МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПОТОКА РАССЕЯНИЯ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ НАСЫЩЕНИЯ МАГНИТОПРОВОДА

Халикова Малика Олимовна

Ташкентский университет информационных технологии, доцент

malika26021985@mail.ru

В статье представлены результаты исследования применения методов кусочно-линейной аппроксимации, параболических полиномов, кубических сплайнов для учёта насыщения зубцовой зоны при расчете реактивного сопротивления дифференциального рассеяния обмоток якоря синхронных машин с различным характером нагрузки.

In the article, results of research of application of methods of piece wife-linear approximation, parabolic polynoms and cubic splines for the account of saturation prong zones are presented at calculation of jet resistance of differential dispersion of windings of an anchor of synchronous machines with various character of loading.

Maqolada har xil turdagi yuklama bilan sinxron mashinalarning yakor cho'lg'amlarining differentsial tarqoq reaktivligini hisoblashda tish zonasining to'yinganligini hisobga olish uchun qismli chiziqli yaqinlashish usullari, parabolik polinomlar, kubik splinelardan foydalanishni o'rganish natijalari keltirilgan. .

Ключевые слова: *дифференциальное рассеяние, обмотки якоря, синхронная машина, высшие и пространственные гармонические, магнитный поток рассеяния, коронки зубцов, воздушный зазор.*

Key words: *differential leakage, armature windings, synchronous machine, higher and spatial harmonics, leakage magnetic flux, tooth crowns, air gap.*

Kalit so'zlar: *differensial tarqoq, yakor cho'lg'am, sinxron mashina, yuqori va fazoviy garmonikalar, magnit oqimi, tish oralig'i, havo bo'shlig'i.*

Реактивное сопротивление дифференциального рассеяния обмоток якоря синхронных машин обусловлено всеми восстанавливающими высшими пространственными гармоническими составляющими магнитного потока в

воздушном зазоре. Сумма всех этих гармонических составляющих потоков якоря (начиная от подзубцового порядка и выше) образует составляющую магнитного потока дифференциального рассеяния, называемую иначе, магнитным потоком рассеяния по коронкам зубцов обмотки якоря. Точное определение аналитических выражений нелинейных характеристик, в их числе потоков рассеяния по коронкам зубцов в зависимости от степени насыщения отдельных частей магнитопровода и режимов работы машин, является наиболее актуальной задачей формирования их переходных процессов, проектирования синхронных машин.

В исследованиях последнего времени[1] в картине магнитных силовых линий рассеяния по коронкам зубцов считается, что последние проходя через воздушный зазор машины, пересекают воздушный зазор между статором и ротором только в тангенциальном направлении. При этом используется метод суперпозиции[2], следовательно, без учета нелинейностей, связанных с насыщением магнитопровода машины, зубчатостью сердечников якоря, ротора и неравномерностью воздушного зазора, которые являются отличительными признаками степени насыщения отдельных зон магнитопровода, приводящие к существенным погрешностям.

Целью настоящей работы является разработка методики расчета магнитного потока рассеяния по коронкам зубцов, проходящего сквозь неравномерный воздушный зазор, с учетом нелинейностей насыщения зубцовых зон магнитопроводов статора и ротора.

Если рассматривать изменения режима работы синхронной машины в наиболее широком диапазоне $-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$, включая промежуточные активный или смешанный характеры нагрузки, то можно увидеть, что (при прочих равных условиях) основная гармоническая составляющая результирующего магнитного потока насыщает зубцовую зону магнитопровода в разной степени. Так, например, при (идеальном) индуктивном характере нагрузки, когда магнитный поток якоря направлен по продольной оси, встречно потоку возбуждения, (при прочих равных условиях)

[1]Одилов Г., Пирматов Н.Б., Мустафакулова Г.Н. Расчет электромагнитного поля многофазных обмоток статора в воздушном зазоре турбогенератора ТВВ-200-2 // Актуальные вопросы в области гуманитарных, социально-экономических и технических наук: Межвуз. сб. науч. трудов / ТашГТУ. Ташкент. 2005.

[2] Одилов Г. Экспериментальное определение индуктивного сопротивления рассеяния по коронкам зубцов якоря синхронной машины. Сб. «Автоматизированный электропривод». Материалы Республиканской научно-технической конференции молодых ученых, посвященной 50-летию ТашПИ. Ташкент, 1980

результирующий магнитный поток минимален, зубцовая зона статора насыщена незначительно. При (идеально) емкостном характере нагрузки – наоборот, зубцовая зона статора сильно насыщена. Необходимо учитывать то обстоятельство, что составляющие магнитного потока воздушного зазора алгебраически складываются, а для их точного расчета необходимо учитывать постоянно изменяющий характер степени насыщения частей магнитопровода.

Выполнение поставленной задачи можно добиться путем аппроксимации характеристик намагничивания частей магнитопровода машины. При этом если рассматриваются только отдельные режимы синхронной машины конкретной конструкции, для аналитического представления нелинейной характеристики намагничивания $B = f(H)$ частей магнитопровода машины достаточно использовать методы кусочно-линейной аппроксимации или использовать кусочно-постоянные функции[3]. Так, например для экспериментальной характеристики, заданной рядом B_k ; H_k точек (где k =1,2,3,…,n), в первом случае на участке $H_k - H_{k+1}$ полученная аппроксимируемая функция

$$B = B_k + \frac{B_{k+1} - B_k}{H_{k+1} - H_k}(H - H_k) \qquad (1)$$

будет иметь вид ломаной линии с изломом в заданной точке характеристики.

Если использовать второй метод, на этом же участке $H_k - H_{k+1}$ эта функция постоянна, например

$$H = H_k \text{ или } H = \frac{1}{2}(H_k + H_{k+1}) \qquad (2)$$

и полученная характеристика представляет собой ступенчатую функцию. Разумеется, количество изломов и ступеней (1) и (2) для рассматриваемой нелинейной характеристики зависит от количества экспериментальных точек « k ». Однако эти методы аппроксимации нелинейных характеристик намагничивания являются менее точными. Непременным условием повышения точности является увеличение экспериментальных точек $k \to \infty$.

[3] Демирчан К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники. В 3-х т. Учебник для вузов. т. 2. 4-е изд. СПб.: Питер, 2006. -576 с.

По сравнению с этими методами аппроксимации, более точным описанием нелинейных кривых являются аппроксимация совокупностью отрезков квадратичных или кубических полиномов - сплайнов.

Для квадратичных или параболических сплайнов аппроксимация на участке между серединами двух соседних отрезков кривых $(H_{k-1}+H_k)/2$ и $(H_k+H_{k+1})/2$ выражается функцией

$$B_k(H_k)=B_k+m_k(H-H_k)+M_k(H-H_k)^2, \qquad (3)$$

где коэффициенты m_k и M_k определяются из условия непрерывности функции и производной в точках сопряжения

$$B_k(H_k+H_{k+1})/2=B_{k+1}(H_k+H_{k+1})/2 \qquad (4)$$

и $$B'_k(H_k+H_{k+1})/2=B'_{k+1}(H_k+H_{k+1})/2. \qquad (5)$$

Отсюда следует, что при заданных $k=n$ точках имеется $2(n-1)$ уравнений в точках сопряжения и еще требуется два дополнительных условия для однозначного определения $2n$ коэффициентов парабол (3). Эти два условия, называемые краевыми, задаются в виде значений первых или вторых производных функции $B=(H)$ или их линейных комбинаций на одном или обоих концах интервала описания функции.

При использовании кубических сплайнов узлы аппроксимации и узлы сопряжения совпадают[4]. Поэтому для определения коэффициентов используют следующие условия: прохождение сплайна через узлы $B_k=(H_k)=B_k$; равенство в узлах первых $B'_k=(H_k)=B'_{k+1}(H_k)$ производных соседних отрезков k и k+1. Кроме этого, для однозначного определения коэффициентов необходимо также знать два краевых условия.

Аппроксимируемые полиномы выражаются через значения первых производных в узлах $m_k=B'_k(H_k)$

$$B_k(H)=m_{k-1}(H_k-H)^2(H-H_{k-1})/(H_k-H_{k-1})^2-$$

[4] Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. 5-е изд., перераб. –М.: Энергоатомиздат, 1989. -528 с.

$$- m_k (H - H_{k-1})^2 (H_k - H) / (H_k - H_{k-1})^2 +$$

$$+ B_{k-1} (H_k - H)^2 [2(H - H_{k-1}) + (H_k - H_{k-1})] / (H_k - H_{k-1})^3 +$$

$$+ B_k (H - H_{k-1})^2 [2(H_k - H) + (H_k - H_{k-1})] / (H_k - H_{k-1})^3. \qquad (6)$$

Значения первой m_k производной аппроксимируемой функции может быть заменено функцией, определяемой из экспериментально снятых зависимостей $B_k = f(H_k)$ путем вычисления отношения

$$m_k = (B_k - B_{k-1}) / (H_k - H_{k-1}) \qquad (7)$$

в узлах сопряжения. Тогда решение уравнений (6) и (7) будет упрощено, так как вместо дифференциальных уравнений будут использованы алгебраические.

Второй способ записи аппроксимируемых кубических полиномов заключается в выражении через значения их вторых производных в узлах сопряжения

$$M_k = B_k''(H_k), \qquad (8)$$

тогда аппроксимируемая функция будет записана как

$$B_k(H) = B''_{k-1}(H_{k-1})(H_k - H)^3 / [6(H_k - H_{k-1})] +$$

$$+ B''_k(H_k)(H - H_{k-1})^3 / [6(H_k - H_{k-1}) +$$

$$+ [B_{k-1} - B''_{k-1}(H_{k-1})(H_k - H_{k-1})^2 / 6](H_k - H) / (H_k - H_{k-1}) +$$

$$+ [B_k - B''_k(H_k)(H_k - H_{k-1})^2 / 6](H - H_{k-1}) / (H_k - H_{k-1}). \qquad (9)$$

Краевые условия по первым $m_0 = B'_0$ и $m_n = B'_n$ или вторым производным $M_0 = B''_0$ и $M_n = B''_n$ будем полагать заданными из данных эксперимента. В этом случае система (9) добавляется уравнениями

$$2m_0 + m_1 = 3(B_1 - B_0) / H_1 - H_1 / 2M_o; \qquad (10)$$

$$m_{n-1} + 2m_n = 3(B_n - B_{n-1}) / H_n + H_n / 2M_n. \qquad (11)$$

На первый взгляд параболические полиномы кажутся проще обоих методов кубических сплайнов. Для практического сравнения точности этих и предыдущих методов при учете насыщения в расчетах дифференциального рассеяния обмотки якоря синхронных машин, в работе были использованы метод кусочно-линейной аппроксимации, параболический метод и оба метода кубических сплайнов. Для этого характеристики намагничивания отдельных участков магнитопровода синхронной машины[5] тип МСА 72-4 (15кВт., 400В., 21,6А., 1500об/мин.), снятые экспериментально, были подвергнуты аппроксимации. Они проводились аналитическими выражениями (1) с помощью кусочно-линейной аппроксимации (для краткости *метод* - *a*), (3) - (5) с помощью параболических полиномов (*метод* - *b*), по (6) - (7) (*метод* - *c*) и (8) - (11) (*метод* - *d*) с помощью обоих методов кубических сплайнов. При этом принималось во внимание то обстоятельство, что для всех *методов аппроксимации* количество экспериментальных точек кривых намагничивания были равны $k = 10$. Затем по известным значениям составляющих напряженности магнитного поля в воздушном зазоре и с помощью аппроксимированных характеристик намагничивания были найдены составляющие $B_{\delta\nu}(t)$ основных и высших гармонических индукции в воздушном зазоре (где ν =1, 3, 5, …- порядок гармонических составляющих). А также по суммарной кривой и с помощью аппроксимированных характеристик намагничивания (методы - *a*, -*b*, -*c*, -*d*) были найдены суммарные кривые $B_{\delta}(t)$.

Количественные сравнения результатов расчета по четырем вышеприведенным методами с данными эксперимента показали следующее:

1. Зубцовая зона магнитопровода сильно насыщена и применение метода суперпозиции в определении суммарной магнитной индукции $B_{\delta}(t)$ не приемлемо и приводит к погрешностям:

a) метод - *a* - 31 %;

b) метод - *b* - 22 %;

c) метод - *c* - 17 %;

d) метод - *d* – 17,5 %.

[5] Холбутаева А. Дифференциальное рассеяние обмотки якоря явнополюсной синхронной машины. Дисс. на соиск. степ. магистра техн. наук. Научн. рук. д.т.н., проф. Г.Одилов, Н.Пирматов. Ташкент, 2005.

2. Отличия составляющих индукции в воздушном зазоре $B_{\delta\nu}(t)$, найденных с помощью аппроксимирующих функций характеристик намагничивания и составляющих $H_{\delta\nu}(t)$ от экспериментально снятых:

a) 19,3; 18,2; 18,5 % (последовательность цифр: первая, третья, пятая гармонические составляющие);

b) 12 %; 11,7 %; 12,7 %;

c) 3,5 %; 4,1 %; 4,0 %;

d) 3,4 %; 3,9 %; 3,8 %.

Заключение

Применение метода кусочно-линейной аппроксимации допускает значительные погрешности. Объем вычислений в параболических полиномах не меньше, чем кубических сплайнах и поэтому, обладая сравнительно одинаковыми объемами вычислений, кубические сплайны отличаются большей точностью, и рекомендуется их использовать расчетах магнитных цепей синхронных машин с учетом нелинейностей насыщения.

Список литературы:

1. Одилов Г., Пирматов Н.Б., Мустафакулова Г.Н. Расчет электромагнитного поля многофазных обмоток статора в воздушном зазоре турбогенератора ТВВ-200-2 // Актуальные вопросы в области гуманитарных, социально-экономических и технических наук: Межвуз. сб. науч. трудов / ТашГТУ. Ташкент. 2005.

2. Одилов Г. Экспериментальное определение индуктивного сопротивления рассеяния по коронкам зубцов якоря синхронной машины. Сб. «Автоматизированный электропривод». Материалы Республиканской научно-технической конференции молодых ученых, посвященной 50-летию ТашПИ. Ташкент, 1980.

3. Демирчан К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники. В 3-х т. Учебник для вузов. т. 2. 4-е изд. СПб.: Питер, 2006. -576 с.

4. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. 5-е изд., перераб. –М.: Энергоатомиздат, 1989. -528 с.