

Список литературы

1. *Hunt B.R.* A guide to Matlab for beginners and experienced users [Text]/ Brian R. Hunt, Ronald L. Lipsman, Jonathan M. Rosenberg. – Cambridge: Cambridge University Press, 2006. – 311c.
2. *Deepthi P.* Adjustable speed system of induction motor using vector controlled [Text]/ P.Deepthi, Mrs. S.M. Padmaja // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). – 2012. – Vol. 1. – Issue 6.
3. *Денисов В.А.* Управление линейным электроприводом малых перемещений [Текст]/ В.А. Денисов, А.В. Бочкарев // Электротехника. – 2011. – №2. – С. 16-19.
4. *Денисов В.А.* Математическое моделирование работы шагового двигателя в составе мехатронного модуля компенсации износа режущего инструмента [Текст]/ В.А. Денисов, А.В. Жуков // Известия Самарского научного центра РАН. – 2012. – том 14. – №6. – С. 54-58.
5. *Цодик И.А.* Учет эффекта вытеснения тока и насыщения в магнитной цепи в математической модели асинхронного двигателя [Текст]/ И.А. Цодик, К.В. Худобин // Электротехника и электромеханика. – 2014. – №2. – С. 56-59.
6. *Виноградов А.Б.* Учет потерь и насыщения стали при оптимальном векторном управлении тяговым асинхронным электроприводом [Текст]/ А.Б. Виноградов, Н.Е. Гнездов, Н.А. Глебов, С.В. Журавлев // Вестник ИГЭУ. – 2012. – №1 – С. 1-7.
7. *Александров Е.В.* Математическое описание асинхронного электродвигателя с учетом потерь в стали, поверхностного эффекта, насыщения магнитной системы основным потоком и потоками рассеяния [Текст]/ Е.В. Александров // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2010. – №2. – Ч.2. – С. 243-250.
8. *Копылов, И.П.* Математическое моделирование электрических машин [Текст]/ И.П. Копылов. – Москва: Высш. шк., 2001. – 326 с.
9. *Беспалов В.Я.* Электрические машины [Текст]/ В.Я. Беспалов, Н.Ф. Котеленец. – М.: Академия, 2010. – 320 с.

References

1. *Hunt B.R.* A guide to Matlab for beginners and experienced users [Text]/ Brian R. Hunt, Ronald L. Lipsman, Jonathan M. Rosenberg. – Cambridge: Cambridge University Press, 2006. – 311 p.
2. *Deepthi P.* Adjustable speed system of induction motor using vector controlled [Text]/ P.Deepthi, Mrs. S.M. Padmaja // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). – 2012. – Vol. 1. – Issue 6.
3. *Denisov V.A.* Upravlenie linejnym jelektroprivodom malyh peremeshhenij [Tekst]/ V.A. Denisov, A.V. Bochkarev // Jelektrotehnika. – 2011. – №2. – p. 16-19.
4. *Denisov V.A.* Matematicheskoe modelirovanie raboty shagovogo dvigatelja v sostave mehatronnogo modulja kompensacii iznosa rezhushhego instrumenta [Tekst]/ V.A. Denisov, A.V. Zhukov // Izvestija Samarskogo nauchnogo centra RAN. – 2012. – tom 14. – №6. – p. 54-58.
5. *Codik I.A.* Uchet jeffekta vytesnenija toka i nasyshhenija v magnitnoj cepi v matematicheskoj modeli asinhronnogo dvigatelja [Tekst]/ I.A. Codik, K.V. Hudobin // Jelektrotehnika i jelektromehaniка. – 2014. – №2. – p. 56-59.
6. *Vinogradov A.B.* Uchet poter' i nasyshhenija stali pri optimal'nom vektornom upravlenii tjagovym asinhronnym jelektroprivodom [Tekst]/ A.B. Vinogradov, N.E. Gnezdov, N.A. Glebov, S.V. Zhuravlev // Vestnik IGJeU. – 2012. – №1 – p. 1-7.
7. *Aleksandrov E.V.* Matematicheskoe opisanie asinhronnogo jelektrodvigatelja s uchetom poter' v stali, poverhnostnogo jeffekta, nasyshhenija magnitnoj sistemy osnovnym potokom i potokami rassejanija [Tekst]/ E.V. Aleksandrov // Izvestija TulGU. Tehnicheskie nauki. – 2010. – №2. – Ch.2. – p. 243-250.
8. *Kopylov I.P.* Matematicheskoe modelirovanie jelektricheskikh mashin [Tekst]/ I.P. Kopylov. – Moskva: Vyssh. shk., 2001. – 326 p.
9. *Bespalov V.Ja.* Jelektricheskije mashiny [Tekst]/ V.Ja. Bespalov, N.F. Kotelenec. – M.: Akademija, 2010. – 320 p.



Вавилов В.Е.
Vavilov V.E.

кандидат технических наук,
доцент кафедры «Электромеханика»,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
авиационный технический университет»,
Россия, г. Уфа



Саяхов И.Ф.
Sayakhov I.F.

магистрант 2 курса кафедры
«Электромеханика», ФГБОУ ВО
«Уфимский государственный
авиационный технический университет»,
Россия, г. Уфа

УДК 621.9.01

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ РЕАКЦИИ РОТОРА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Представлены результаты исследования напряженности магнитного поля реакции короткозамкнутой обмотки ротора асинхронных электродвигателей, с целью определения его влияния на первичное магнитное поле статора в воздушном зазоре. Известно, что результирующее магнитное поле машины формируется совместным действием обмотки статора и обмотки ротора. При этом обмотка ротора, согласно закону электромагнитной индукции, своим магнитным потоком воздействует на первичный магнитный поток статора, что представляет собой реакцию короткозамкнутого ротора. Для исследования влияния реакции ротора, было произведено компьютерное моделирование и математический расчет напряженности магнитного поля короткозамкнутой обмотки ротора. Компьютерное моделирование проводилось численными методами в программном комплексе *Ansoft Maxwell* для двух типов трехфазных асинхронных электродвигателей различной мощности и частоты вращения. По результатам компьютерного моделирования были получены картины распределения индукции магнитного поля в исследуемых асинхронных электродвигателях, а также кривые напряженности вдоль линии, расположенной под зубцами фазы статора. Из сопоставления результатов численного моделирования было получено, что без реакции ротора магнитное поле в воздушном зазоре исследуемого электродвигателя имело несколько большее значение, чем с учетом реакции ротора. Из полученных при компьютерном моделировании параметров исследуемых электродвигателей были произведены математические расчеты напряженности магнитного поля короткозамкнутой обмотки ротора на одном полюсном делении с использованием программы *Mathcad*. Из произведенных расчетов было получено, что напряженность магнитного поля короткозамкнутой обмотки ротора в воздушном зазоре асинхронного электродвигателя вычитается из первичного магнитного поля в воздушном зазоре статора, а также содержит гармоники зубцового порядка. Произведено сопоставление результатов компьютерного моделирования и математического расчета напряженности магнитного поля короткозамкнутой обмотки ротора, в ходе которого выявлено, что расхождение результатов численного моделирования и расчета составляет порядка 10÷15%.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, напряженность магнитного поля в зазоре, реакция короткозамкнутого ротора, компьютерное моделирование.

STUDY OF MAGNETIC FIELD RESPONSE ROTOR ASYNCHRONOUS MOTOR

The results of the study of the magnetic field of the rotor winding short-circuited induction motors, in order to determine its impact on the primary magnetic field of the stator in the air gap. It is known that the resulting magnetic field of the machine is formed by the combined action of the stator winding and rotor winding. Thus, the rotor winding, according to the law of electromagnetic induction, its flux acts on the primary magnetic flux of the stator, which is a reaction short-circuited rotor. To study the effect of the reaction rotor produced computer simulations and mathematical calculation of the magnetic field of the rotor winding short-circuited. Computer modeling was performed by numerical methods in the software package Ansoft Maxwell for two types of three-phase induction motors of different power and speed. According to the results of computer simulation were obtained distribution pattern of the magnetic field in the study of asynchronous electric motors, and the curves of tension along the line beneath the teeth of the stator phase. By comparing the results of numerical simulations it was found that without the reaction of the rotor magnetic field in the air gap of the test motor was slightly greater value than taking into account the reaction of the rotor. From obtained by computer simulation of the parameters studied motors were produced mathematical calculations of the magnetic field of the rotor winding short-circuited at one pole pitch with the program Mathcad. From the calculations made it was found that the magnetic field of the rotor winding short-circuited in the air gap induction motor is subtracted from the initial magnetic field in the air gap of the stator and contains a toothed harmonic order. Produced by comparing the results of computer simulation and mathematical calculation of the magnetic field of a short-circuited rotor winding, during which revealed that the discrepancy between the results of numerical simulation and calculation of the order of 10÷15%.

Keywords: induction motor, the magnetic field in the gap, the reaction is short-circuited rotor, computer simulation. В настоящее время концентраторы магнитного поля используются в области физики, в частности в устройствах повышения магнитной индукции и напряженности внешнего магнитного поля, для повышения октанового числа нефтепродуктов, улучшения качества нефти, экологической очистки и консервации продуктов питания, повышения качества табачных изделий, экологической очистки окружающей среды [2].

Введение.

Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором являются одними из самых распространенных видов электрических машин. Ввиду простоты конструкции, надежности и высоким энергетическим показателям асинхронные двигатели нашли широкое применение в самых различных отраслях. Поэтому вопросы изучения основных параметров асинхронных электродвигателей являются наиболее важными.

Реакция короткозамкнутого ротора в воздушном зазоре асинхронных электродвигателей оказывает большое влияние на протекание электро-механических процессов. Известно что, электромагнитный момент в асинхронном электродвигателе создается при взаимодействии короткозамкнутой обмотки ротора с первичным магнитным полем статора. Однако, результирующее магнитное поле машины формируется совместным действием обмотки статора и обмотки ротора. При этом обмотка ротора, согласно закону элек-

тромагнитной индукции, своим магнитным потоком воздействует на первичный магнитный поток статора. Такое взаимодействие называют реакцией ротора.

Реакция ротора может быть использована в практических целях, так как находит применение в изобретениях [5], в технической литературе [3, 4] приведены результаты анализа намагничивающей силы беличьей клетки, но наиболее подробно реакция короткозамкнутой обмотки ротора приведена в монографии [1].

Постановка задачи. Исследовать численными методами влияние магнитного поля ротора на магнитное поле статора в асинхронном электродвигателе и сопоставить эти результаты с математическим расчетом напряженности магнитного поля короткозамкнутой обмотки ротора, выполненной в виде беличьей клетки, приведенным в [1].

Объект исследования. Объектами исследования в работе являются трехфазные асинхронные электродвигатели: мощностью 7,5 кВт с синхронной

частотой вращения 1500 об/мин и мощностью 4 кВт с синхронной частотой вращения 3000 об/мин без нагрузки на валу.

Схематическое изображение исследуемых двигателей представлено на рис.1 (а, б).

Геометрические размеры и параметры исследуемых асинхронных электродвигателей представлены в таблице 1 [2].

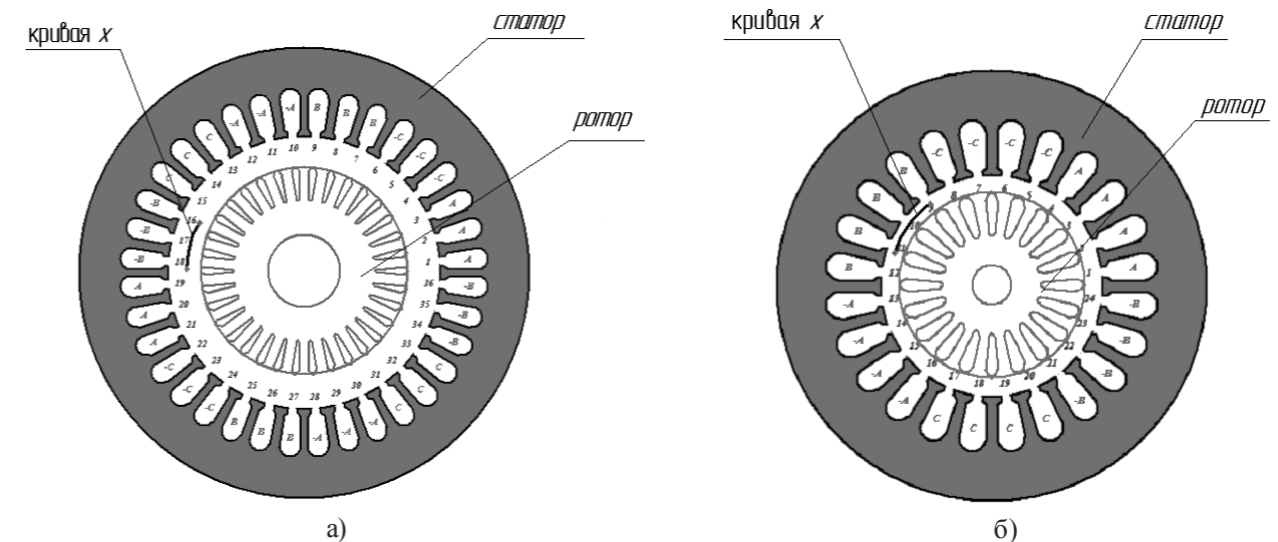


Рис. 1. Схематичное изображение а) АД №1, б) АД №2.

Все исследования магнитного поля в воздушном зазоре АД производились вдоль кривой x (27 мм), расположенной под пазами, в которых размещены обмотки фазы В.

Решение поставленных задач. На основании геометрических данных и параметров (таблица 1) в программном комплексе Ansoft Maxwell была разработана конечно-элементная модель асинхронного электродвигателя, на которой численными методами было исследовано влияние магнитного поля ротора на магнитное поле статора;

Методика решения поставленной задачи представляется в общем виде:

- по данным таблицы 1 в программном комплексе Ansoft Maxwell формируется 2D конечно-элементная модель асинхронного электродвигателя и производится моделирование процессов в динамике. В результате определяются мгновенные значения плотностей токов в обмотках статора и стержнях ротора при определенном угловом положении ротора относительно статора (тип анализа в Ansoft Maxwell – Transient);

- определяется магнитное поле в зазоре асинхронного электродвигателя при отсутствии магнитного поля реакции ротора. По полученным результатам моделирования в динамике, строится конечно-элементная модель асинхронного электродвигателя при этом в стержнях ротора задаются

нулевые значения плотностей токов и производится компьютерное моделирование при неподвижном роторе, (тип анализа в Ansoft Maxwell – Magneto-static);

- определяется магнитное поле в зазоре асинхронного электродвигателя с учетом магнитного поля реакции ротора. На построенной для предыдущего анализа конечно-элементной модели асинхронного электродвигателя в обмотках статора и стержнях ротора задаются мгновенные значения плотностей токов, соответствующие результатам динамического анализа и производится компьютерное моделирование при неподвижном роторе (тип анализа в Ansoft Maxwell – Magnetostatic);

- в результате моделирования, при неподвижном роторе и ненулевых мгновенных значениях плотностей тока в обмотках статора и нулевых мгновенных значениях плотностей тока в стержнях ротора, а также при неподвижном роторе и ненулевых плотностях тока в обмотках статора и стержнях ротора определяются картины магнитного поля в воздушном зазоре асинхронного электродвигателя, которые демонстрируют влияние магнитного поля реакция ротора на первичное поле статора.

На рис.2, рис.3 представлены картины магнитного поля асинхронного электродвигателя без реакции ротора и при учете реакции ротора, причем темные участки указывают на более низкие значения магнитной индукции.

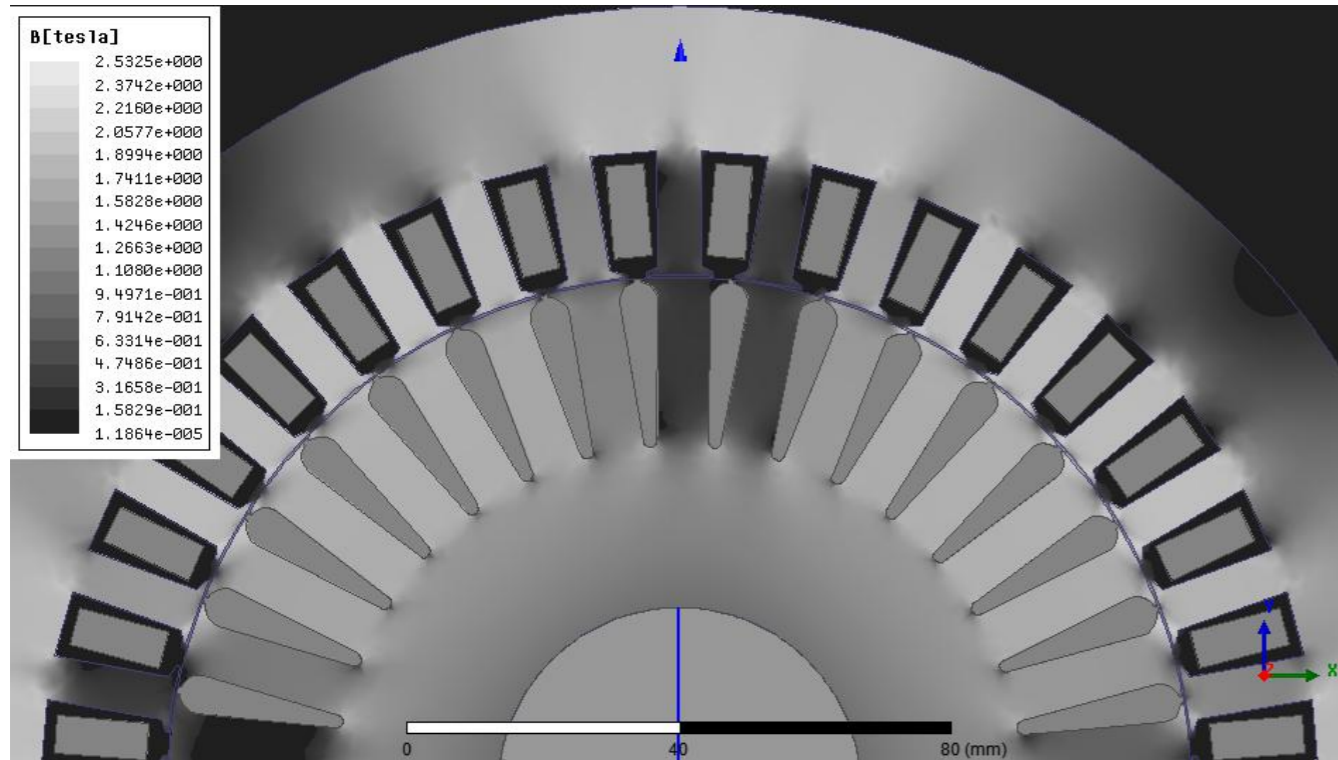


Рис. 2. Картина индукции магнитного поля в АД №1 без реакции ротора

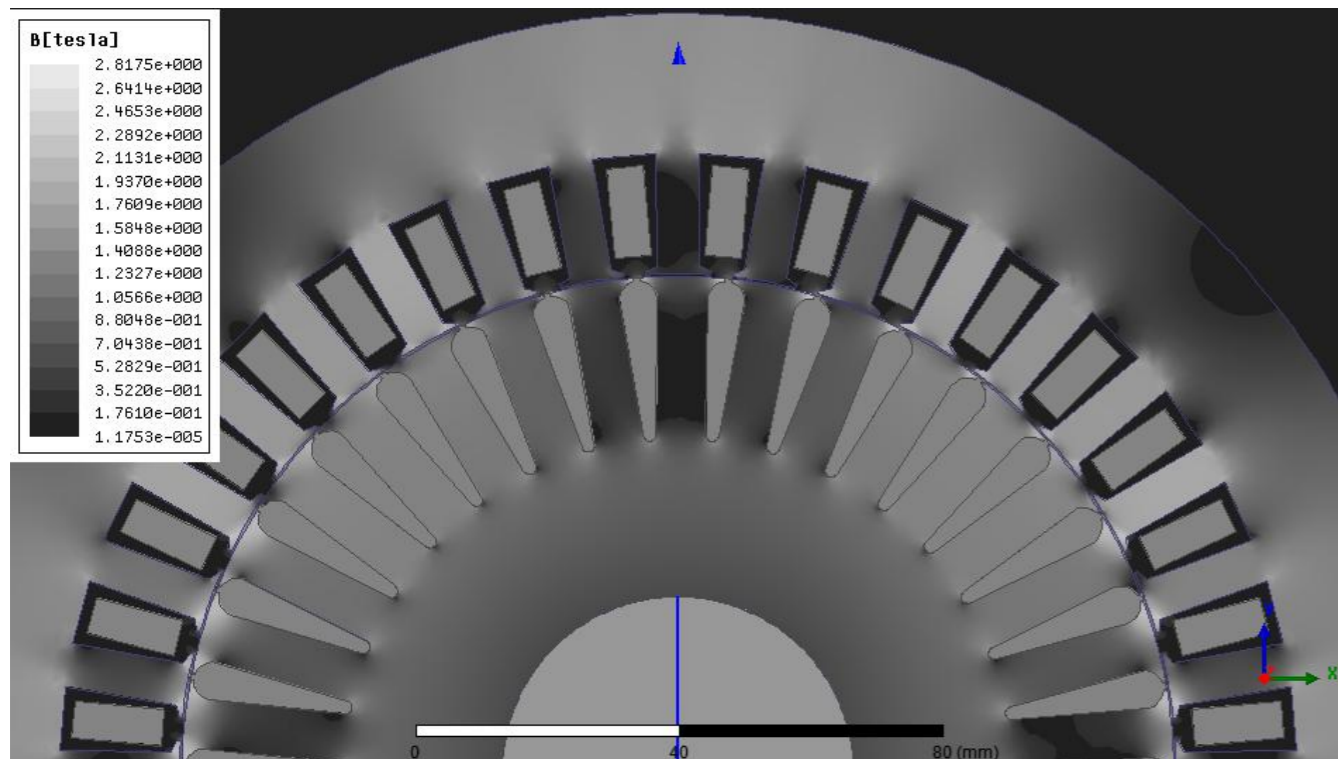


Рис. 3. Картина индукции магнитного поля в АД №1 при учете реакции ротора

Из сопоставления рис.2 и рис.3 видно, что без реакции ротора магнитное поле в исследуемом электродвигателе имело несколько большее значение, чем при учете реакции ротора. Это хорошо заметно на рис.4 и рис.5 в которых приведены кривые напряженности магнитного поля в воздушном зазоре

асинхронного электродвигателя без учета реакции ротора и с учетом реакции ротора по кривой x (для наглядности представления результатов кривая x охватывает два зубца статора).

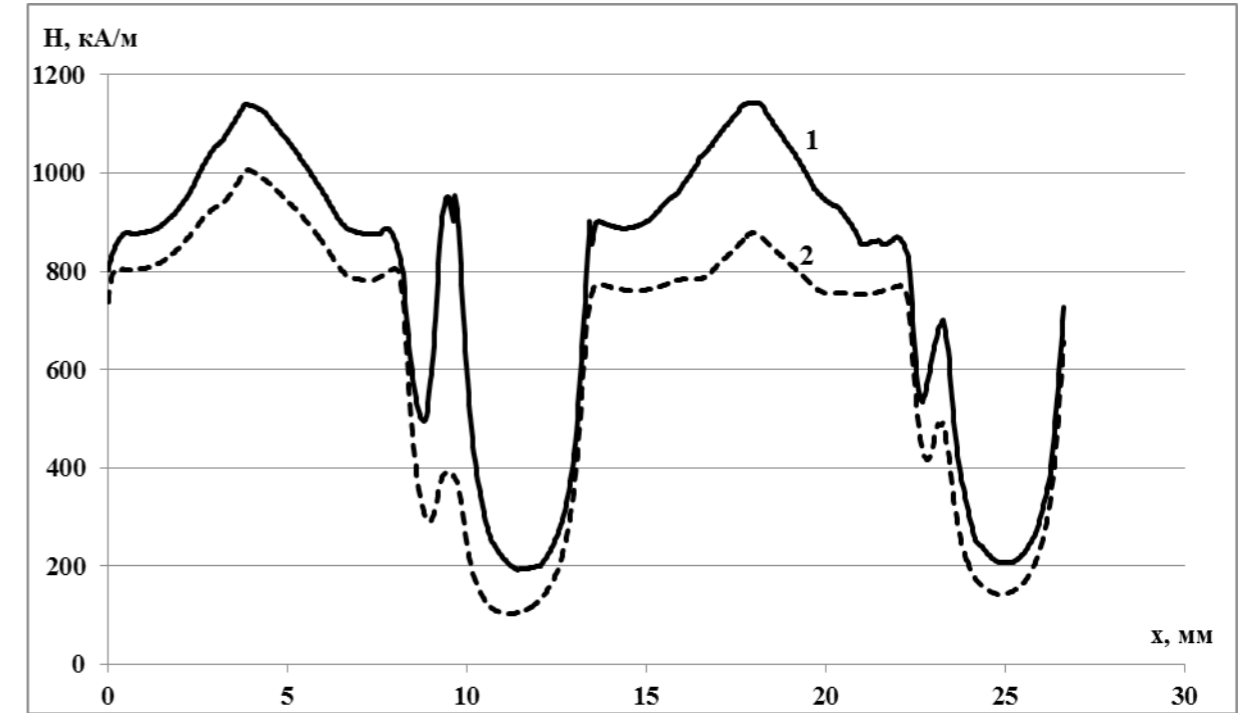


Рис. 4 Кривая напряженности магнитного поля в воздушном зазоре вдоль кривой x АД №1

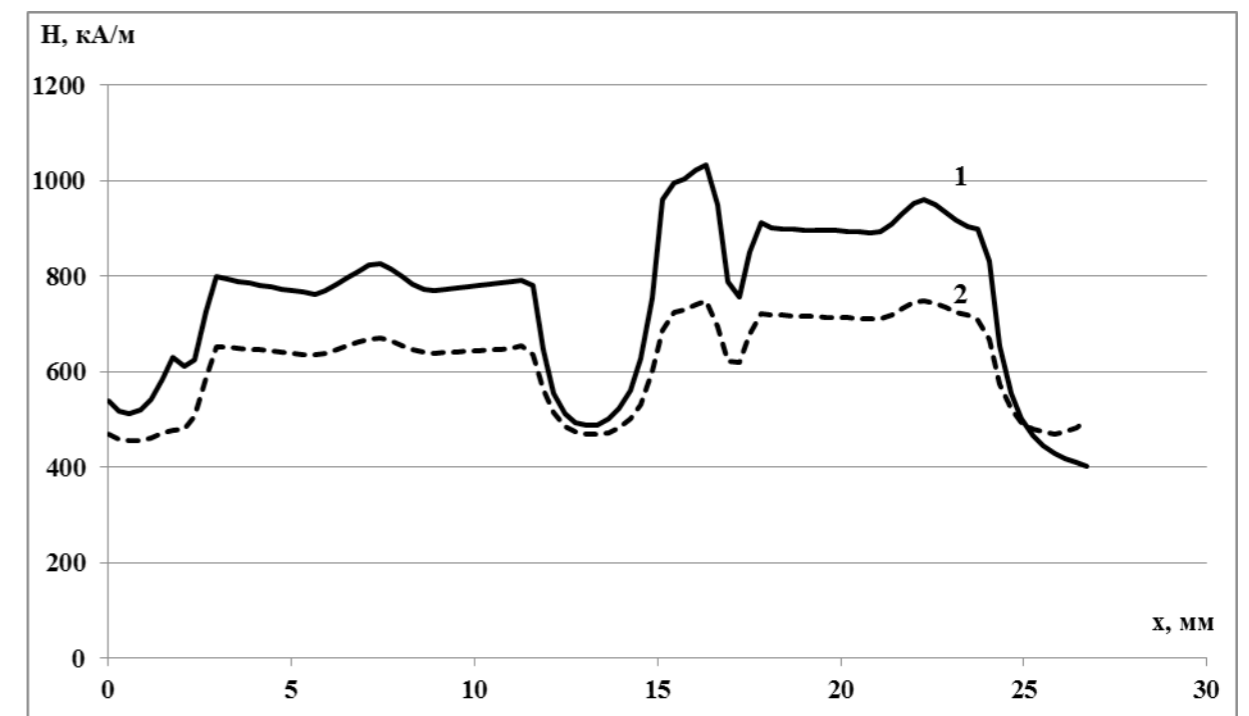


Рис. 5 Кривая напряженности магнитного поля в воздушном зазоре вдоль кривой x для АД №2

На рис. 4, 5 кривая 1 – напряженность магнитного поля в зазоре без учета магнитного поля реакции ротора, 2 – напряженность магнитного поля в зазоре с учетом магнитного поля реакции ротора. Из анализа кривых видно, что приближительное значение «проседания» магнитного поля

из-за наличия реакции ротора в воздушном зазоре составляет около 100 кА/м.

Из полученных при компьютерном моделировании значений углового положения ротора, а также силы тока в кольце короткозамкнутой обмотки ротора, производится математический расчет

напряженности магнитного поля короткозамкнутой обмотки ротора.

Вращающееся магнитное поле статора индуцирует в стержнях беличьей клетки систему токов, которые сдвинуты по фазе подобно токам фазных зон многофазной обмотки. Эти токи создают бесконечный ряд прямо и обратно вращающихся гармоник (2). Из данного выражения следует, что все гармо-

ники магнитного поля беличьей клетки являются гармониками зубцового порядка, где величина Z_2/p определяет количество стержней на пару полюсов и при достаточно большом его значении магнитное поле беличьей клетки близко к синусоиде, так как содержит мало гармоник низких порядков [3].

Выражение напряженности магнитного поля для короткозамкнутой обмотки имеет вид [1]:

$$H(\alpha, t) = \frac{Z_2 \sqrt{2} I}{p \pi \delta} \sum_{v=1}^{\infty} \frac{1}{v} \sin\left(v \frac{\pi}{2}\right) \cdot \sin(\omega t - v\alpha); \quad (1)$$

Справедливое для гармоник удовлетворяющих условию:

$$v = c \cdot \frac{Z_2}{p} \pm 1; \text{ где } c=0, 1, 2, 3 \dots \quad (2)$$

где Z_2 – число пазов ротора; I – ток в кольце, замыкающем стержни накоротко для АД №1: $I = 242$ А, для АД №2 $I = 134,2$ А (тип анализа в *Ansoft Maxwell – Rmxprt*); p – число пар полюсов; δ – величина воздушного зазора; v – номер гармоники; ω – радиальная частота вращения магнитного поля.

Расчет напряженности магнитного поля производился в функции угла α и для момента времени $t=const$, полученному при моделировании в динамике.

Графически напряженность магнитного поля ротора при изменении угла α от 0 до 180 электри-

ческих градусов представлена на рис.6 и рис.7. Из представленных рисунков видно, что напряженность магнитного поля короткозамкнутой обмотки ротора в воздушном зазоре асинхронного электродвигателя отрицательна, а также содержит гармоники зубцового порядка. Поэтому результирующая напряженность магнитного поля в воздушном зазоре асинхронного электродвигателя будет определяться разностью первичного магнитного поля статора и магнитного поля реакции ротора.

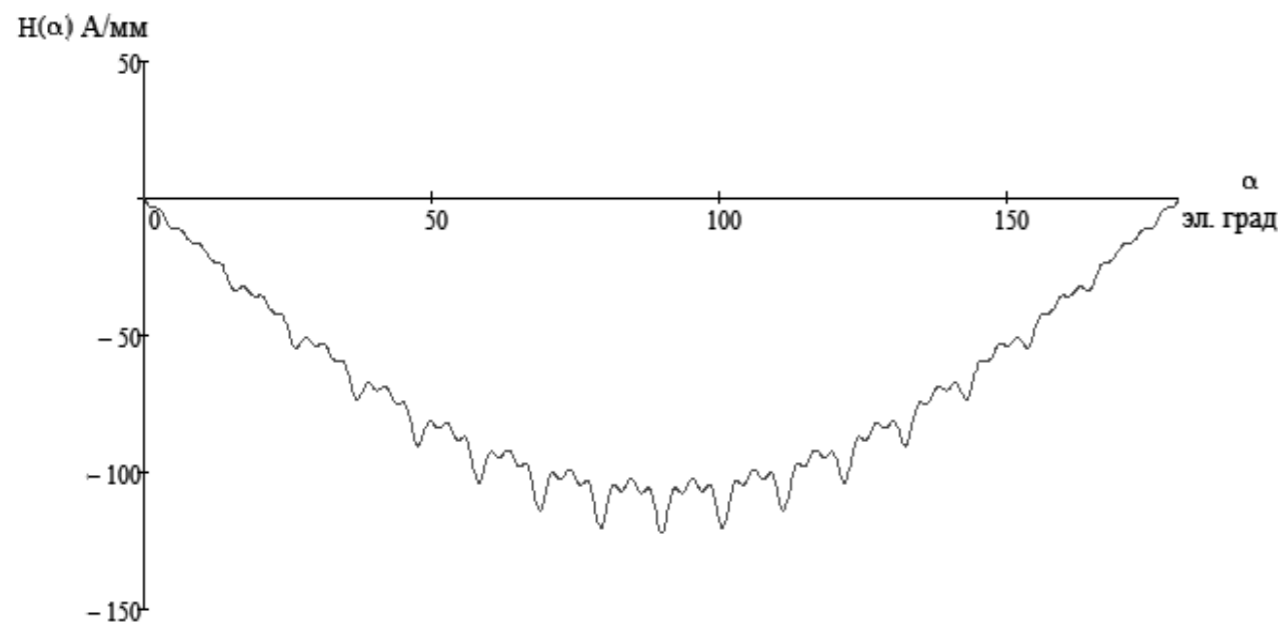


Рис. 6. Распределение напряженности магнитного поля ротора в воздушном зазоре АД №1

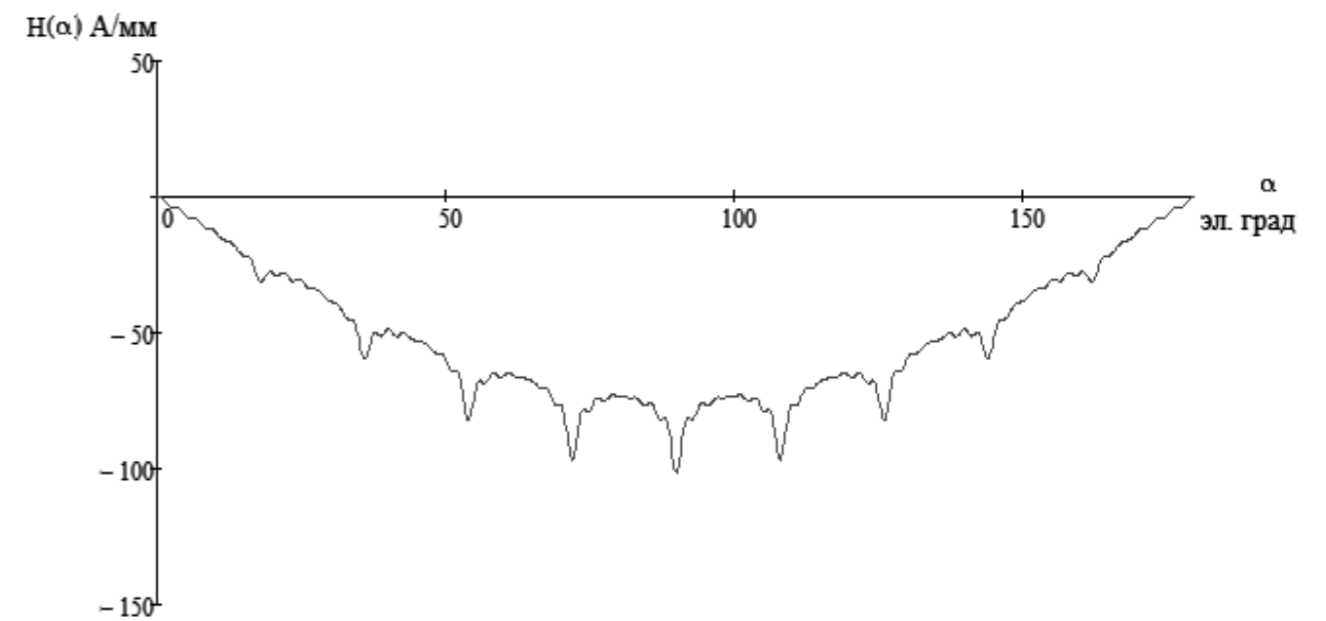


Рис. 7. Распределение напряженности магнитного поля ротора в воздушном зазоре АД №2

Проведенный расчет хорошо согласуется с результатами, полученными при численном моделировании в среде *Ansoft Maxwell* в котором магнитное поле реакции ротора ослабляло первичное магнитное поле статора. Расхождение результатов численного моделирования и расчета составляет порядка 10÷15%.

Заключение.

В ходе проделанной работы были получены результаты численного моделирования в программном комплексе *Ansoft Maxwell*, которые были сопоставлены с расчетом магнитного поля короткозамкнутой обмотки ротора.

Список литературы

1. Геллер Б. Дополнительные поля, моменты и потери мощности в асинхронных машинах [Текст] / Б. Геллер, В. Гамата; пер.Ф.М. Юферов. – М.-Л.: Энергия, 1964. – 263 с.
2. Кравчик А.Э. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник [Текст] / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
3. Вольдек А.И. Электрические машины [Текст] / А.И. Вольдек. – Л.: «Энергия», 1974. – 840 с.
4. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: учебник для вузов. Том 1. [Текст] / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 652 с.
5. Патент №2393613 Российская Федерация, МПК7 H02K17/18, H02K17/16 Способ повышения эффективности работы асинхронной короткозамкнутой электрической машины и асинхронная короткозамкнутая электрическая машина (варианты) [Текст] / Байдасов Н.И.; патентообладатель: Закрытое акционерное общество «Технология СМП» (RU). – 2009124815/09. – заявл. 30.06.2009. – опубл. 27.06.2010.

References

1. Geller B. Dopolnitel'nye polja, momenty i poteri moshhnosti v asinhronnyh mashinah [Tekst] / B. Geller, V. Gamata; per.F.M. Juferov. – M.-L.: Jenergija, 1964. – 263 p.
2. Kravchik A.Je. Asinhronnye dvigateli serii 4A: Spravochnik [Tekst] / A.Je. Kravchik, M.M. Shlaf, V.I. Afonin, E.A. Sobolenskaja. – M.: Jenergoizdat, 1982. – 504 p.
3. Vol'dek A.I. Jelektricheskie mashiny [Tekst] / A.I. Vol'dek. – L.: «Jenergija», 1974. – 840 p.
4. Ivanov-Smolenskij A.V. Jelektricheskie mashiny: uchebnik dlja vuzov. Tom 1. [Tekst] / A.V. Ivanov-Smolenskij. – M.: Izdatel'skij dom MJeI, 2006. – 652 p.
5. Patent №2393613 Rossijskaja Federacija, MPK7 H02K17/18, H02K17/16 Sposob povyshenija jeffektivnosti raboty asinhronnoj korotkozamknutoj jelektricheskoj mashiny i asinhronnaja korotkozamknutaja jelektricheskaja mashina (varianty) [Tekst] / Bajdasov N.I.; patentoobladatel': Zakrytoe akcionernoe obshhestvo «Tehnologija SMP» (RU). – 2009124815/09. – zajavl. 30.06.2009. – opubl. 27.06.2010.