{p} \right) + \vartheta_n \cos n\varphi \right] \quad (6)$$

для однофазной двухслойной и (7)

$$H_T = 2w_{kp} \sum_{n=1}^{\infty} K_n k_{yn} k_{сл.n} k_{оqn} \left\{ \left[ u_n \cos n \left( \varphi + \frac{\pi}{p} \right) + \vartheta_n \cos n\varphi \right] \times \right. \\ \times \sin \left( \omega_1 t + \frac{2\pi}{3} \right) + \left[ u_n \cos n \left( \varphi + \frac{\pi}{p} - \frac{2\pi}{3p} \right) + \vartheta_n \cos n \left( \varphi - \frac{2\pi}{3p} \right) \right] \times \\ \times \sin \left( \omega_1 t - \frac{2\pi}{3} \right) + \left[ u_n \cos n \left( \varphi + \frac{\pi}{p} - \frac{4\pi}{3p} \right) + \vartheta_n \cos n \left( \varphi - \frac{4\pi}{3p} \right) \right] \times \\ \left. \times \sin \omega_1 t \right\}, \quad (7)$$

для трехфазной двухслойной обмоток с дробным  $q$ , при основании дробности равной двум. Подобные модели могут быть составлены для обмоток статора с иными распределениями витков по окружности машины, например подобно выражению (8).

$$H_0 = 2w_k \sum_{n=1}^{\infty} K_n k_{сл.n} k_{yn} \left\{ u_n \left[ \cos n \left( \varphi + \frac{\alpha_z}{p} \right) - \cos n \left( \varphi - \frac{\pi}{p} \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \cos n \left( \varphi - \frac{\alpha_z + 2\pi}{p} \right) \right] - \vartheta_n \left[ \cos n \left( \varphi + \frac{\alpha_z - 6\pi}{2p} \right) - \cos n \left( \varphi - \frac{\alpha_z + 8\pi}{2p} \right) \right] - \right. \\ \left. - u_n \left[ \cos n \left( \varphi + \frac{\alpha_z - 5\pi}{p} \right) - \cos n \left( \varphi - \frac{6\pi}{p} \right) + \cos n \left( \varphi - \frac{\alpha_z + 7\pi}{p} \right) \right] + \right. \\ \left. + \vartheta_n \left[ \cos n \left( \varphi + \frac{\alpha_z - 16\pi}{2p} \right) - \cos n \left( \varphi - \frac{\alpha_z + 18\pi}{2p} \right) \right] \right\}. \quad (8)$$

Эти модели позволяют рассчитывать поле с учетом влияния на его пространственные гармонические составляющие радиальной величины воздушного зазора между сердечниками статора и ротора, числа пазов на полюс и фазу, шага, числа фаз и зон обмотки, ширины шлица паза статора, зубцового шага и конечных величин магнитных проницаемостей ферромагнитных участков статора и ротора машины. В этих моделях принят, что воздушный зазор равномерный, а ток паза статора сосредоточен в тонком слое, расположенным по дуге окружности



гладкой поверхности сердечника статора и шириной, равной ширине открытия паза.

### 3. Результаты и обсуждение (Results and discussion)

Расчетные исследования влияний конечных величин магнитных проницаемостей сердечников статора и ротора на пространственные гармонические поля воздушного зазора, создаваемой обмоткой статора проведем для асинхронной машины типа ДАЗО-14-69-6У1 [5], имеющей двухслойную трехфазную обмотку с  $q=5$  и для асинхронной машины типа МТФ 112-6У2 [7], статор которой имеет двухслойную трехфазную дробную обмотку с  $q=2\frac{1}{2}$ . Расчеты гармонических составляющих проводились на ЭВМ выразив размеры активной зоны машины в относительных единицах и принимая величину радиуса окружности расточки статора  $c=1$ , а эквивалентные магнитные проницаемости сердечников статора  $\mu_1$  и ротора  $\mu_2$  в долях от магнитной проницаемости воздуха  $\mu_0=4\pi\cdot 10^{-7}$  Гн/м. Тогда для машины ДАЗО-14-69-6У1 имеем:  $a=0,698$ ;  $b=0,9953$ ;  $\alpha=0,01765$  рад;  $\alpha_z=0,0698$  рад;  $\beta=0,908$  рад. Число витков и ток катушки приняты равными единице. В этих условиях величины отдельных пространственных гармонических получаются в условных относительных единицах. Величина представляет собой гармоническую составляющую порядка  $n=p$ , т.е. основную гармоническую составляющую поля машины. Результаты расчетов для наиболее сильно выраженных гармонических, создаваемых одной фазной обмоткой на поверхности расточки статора, т.е. при  $p=c$ , приведены на рис.1. Как видно из приведенного рисунка, насыщение магнитной цепи различным образом влияет на различные пространственные гармонические составляющие в воздушном зазоре машины. По величине все гармонические от уменьшения магнитных проницаемостей стальных участков магнитопровода машины уменьшаются. В поле зазора заметно выражены гармонические составляющие, кратные основной, т.е. числу пар полюсов машины в 3-5 раза (т.е.  $n=9;15$ ), а также гармонические составляющие зубцового порядка. Для исследуемой машины порядки основных зубцовых гармонических составляющих имеют величину  $n$  в 29 и 31 раз кратную числу пар полюсов машины. При переходе машины от состояния, при котором относительные значения эквивалентных магнитных проницаемостей ферромагнитных участков магнитопровода машины в статоре и роторе приняты одинаковыми и равными  $\mu=4000$ , к  $\mu=100$  основная гармоническая составляющая ( $n=p$ ) уменьшается в 1,5 раза, а пятикратная в 1,28 раза. При этих условиях зубцовые гармонические уменьшались с порядками  $n=29$  и 31 в 1,05 и 1,048 раза соответственно. Таким образом, по мере увеличения порядка, гармонических составляющих влияние насыщения магнитной цепи, т.е. уменьшения магнитных проницаемостей стальных участков магнитопроводов на статоре и роторе машины на величину поля ослабевает. Относительные величины гармонических составляющих поля с  $n/p=3$  по отношению к основной гармонической составляющей по мере насыщения возросла в 2,27 раза,  $n/p=5$  в 2,68 раза, а основные зубцовые гармонические в 3,23 и 3,24 раза.

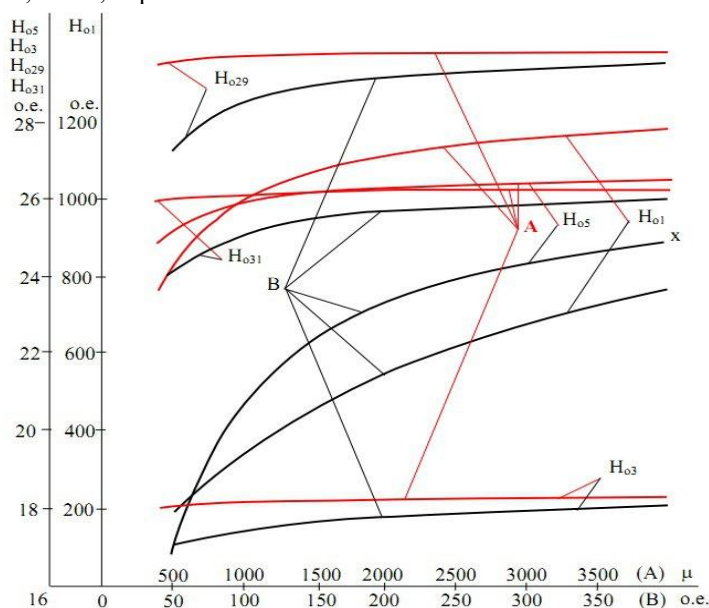


Рис. 1. Кривые сильно выраженных гармонических.

Fig. 1. Curves of strongly expressed harmonics.



Ослабленное влияние насыщения на величины гармонических поля высших порядков можно объяснить следующим образом. Магнитная цепь каждой гармонической составляющей состоит из стальных участков в статоре и роторе машины и воздушного зазора. Насыщение влияет на магнитные сопротивления ферромагнитных участков магнитной цепи каждой пространственной гармонической, длина которых уменьшается по мере увеличения порядка гармонических составляющих, т.к. при этом полюсное деление машины для данной гармонической составляющей и, соответственно, длина стальных участков магнитопроводов уменьшаются. Состояние, при котором  $\mu_1 = 2000$  и  $\mu_2 = 1$ , в основном, соответствует, состоянию машины при вынужтом роторе. При этом особенно сильно выражены гармонические составляющие, порядки которых кратны порядку основной гармонической составляющей в 3 раза, а также зубцовые гармонические [8,9,10,11,12,13,14,29].

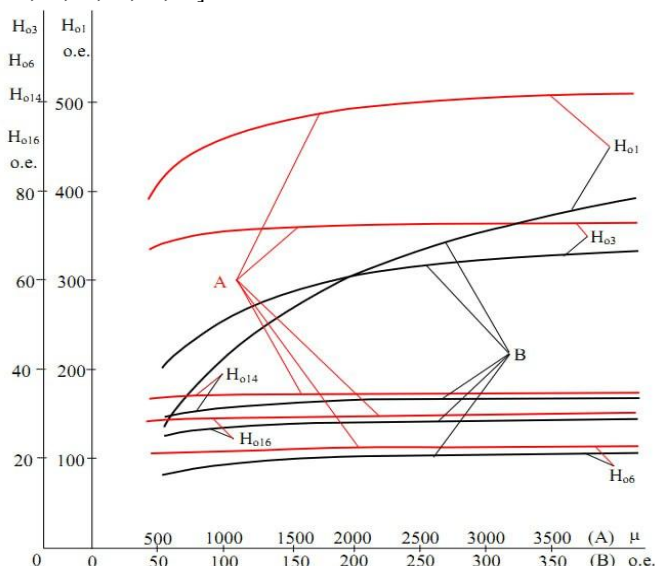


Рис. 2. Расчет составляющих напряженности поля воздушного зазора.

Fig. 2. Calculation of the components of the air gap field strength.

Как было отмечено выше для расчетного исследования влияния конечных величин магнитных проницаемостей ферромагнитных сердечников в магнитопроводах статора и ротора на отдельные гармонические составляющие поля воздушного зазора, создаваемой обмоткой статора с дробным числом пазов на полюс и фазу и при основании дробности равном двум была выбрана асинхронная машина типа МТФ 112-6У2. Расчеты проводим для одной фазы обмотки статора [15,16,17,18,19,20,29].

Данные расчета наиболее сильно выраженных гармонических составляющих напряженности поля воздушного зазора при одновременном изменении магнитных проницаемостей сердечников статора и ротора при ведены на рис. 2. Как видно из приведенного рисунка в кривой поля одной фазы обмотки статора наиболее сильно выражены гармонические составляющие, порядки которых кратны порядку основной гармонической в три раза, четных порядков ( $n/p=2, 6, 12, 14, 16$ ), а также зубцовые гармонические составляющие ( $n/p=29, 31$ ). Результаты расчетов показывают, что в машинах с дробным числом пазов на полюс и фазы, так же как и в машинах с целым значением  $q$  степень уменьшения гармонических составляющих поля воздушного зазора падает по мере увеличения порядка пространственной гармонической составляющей. Расчеты для случая вынужтого ротора, который может быть охарактеризован в основном значениями  $\mu_1=2000$  и  $\mu_2=1$  показали, что при этом наиболее сильно выражены гармонические составляющие четного и зубцового порядков [21,22,23,24,25,26,27,28,29]. Таким образом, как в машинах с целым, так и в машинах с дробным  $q$  высшие гармонические поля воздушного зазора, как четного, так и нечетного порядков от насыщения магнитной цепи, т.е. от уменьшения величин эквивалентных магнитных проницаемостей  $\mu_1$  и  $\mu_2$  уменьшаются в меньшей степени по сравнению с основной гармонической составляющей поля воздушного зазора [6,29].

#### 4. Заключение (Conclusion)

Насыщение стальных участков магнитопровода в статоре и роторе машины переменного тока наиболее сильно влияет на величины низких пространственных гармонических поля воздушного зазора, чем на пространственные гармонические более высоких порядков. Влияния конечных величин магнитных проницаемостей стальных участков магнитопровода машины на последние наблюдается лишь в режимах глубокого насыщения магнитной цепи машины.



Разработаны методы расчёта эквивалентных магнитных проницаемостей ферромагнитных участков магнитопровода в статоре и роторе для каждой из составляющих поля воздушного зазора с учетом магнитного состояния отдельных ее участков в том или ином эксплуатационном режиме работы машины.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Одилов Г., Маркман М.В., Турсунов А.А. Исследование влияния насыщения стали на пространственные гармонические поля якоря машины переменного тока //Вестник ТашГТУ. – 1995. – №1-2. – С. 104 – 109.
2. Геллер Б., Гамата В. Высшие гармоники в асинхронных машинах. – М.: Энергия, 1981. – 352 с.
3. Шуйский В.П. Расчет электрических машин: (Пер. с немец.). –Л.: Энергия, 1968.
4. Бинс К., Лауренсон П. Анализ и расчет электрических и магнитных полей. –М.: Энергия, 1970. –376 с.
5. Одилов Г. Экспериментальное определение индуктивного сопротивления рассеяния по коронкам зубцов якоря синхронной машины //Матер. Респ. н.т. конф. молодых учёных и специалистов, посвященной 50-летию ТашПИ, ч.П. – Ташкент, 1980. – С.26.
6. Fuchs E.F. Last abhängigget ransiente Reaktanzen von gesättigten Turbogeneratoren. «Arch. Electrotechn.» (W. – Berlin), 1973, 55, №5, p. 263 – 273.
7. Одилов Г. ЭДС наводимый в роторе восстанавливающимися гармоническими поля статора машины переменного тока //Межвуз. сб. науч. тр. «Актуальные вопросы в обл. техн. и фонд. наук», ТашГТУ, Ташкент, 2001. – Вып. 1. – С. 16 – 20.
8. И. П. Копылов. Электрические машины, 2-е изд., перераб. и доп. — Москва: Издательство «Юрайт», 2012. — 675 с. — ISBN 978-5-9916-1501-3  
[ru.wikipedia.org+5urait.ru+5ru.scribd.com+5](http://ru.wikipedia.org+5urait.ru+5ru.scribd.com+5)
9. Б. Геллер, В. Гамата. Высшие гармоники в асинхронных машинах — М.: Энергия, 1981. — 352 с.
10. Н. В. Астахов, В. С. Малышев, В. Т. Медведев и др.Расчёт магнитных вибраций асинхронных двигателей — М.: МЭИ, 1985. — 96 с.
11. И. Г. Шубов. Шум и вибрация электрических машин — Л.: Энергия, 1973. — 200 с
12. Иванов-Смоленский А. В.Электрические машины: Учебник для вузов: в 2 т. Том 2. 3-е изд., перераб. и доп.— М.: Изд-во МЭИ, 2006. — 531 с. — ISBN 5-903072-67-4.
13. Шерназаров С. Э., Якубова Д. К. Диагностика асинхронных электродвигателей на основе анализа параметров внешнего магнитного поля.— Ташкент: ТашГТУ, 2019. — 24 с.
14. А. И. Вольдек. Электрические машины. Учебник для вузов и техникумов.— М.: Энергоатомиздат.2006. — 350 с.
15. Xu X., Han Q., Chu F. “Review of Electromagnetic Vibration in Electrical Machines.” *Energies*, Vol. 11, Issue 7, Article 1779, 16 страниц, изд. MDPI, 2018.
16. Wu Z., Zuo S., Hu S., Hu X. “Analytical modelling of air-gap magnetic field of interior permanent magnet synchronous motors.” *IET Electric Power Applications*, Vol. 14, Issue 11, pp. 2101–2110, изд. The Institution of Engineering and Technology (IET), ноябрь 2020.
17. Mezani S., Laporte B., Takorabet N. “Saturation and space harmonics in the complex finite element computation of induction motors.” — *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 41, No. 5 (Sept. 2005), pp. 1460–1463. — ООО “IEEE”. [scielo.br+3](http://scielo.br+3)
18. Ouazir Y., Ibtouen R., Takorabet N., Touhami O., Mezani S. “Phase-belt harmonics in complex finite-element analysis of induction motors with an air-gap interface coupling.”— *IEE Proceedings – Electric Power Applications*, Vol. 153, Issue 4 (July 2006), pp. 343–348. — The Institution of Engineering and Technology.
19. Demenko A. “Finite element analysis of electromagnetic torque saturation harmonics in a squirrel cage machine.”— *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 18, No. 4 (1999), pp. 619–628. — *MCB UP Ltd*.
20. Masotti M. et al. “A complete and fast analysis procedure for three-phase induction motors using finite element, considering skewing and iron losses.” — *Applied Sciences*, Vol. 11, No. 5 (2021), article 2428, 17 pp. — *MDPI*.
21. Rosu M., Zhou P., Lin D., Ionel D.M. et al. “Accounting for slot harmonics and nonsinusoidal unbalanced voltage supply in high-speed solid-rotor induction motor using complex multi-harmonic finite element analysis.”— *Energies*, Vol. 14, No. 17 (2021), art. 5404, 25 pp. — *MDPI*.
22. Yi F. et al. “Research on PMSM harmonic coupling models based on magnetic co-energy.”— *IET Electric Power Applications*, Vol. 13, No. 6 (2019), pp. 927–935. — *IE*.
23. Пашали Д. Ю. Диагностика электромеханических преобразователей по внешнему магнитному полю.— Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук. Уфа: УГАТУ, 2004. — 320 с.



24. Гетьман А. Б. Определение пространственных гармоник магнитного поля вблизи поверхности технического объекта. — *Электричество*, № 1, 2005. — с. 55–60.
25. Розов В. Ю. Методы снижения внешних магнитных полей энергонасыщенных объектов. — *Техническая электродинамика*, 2001, № 1. — с. 16–20.
26. Пилюгина О. Ю. Повышение эффективности снижения внешних магнитных полей электрических машин переменного тока. — Кандидатская диссертация. Харьков, 2001. — 149 с.
27. Жумагулов К. К. Универсальная модель электрической машины для расчёта внешнего магнитного поля. — *Труды КарГТУ*, 2000, № 2. — с. 73–74.
28. Сотников В. В. Внешнее магнитное поле гармонического тока, распределённого по поверхности кругового кольца. — *Техническая электродинамика*, 2000, № 2, с. 20–25.
29. Одиллов, Гапур. Исследование параметров распространения электромагнитного поля и обмоток машин: 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М.: [б.и.], 2004. – 32 с.

## REFERENCES

1. Odilov G., Markman M.V., Tursunov A.A. Study of the influence of steel saturation on the spatial harmonic fields of the armature of an ac machine. *Bulletin of Tashkent State Technical University*, 1995, No. 1–2, pp. 104–109.
2. Geller B., Gamata V. Higher harmonics in asynchronous machines. – М.: Energiya, 1981. – 352 pages.
3. Shuysky V.P. Calculation of electrical machines (Translated from German) Leningrad: Energiya, 1968.
4. Binns K., Laursen P. Analysis and calculation of electric and magnetic fields. – М.: Energiya, 1970. – 376 p.
5. Odilov G. Experimental determination of the leakage reactance along the armature tooth tips of a synchronous machine. Proceedings of the Republican Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists Dedicated to the 50th Anniversary of TashPI, Part II. – Tashkent, 1980. – p. 26.
6. Fuchs E.F. Last abhängigget ransiente Reaktanzen von gesättigten Turbogeneratoren. «Arch. Electrotechn.» (W. – Berlin), 1973, 55, №5, p. 263 – 273.
7. Odilov G. EMF induced in the rotor by the reestablishing harmonic fields of the stator of an ac machine. Interuniversity Collection of Scientific Works "Topical Issues in the Field of Technical and Fundamental Sciences", TashSTU, Tashkent, 2001, Issue 1, pp. 16–20.
8. Kopylov I.P. Electrical machines. 2nd ed., revised and expanded. — М.: Yurayt Publishing, 2012. — 675 pages. — ISBN 978-5-9916-1501-3. [ru.wikipedia.org+5urait.ru+5ru.scribd.com+5](http://ru.wikipedia.org+5urait.ru+5ru.scribd.com+5)
9. B. Geller, V. Gamata higher harmonics in asynchronous machines — М.: Energiya, 1981. — 352 p.
10. N.V. Astakhov, V.S. Malyshev, V.T. Medvedev et al. Calculation of magnetic vibrations in asynchronous motors — М.: MPEI, 1985. — 96 p.
11. I.G. Shubov. Noise and vibration of electrical machines — L.: Energiya, 1973. — 200 pages.
12. Ivanov-Smolyensky A.V. Electrical machines: textbook for universities. In 2 Volumes. Volume 2, 3rd ed., revised and expanded — М.: MPEI Publishing, 2006. — 531 p. — ISBN 5-903072-67-4.
13. Shernazarov S.E., Yakubova D.K. Diagnostics of asynchronous electric motors based on the analysis of external magnetic field parameters — Т.: TashSTU, 2019. — 24 p.
14. A.I. Voldek Electrical machines: Textbook for Universities and Technical Colleges — М.: Ergoatomizdat, 2006. — 350 p.
15. Xu X., Han Q., Chu F. “Review of Electromagnetic Vibration in Electrical Machines.” *Energies*, Vol. 11, Issue 7, Article 1779, 16 страниц, изд. MDPI, 2018.
16. Wu Z., Zuo S., Hu S., Hu X. “Analytical modelling of air-gap magnetic field of interior permanent magnet synchronous motors.” *IET Electric Power Applications*, Vol. 14, Issue 11, pp. 2101–2110, изд. The Institution of Engineering and Technology (IET), ноябр 2020.
17. Mezani S., Laporte B., Takorabet N. “Saturation and space harmonics in the complex finite element computation of induction motors.” — *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 41, No. 5 (Sept. 2005), pp. 1460–1463. — ООО “IEEE”. [scielo.br+3](http://scielo.br+3)
18. Ouazir Y., Ibtouen R., Takorabet N., Touhami O., Mezani S. “Phase-belt harmonics in complex finite-element analysis of induction motors with an air-gap interface coupling.” — *IEE Proceedings – Electric Power Applications*, Vol. 153, Issue 4 (July 2006), pp. 343–348. — The Institution of Engineering and Technology.
19. Demenko A. “Finite element analysis of electromagnetic torque saturation harmonics in a squirrel cage machine.” — *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 18, No. 4 (1999), pp. 619–628. — MCB UP Ltd.



20. Masotti M. et al. "A complete and fast analysis procedure for three-phase induction motors using finite element, considering skewing and iron losses." — *Applied Sciences*, Vol. 11, No. 5 (2021), article 2428, 17 pp. — MDPI.
21. Rosu M., Zhou P., Lin D., Ionel D.M. et al. "Accounting for slot harmonics and nonsinusoidal unbalanced voltage supply in high-speed solid-rotor induction motor using complex multi-harmonic finite element analysis."— *Energies*, Vol. 14, No. 17 (2021), art. 5404, 25 pp. — MDPI.
22. Yi F. et al. "Research on PMSM harmonic coupling models based on magnetic co-energy."— *IET Electric Power Applications*, Vol. 13, No. 6 (2019), pp. 927–935. — IE.
23. Pashali D.Yu. Diagnostics of electromechanical transformers and external magnetic fields.— Abstract dissertation of the candidate of technical science. Ufa: UGATU, 2004. — 320 p.
24. Getman A.B. Determination of spatial harmonics of the magnetic field near the surface of a technical object. — *Electricity*, No. 1, 2005. — pp. 55–60.
25. Rozov V.Yu. Methods of reducing external magnetic fields of energy-saturated objects. - *Technical Electrodynamics*, 2001, No. 1. - pp. 16-20.
26. Pilyugina O.Yu. Increasing the efficiency of reducing external magnetic fields of alternating current electric machines. - Candidate's dissertation. Kharkov, 2001. - 149 p.
27. Zhumagulov K.K. Universal model of an electric machine for calculating the external magnetic field. - *Proceedings of KarSTU*, 2000, No. 2. - pp. 73-74.
28. Sotnikov V.V. External magnetic field of harmonic current distributed over the surface of a circular ring. - *Technical Electrodynamics*, 2000, No. 2, pp. 20-25.
29. Odilov, Gapur. Research parameters of electromagnetic field and machine windings propagation: 05.09.01 – Electromechanics and electrical devices. Autoref. dis. ... Dr. tech. science - Moscow: [b.i.], 2004. - 32 p.