

Математическая модель для расчета электромагнитных сил в синхронном электроприводе с постоянными магнитами

В.А. Мартынов, А.Н. Голубев, А.В. Алейников
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: zav@toe.ispu.ru, alenikgo@yandex.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Математическое моделирование m -фазных синхронных двигателей ($m \geq 3$) основано на допущениях о гладком воздушном зазоре машины и отсутствии насыщения магнитопровода, что снижает степень корректности исследования их виброшумовых характеристик. В связи с этим актуальным является создание метода исследования многофазного электропривода, обеспечивающего решение задач анализа и синтеза с учетом специфики протекания электромагнитных процессов в m -фазных машинах на основе использования полевых моделей.

Материалы и методы: Использован метод переменных состояний и метод моделирования поля в среде Elcut.

Результаты: Предложена математическая модель для расчета электромагнитных сил m -фазного синхронного двигателя с постоянными магнитами, учитывающая реальное распределение магнитного поля в активной зоне машины с учетом насыщения магнитной цепи, дискретного распределения многофазной обмотки статора по пазам и перемещения зубчатого сердечника статора относительно ротора с постоянными магнитами.

Выводы: На основании данной модели возможна разработка алгоритмов управления двигателем, улучшающих виброшумовые показатели электропривода.

Ключевые слова: синхронный электропривод, радиальная электромагнитная сила, многофазный синхронный двигатель, виброшумовые характеристики.

Mathematical model for simulation of electromagnetic forces in permanent magnet synchronous motors

V.A. Martynov, A.N. Golubev, A.V. Aleynikov
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: zav@toe.ispu.ru, alenikgo@yandex.ru

Abstract

Background: Mathematical simulation of m -phase synchronous motors ($m \geq 3$) is based on assumptions about a smooth air gap of the machine and zero saturation of the magnetic circuit, which reduces the degree of correctness of their vibration characteristics research. Therefore, an urgent task is to develop a technique to study the multi-phase electric drive, which enables us to solve analysis and synthesis problems by accounting for the peculiarities of electromagnetic processes in m -phase machines based on using field models.

Materials and methods: The study employed the state variable method and the method of field modeling in the Elcut environment.

Results: We have proposed a mathematical model for calculating of the electromagnetic forces of the m -phase synchronous motor with permanent magnets by taking into account the actual distribution of magnetic field in the machine core with an account of the magnetic circuit saturation, the discrete distribution of the multiphase stator windings in slots and displacement of the stator serrated core relative to the permanent magnet rotor.

Conclusion: The proposed model makes it possible to develop motor control algorithms improving the vibronoise characteristics of the electric drive.

Key words: synchronous electrical drive, radial electromagnetic force, multiphase synchronous drive, vibronoise characteristics.

Перспективным направлением в решении задачи создания электропривода с улучшенными технико-экономическими показателями следует считать его построение на основе исполнительного двигателя с увеличенным числом фаз статорной обмотки. Однако традиционные методы исследования двух- и трехфазных систем базируются на достаточно грубых допущениях и не адекватны возможностям современной вычисли-

тельной техники. Это делает актуальным создание метода исследования многофазного электропривода, обеспечивающего решение задач анализа и синтеза с учетом специфики протекания электромагнитных процессов в m -фазных машинах на основе использования полевых моделей.

Экспериментальные и модельные исследования показывают, что переход на многофаз-

ный вариант электропривода переменного тока позволяет снизить радиальную составляющую электромагнитной силы, определяющей основной уровень магнитных шумов [1]. Для более детального исследования данного вопроса необходима разработка адекватной математической модели, которая позволит учесть реальное распределение магнитного поля в активной зоне машины с учетом насыщения магнитной цепи и реального распределения m -фазной обмотки, что обеспечит повышение точности результатов анализа и синтеза электромеханической системы. При этом появится возможность определения радиальных сил, действующих на зубцы статора магнитоэлектрического двигателя, в статических и динамических режимах работы.

В настоящее время все более широкое распространение, в том числе и в электроэнергетике, получают приводы на основе синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ). Соответственно, возникает необходимость в более свершенных системах их управления и более точных методах расчета. Современные модели СДПМ основаны на уравнениях Парка-Горева и имеют следующие допущения [2]:

- не учитывается насыщение стали;
- не учитывается зубчатость сердечников, т.е. зазор машины предполагается гладким;
- учитывается только радиальное синусоидальное распределение индукции в зазоре.

Ниже представлен алгоритм расчета радиальных сил, действующих на зубцы статора, учитывающий реальную геометрию машины, а также насыщение магнитной цепи.

Полагая, что магнитная проницаемость зубца СДПМ во много раз больше, чем магнитная проницаемость в зазоре и пазах ($\mu = \mu_0 \mu_r \gg \mu_0$), можно пренебречь полем в пазах и учитывать только радиальные составляющие индукции поля в зубце машины. Тогда, как показано в [3], радиальная сила F_r , действующая на зубец в сторону зазора, может быть определена по формуле

$$F_r = \frac{\Phi_z^2}{2\mu_0 S_z}, \quad (1)$$

где Φ_z – магнитный поток, входящий (выходящий) в наконечник зубца со стороны зазора; S_z – площадь наконечника зубца.

Поскольку магнитный поток от разных полюсов создает тяговое усилие на зубец в сторону зазора, то в случае, когда часть потока замыкается через один зубец (рис. 1), результирующее значение потока, создающего радиальную силу, необходимо находить как интеграл от модуля индукции:

$$\Phi_z = \int_S |B_n| ds, \quad (2)$$

где B_n – радиальная индукция наконечника зубца.

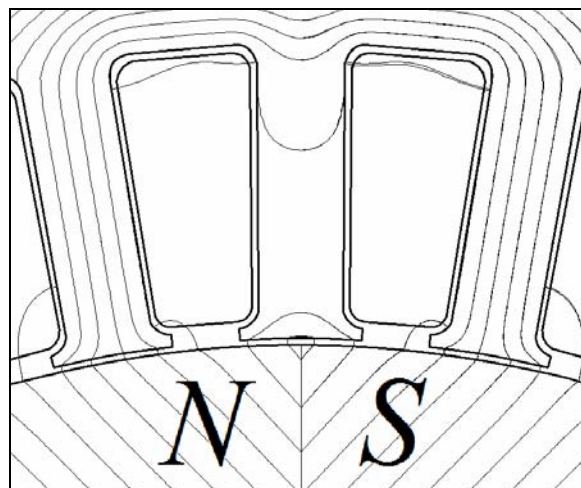


Рис. 1. Картина магнитного поля участка электрической машины от постоянных магнитов

Однако распределение индукции в реальной машине имеет довольно сложную форму и будет изменяться в зависимости от положения ротора и мгновенного значения токов в обмотке. Результирующее значение индукции зависит от двух ее составляющих: индукции, обусловленной только действием постоянных магнитов $B_{\text{ПМ}}$, и индукции, обусловленной действием только токов многофазной статорной обмотки $B_{\text{ЗК}}$. В каждой дискретной точке поверхности зубца значение радиальной индукции можно найти как сумму этих двух составляющих. Таким образом, магнитный поток Φ_z можно найти по формуле

$$\Phi_z = \int_S |B_{\text{ПМ}} + B_{\text{ЗК}}| ds. \quad (3)$$

Исходя из данного выражения представляется возможным разбить зубец на множество маленьких участков площадью ΔS . Тогда выражение (3) примет вид

$$\Phi_z = \sum |\Delta \Phi_{\text{ПМ}} + \Delta \Phi_{\text{ЗК}}| \Delta S, \quad (4)$$

где $\Phi_{\text{ПМ}}$ – магнитный поток наконечника зубца, обусловленный действием только постоянных магнитов ротора; $\Phi_{\text{ЗК}}$ – магнитный поток наконечника зубца, обусловленный действием только токов многофазной статорной обмотки.

Исследования показали, что магнитный поток $\Phi_{\text{ЗК}}$ можно считать равномерно распределенным по всей поверхности наконечника зубца, тогда как магнитный поток $\Phi_{\text{ПМ}}$ имеет неравномерное распределение и может менять свое направление в пределах одного зубца.

Исходя из этого целесообразно разделить зубец на две части в точке, где магнитный поток $\Phi_{\text{ПМ}}$ меняет свое направление (рис. 2). В этом случае выражение (4) примет вид

$$\Phi_z = \left| \Phi_{\text{ПМ}+} + \Phi_{\text{ЗК}} \frac{S_{z+}}{S_z} \right| + \left| \Phi_{\text{ПМ}-} - \Phi_{\text{ЗК}} \frac{S_{z-}}{S_z} \right|, \quad (5)$$

где $\Phi_{\text{ПМ}+}$ – часть магнитного потока $\Phi_{\text{ПМ}}$ от южного полюса постоянного магнита; $\Phi_{\text{ПМ}-}$ – часть магнитного потока $\Phi_{\text{ПМ}}$ от северного полюса постоянного магнита; S_z – площадь наконечника

зубца; S_{Z+} – площадь наконечника зубца, где протекает поток $\Phi_{\text{ПМ}+}$; S_{Z-} – площадь наконечника зубца, где протекает поток $\Phi_{\text{ПМ}-}$.

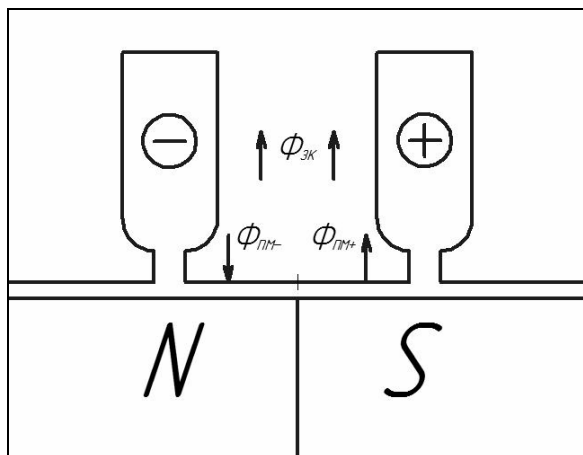


Рис. 2. Направления радиальных магнитных потоков в зубце электрической машины

Относительные магнитные проницаемости высококоэрцитивных ПМ близки к единице и гораздо меньше магнитных проницаемостей стали статора. Поэтому вполне корректным представляется допущение о том, что насыщение магнитной цепи статора обусловлено действием только постоянных магнитов ротора [4]. При этом допущении можно с помощью численных методов расчета магнитных полей предварительно определить зависимости $\Phi_{\text{ПМ}+}$, $\Phi_{\text{ПМ}-}$, S_{Z+} , S_{Z-} от угла α поворота ротора относительно статора с учетом насыщения стали статора. Тогда при заданном угле α магнитный поток $\Phi_{3\text{К}}$ может быть определен по формуле

$$\Phi_{3K} = \lambda(\alpha) \cdot i_{3K}, \quad (6)$$

где $i_{3\kappa}$ – ток рассматриваемого зубцового контура, который определяется как разность мгновенных токов двух соседних пазов; $\lambda(\alpha)$ – магнитная проводимость зубцового контура.

Токи зубцовых контуров (МДС) $[i_{зк}]$ (рис. 3) могут быть выражены через значения токов ветвей машины $[i_{в}]$ с помощью сингулярной матрицы преобразования $[C]$:

$$[i_{3K}] = [C][i_B]. \quad (7)$$

Матрица $[C]$ имеет число столбцов, равное числу ветвей электрической цепи, и число строк, равное числу ветвей схемы замещения магнитной цепи [5]. Элементом этой матрицы, расположенным в k -й строке и j -м столбце, является число w_k , равное количеству витков с током j -й ветви электрической цепи i_{Bj} , охватывающих k -ю ветвь схемы замещения магнитной цепи. При этом, если число витков с током i_{Bj} создают в k -й ветви МДС, совпадающие с выбранным положительным направлением магнитного потока, то w_k берется со знаком «плюс». В противном случае число w_k берется со знаком «минус». Составленная таким образом матрица $[C]$ будет иметь вид:

- для трехфазной машины

$$[C] = \begin{bmatrix} & A & B & C \\ w & & & 3w \\ 2w & & & 3w \\ 3w & & & 3w \\ 3w & & & 2w \\ 3w & & & w \\ 3w & & & \\ 3w & w & & \\ 3w & 2w & & \\ 3w & 3w & & \\ 2w & 3w & & \\ w & 3w & & \\ & 3w & & \\ & 3w & w & \\ & 3w & 2w & \\ & 3w & 3w & \\ & 2w & 3w & \\ & w & 3w & \\ & & 3w & \end{bmatrix}$$

- для девятифазной

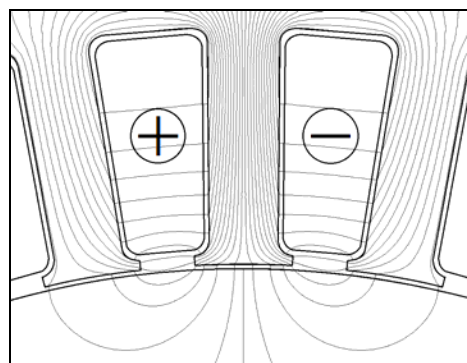
[illegible]

Рис. 3. Картина магнитного поля участка электрической машины от тока зубцового контура

Величина $\lambda(\alpha)$ при известном угле α определяется также с помощью численных методов расчета полей. При этом магнитная проницаемость статора может быть принята равной бесконечности, а области, занятые постоянными магнитами ротора, заменяются средами без источников поля, магнитные проницаемости которых равны магнитным проницаемостям постоянных магнитов. В случае отсутствия на роторе ферромагнитных вставок величина λ будет постоянной для любого угла α .

Таким образом, определив предварительно зависимости $\Phi_{\text{ПМ}+}(\alpha)$, $\Phi_{\text{ПМ}-}(\alpha)$, $S_{Z+}(\alpha)$, $S_{Z-}(\alpha)$ и $\lambda(\alpha)$, можно при известных токах в обмотке статора и положении ротора относительно статора α найти радиальные силы, действующие на зубцы СДПМ.

Для проверки адекватности разработанной модели и принятых допущений были произведены расчеты радиальных сил, действующих на зубцы СДПМ с числом зубцов статора $Z_1 = 36$, числом полюсов $2p = 4$, номинальным моментом $M_{\Sigma} = 170$ Нм, номинальным током $I_H = 9,2$ А (рис. 4).

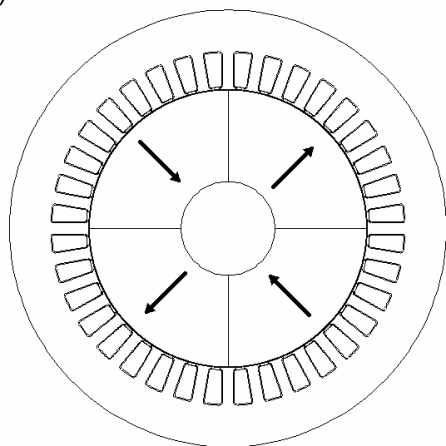


Рис. 4. Конструкция синхронных машин с различным исполнением роторов

На рис. 5 представлены кривые радиальных сил, действующих на один из зубцов статора девятифазного СДПМ в режиме холостого хода (1) и при токах, соответствующих номинальным, при повороте оси ротора относительно основной гармонике поля статора на $\pi/2$ электрических радиан (2), для различных углов α . При этом сплошными линиями изображены кривые сил, определенные по предлагаемой методике, а отдельными точками («крестиками») представлены значения сил, полученных непосредственно из расчета поля в программном комплексе Elcut при тех же токах с учетом кривой намагничивания стали статора.

Как следует из сопоставления результатов расчета, значения радиальных сил, полученные при принятых допущениях и по результату расчета поля в активной зоне, практически совпадают.

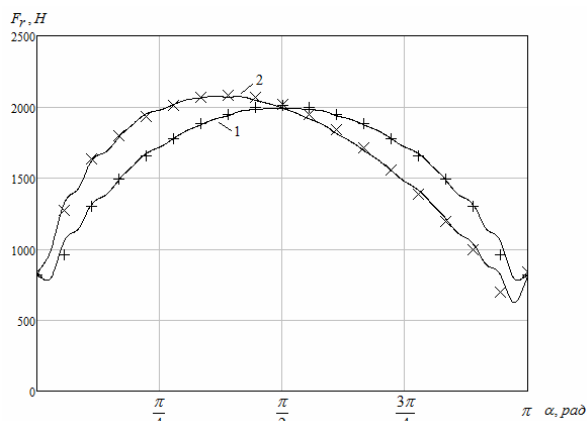


Рис. 5. Радиальная сила, действующая на зубец синхронного двигателя

На основе данной модели возможно построение систем управления двигателем, позволяющих снизить пульсации радиальных сил, действующих на зубцы машины, что существенно улучшит виброшумовые характеристики.

Список литературы

1. Голубев А.Н., Лапин А.А. Многофазный синхронный регулируемый электропривод / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 156 с.
2. Важнов А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – Л.: Энергия, 1980. – 256 с.
3. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах: учеб. пособие для вузов по спец. «Электромеханика». – М.: Высш. шк., 1989.
4. Мартынов В.А., Голубев А.Н. Моделирование электромагнитных процессов в многофазных синхронных двигателях с постоянными магнитами // Электричество. – 2013. – № 9. – С. 37–41.
5. Иванов-Смоленский А.В. Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 216 с.
6. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.

References

1. Golubev, A.N., Lapin, A.A. *Mnogofaznyy sinkhronnyy reguliruemyy elektropriwod* [Multiphase synchronous controlled electric drive]. Ivanovo, 2008. 156 p.
2. Vazhnov, A.I. *Perekhodnye protsessy v mashinakh peremennogo toka* [Transient processes in AC machines]. Leningrad, Energiya, 1980. 256 p.
3. Ivanov-Smolenskiy, A.V. *Elektromagnitnye sily i preobrazovanie energii v elektricheskikh mashinakh* [Electromagnetic forces and transformation of energy in electric machines]. Moscow, Vysshaya shkola, 1989.
4. Martynov, V.A., Golubev, A.N. *Modelirovanie elektromagnitnykh protsessov v mnogofaznykh sinkhronnykh dvigatelyakh s postoyannymi magnitami* [Modeling of electromagnetic processes in multiphase synchronous motors with permanent magnets]. *Elektrichestvo*, 2013, no. 9, pp. 37–41.
5. Ivanov-Smolenskiy, A.V. *Universal'nyy metod rascheta elektromagnitnykh protsessov v elektricheskikh mashinakh* [Universal method of calculation of electromagnetic processes in electrical machines]. Moscow, Energoatomizdat, 1986. 216 p.
6. Kopylov, I.P. *Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin* [Mathematical modeling of electrical machines]. Moscow, Vysshaya shkola, 2001. 327 p.

Голубев Александр Николаевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологий,
e-mail: alenikgo@yandex.ru

Мартынов Владимир Александрович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой теоретических основ электротехники и электротехнологий,
e-mail: zav@toe.ispu.ru

Алейников Алексей Владимирович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологий,
e-mail: Aleynikov-AV@yandex.ru