

СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ ИНДУКТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ В ПАЗАХ РОТОРА

А.Н. Корогодский, К.Э. Коратаев

Схема замещения магнитной цепи в данном случае синтезируется с целью ее использования программой математического моделирования, специализированной на решении систем уравнений, описывающих такого рода электрические и магнитные цепи. Динамика рабочего процесса электромагнитного устройства моделируется путем повторяющихся расчетов магнитной и электрической цепей с дискретными малыми шагами (приращениями) времени. На каждом шагу дифференциальные уравнения приводятся к линейным алгебраическим уравнениям путем использования конечных разностей и линеаризации нелинейных зависимостей, коэффициенты уравнений определяются исходя из прошлых значений величин. Результатом расчета схемы замещения магнитной цепи на каждом шагу является определение зависимости потокоцепления обмоток от токов в обмотках. Эти зависимости далее используются при расчете электрической цепи. Электрические цепи здесь не рассматриваются.

В качестве объекта использован индукторный генератор на два уровня напряжения для систем автономного электроснабжения подвижных объектов [1].

Продольное и поперечное сечения генератора приведены на рис.1 и 2. Особенностью этой конструкции является наличие двух обмоток на разных уровнях напряжения. Использована осевая система возбуждения и постоянные магниты в пазах ротора, залитые стеклонаполненным полиамидом. Оксидно-барьерные магниты служат для надежного самовозбуждения генератора и несколько снижают массу машины. Число зубцов статора 10, ротора - 6. Машина пятифазная.

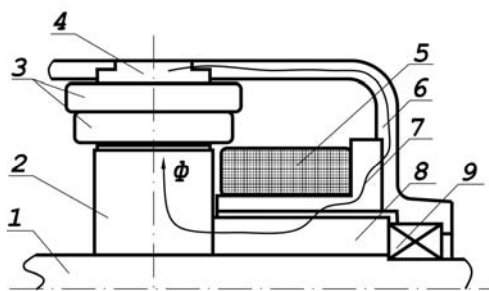


Рисунок 1

1 - вал; 2 - пакет ротора; 3 - якорные обмотки; 4 - пакет статора; 5 - обмотка возбуждения; 6 - крышка осевого магнитопровода; 7 - фланец магнитопровода; 8 - вращающаяся втулка - часть осевого магнитопровода; 9 - подшипник. Φ - обозначен путь осевого магнитного потока возбуждения.

В магнитной системе можно выделить две параллельные и одинаковые цепи по 5 зубцов статора и 3 зубца ротора.

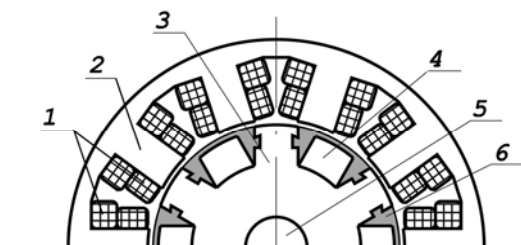


Рисунок 2

1 - катушки на зубцах статора, принадлежат разным обмоткам; 2 - зубцы пакета статора; 3 - зубцы пакета ротора; 4 - магниты в пазах ротора; 5 - вал; 6 - арматура (заливка) магнита.

На рис. 2 изображены элементы одной из половин магнитной цепи и для нее синтезирована схема замещения рис. 3.

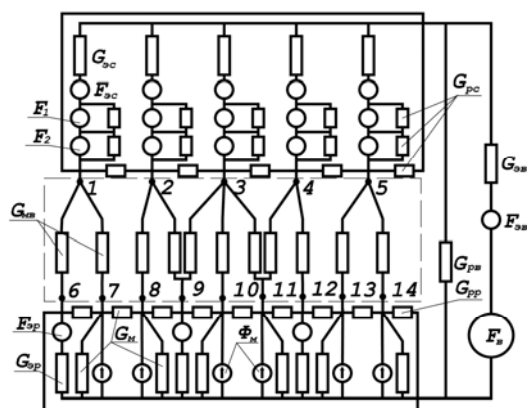


Рисунок 3

В правой части схемы магнитопровод и обмотка системы возбуждения: F_b - НС (намагничивающая сила) обмотки возбуждения;

$G_{эв}$, $F_{эв}$ - элементы схемы замещения магнитопровода системы возбуждения, эквивалентная магнитная проводимость и НС; $G_{рв}$ - магнитная проводимость рассеяния системы возбуждения.

В верхней части схемы элементы 5 зубцов статора: $G_{эс}$, $F_{эс}$ - элементы схемы замещения железа зубца статора, эквивалентная магнитная проводимость и НС; F_1 , F_2 - НС катушек первой и второй обмоток; $G_{рс}$ - магнитные проводимости пазового рассеяния.

В средней части, обведенной штриховой линией отображены магнитные связи в воздушном зазоре: верхняя граница зазора (статор) представлена пятью узлами 1 - 5; нижняя граница (ротор) представлена девятью узлами 6 - 14; $G_{мв}$ - магнитные связи между узлами верхней и нижней границ.

В нижней части схемы - элементы зубцов и магнитов ротора: $G_{эр}$, $F_{эр}$ - элементы схемы замещения железа зубца ротора, эквивалентная магнитная проводимость и НС; Φ_m , G_m - элементы схемы замещения магнита, источники магнитного потока и магнитные проводимости; $G_{рр}$ - магнитная проводимость рассеяния между магнитом и зубцом ротора.

В ферромагнитных участках зубцов статора и ротора и магнитопровода системы возбуждения представленных на схеме замещения магнитной проводимостью и источником НС могут учитываться эффект вытеснения магнитного потока вихревыми токами и вызванное этим перераспределение индукции по сечению. При наличии несинусоидальных высокочастотных магнитных потоков и массивных участков магнитопровода пренебрежение этим явлением может вызвать значительные погрешности, особенно при моделировании переходных процессов. В работе [2] рассмотрена схема замещения участка ферромагнетика, пригодная для учета указанных явлений. Сплошной участок разделяется на слои, соответственно стальной лист на прямоугольные, а сплошной цилиндр на кольцевые цилиндры. Каждый слой в отдельности представляется ветвью с источником НС и магнитной проводимостью, в которых учтены и вихревые токи и линеаризованная кривая намагничивания. Специфика структуры этой схемы позволяет провести ее расчет, а затем результаты представить одной линейной зависимостью, т.е. "свернуть" ее в одну ветвь, входящую в общую схему типа рис. 3. Расчеты производятся на каждом шагу в следующей последовательности - исходя из прошлых значений величин, опреде-

ляются параметры полной схемы замещения участка, затем она свертывается до одной ветви, входящей в схему рис.3. По завершении расчетов схем замещения магнитной и электрической цепей и определения магнитного потока ветвь "обратным ходом" развертывается в полную схему замещения участка с определением магнитных потоков в каждом слое и подготавливаются данные для расчета следующего шага.

Включение НС катушек обмоток статора и обмотки возбуждения в ветви схемы замещения может быть произведено несколькими способами. В работе [3] рассмотрены основные приемы включения НС в схему замещения. Можно считать, что выбор варианта схемы дело вкуса. В данном случае на рис.3 выбор варианта очевиден - катушки охватывают только одну ветвь, в которую и включены соответствующие источники НС.

Представление магнита в схеме замещения может оказаться громоздкой задачей. В частности, в рассматриваемом случае при относительно широком магните его магнитное состояние по ширине может существенно изменяться. В работе [4] рассматривается общий случай представления магнита в виде многополюсника и соответствующая ему внутренняя схема замещения в виде источников магнитного потока и магнитных проводимостей, приведены алгоритмы определения параметров этих элементов. На схеме замещения (рис. 3) приведена в качестве примера внутренняя схема замещения магнита в виде трехполюсника - каждый магнит представлен двумя источниками магнитного потока и тремя магнитными проводимостями. Это физически соответствует разделению магнита на 2 стыкующиеся половины (например, как прилегающие к нижней оси половины на рис. 2). Это простейший случай. Если применить разделение на большее число частей, соответствующая схема замещения станет неудобочитаемой ввиду наложения ветвей.

Здесь следует отметить, что в математической модели для составления уравнений по законам Кирхгофа используется описание схемы замещения, например, перечисление ветвей, стыкующихся в каждом узле и перечисление элементов в каждой ветви. Такое описание любой схемы в принципе несложно. Само же графическое изображение громоздкой схемы может быть весьма затруднительным и неинформативным. Это не является препятствием при математическом моделировании.

СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ ИНДУКТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ В ПАЗАХ РОТОРА

Сказанное выше относится и к схеме замещения рабочего воздушного зазора. Магнитное поле в воздушном зазоре можно привести к системе сосредоточенных параметров - схеме замещения, представив его границы - поверхности статора и ротора как несколько эквипотенциальных площадок. По числу этих площадок (узлов) соответствующая схема замещения является многополюсником с весьма большим числом внутренних магнитных связей. Вопросы определения параметров этого многополюсника рассмотрены в работах [5], [6]. Магнитные проводимости между соседними зубцами статора и ротора, которые почти не изменяются и в основном замыкаются через пазовую область, вынесены из схемы зазора и отнесены к проводимостям пазового рассеяния. Число магнитных связей (проводимостей) в воздушном зазоре можно существенно уменьшить, если принять исчезающе слабые связи равными нулю. Но и в этом случае внутренняя схема замещения воздушного зазора может быть громоздкой.

Специфической особенностью этой части схемы замещения является то, что нижняя граница (узлы схемы, принадлежащие ротору) подвижна. Поэтому в разные моменты времени изменяется и сама схема - часть связей рвется, возникают новые связи и величина проводимостей является функцией угла поворота ротора.

Проиллюстрируем сказанное на рассматриваемом примере. На рис.3 часть схемы, замещающая воздушный зазор, обведена штриховой линией. Узлы пронумерованы. Узлы с номерами от 1 до 5 связаны с соответствующими ветвями - зубцами статора, узлы с номерами 6, 9 и 12 связаны с ветвями - зубцами ротора. Узлы 7, 10, 13 - с левыми половинами магнитов, узлы 8, 11 и 14 - с правыми половинами магнитов. Всего в зазоре выделены 11 магнитных проводимостей G_{MB} отличных от нуля. Картина примерно соответствует положению ротора на рис. 2. На рис.4 приведена схема замещения воздушного зазора примерно соответствующая повороту ротора на 60 геометрических градусов.

Здесь уже 13 магнитных связей отличны от нуля и в схеме много пересечений. Магнитные проводимости между зубцами ротора и статора определяются при решении полевой задачи. Решать такую задачу на каждом шагу в процессе моделирования нет необходимости. Можно ее прорешать заранее для

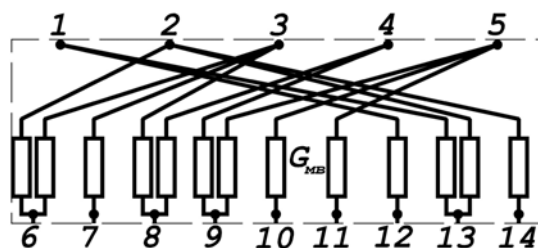


Рисунок 4

достаточного числа положений ротора и заполнить соответствующие таблицы (кривые). В данном случае достаточно рассчитать 3 кривых, приведенных на рис. 5.

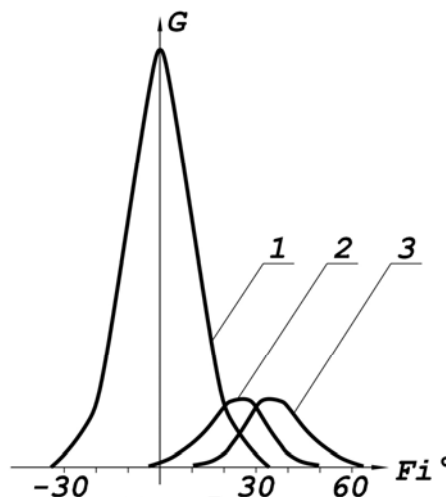


Рисунок 5

Кривые магнитных проводимостей воздушного зазора: 1 - между зубцом статора и зубцом ротора; 2 - между зубцом статора и левой половиной магнита; 3 - между зубцом статора и правой половиной магнита.

Выводы:

1. Все области магнитных полей в активном объеме и системе возбуждения электрической машины можно описать как систему со сосредоточенными параметрами и представить в виде схемы замещения как эквивалентную электрическую цепь.

2. Подробное графическое изображение схемы замещения магнитной цепи не всегда возможно и целесообразно. В громоздких схемах можно рекомендовать для наглядности замену сложных фрагментов многополюсниками без расшифровки внутренней структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коратаев К.Э., Плеханов В.Г. "Источники питания на два уровня напряжения для сельскохозяйственных машин". - Доклады 8-ой международной конференции "Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири", 2002 г. Изд-во Томского университета 2002 г.
2. Корогодский А.Н., Коратаев К.Э. Учет вихревых токов в математической модели ферромагнитопровода / Труды Рубцовского промышленного института, Выпуск 8, Технические науки, Рубцовск. – 2001.
3. Корогодский А.Н., Коратаев К.Э. "Включение катушек в схему замещения магнитной цепи" "Вестник АлтГТУ им. И.И.Ползунова", №1 2003.
4. Корогодский А.Н., Коратаев К.Э. Математическая модель постоянного магнита в электрической машине. Труды Рубцовского промышленного института, Выпуск 8, Технические науки, Рубцовск. – 2001.
5. Коратаев К.Э. Математическое моделирование воздушного зазора в электрической машине / Научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов. – Рубцовск: РИО Рубцовского промышленного института, 2002. – С.125-127.
6. Коратаев К.Э. Определение параметров схемы замещения воздушного зазора в электрической машине / Научно-техническая конференция студентов и аспирантов. Тезисы докладов. – Рубцовск: РИО Рубцовского промышленного института, 2002. – С.127-129.