

Средняя сила тока разряда АБ при работе в КИТ за время t :

$$I_{абср} = I_a - \frac{(U_{нэон} - U_{нр} + I_a \cdot R_{аб}) \cdot \tau \cdot (1 - e^{-t_n/\tau})}{(R_{аб} + R_{нэ}) \cdot t}, A. \quad (25)$$

Допустимое время разряда АБ в КИТ током силой $I_{абср}$ (учитывается только разряд на СЭ при работе в КИТ, затраты энергии на заряд НЭ не учитываются):

$$t_p = \frac{6 \cdot 10^7 \cdot \delta_+ \cdot S_+ \cdot n_+ \cdot (70 + 5 \cdot n_+ - 2 \cdot \Delta C_p)}{(e^{-(1,36+0,071 \cdot T)} + 1) \cdot I_{абср}^{1,46}}, c. \quad (26)$$

Число возможных попыток прокручивания вала ДВС продолжительностью t СЭП с КИТ по запасу энергии АБ (АБ работает только на разряд совместно с НЭ на СЭ):

$$Z_{II} = \frac{t_p}{t_n}. \quad (27)$$

$$\text{Кратность тока АБ ее номинальной емкости: } K_{\sigma} = \frac{I_{абср}}{C_{20}}. \quad (28)$$

Далее для различных значений n_{cp} и $U_{нэон}$ строятся зависимости от времени (от $t = 0$ до $t = t_k$) всех расчетных параметров СЭП с КИТ.

Вывод

Данная методика расчета СЭП с КИТ дает возможность с достаточной точностью определить основные параметры СЭП. Формулы для определения основных параметров СЭП с КИТ позволяют провести сравнительный анализ с другими системами пуска.

Литература

1. Квайт С.М., Менделевич Я.А., Чижков Ю.П. Пусковые качества и системы пуска авто-тракторных двигателей. - М., Машиностроение, 1990.- с.256.: ил.

Анализ методов расчета и моделирования электродвигателей постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов

Розин П.А., к.т.н. доц. Акимов А.В., Кудинова Л.А.
Университет машиностроения
(495) 223-05-29, ate@mami.ru

Аннотация. Рассмотрены основные методы расчета двигателей постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов. Показано, что наиболее точные данные по характеристикам двигателей постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов могут быть получены путем моделирования их магнитных полей и электрических процессов в обмотках. Дан сравнительный анализ возможных методов их моделирования.

Ключевые слова: электродвигатели постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов, методы моделирования, метод конечных элементов, метод граничных элементов

Благодаря своим высоким эксплуатационным характеристикам электродвигатель с постоянными магнитами, широко используется в исполнительных механизмах, включая исполнительные механизмы автомобилей, а также является наиболее перспективными в диапазоне малых и средних мощностей. Он не имеет потерь на возбуждение, обладает высокой стабильностью скорости ротора и высокими пусковыми моментами. Эти качества выделяют его из ряда всех остальных машин и обеспечивают применение в качестве электростартера, а также в системах, где стабильность скорости является первостепенным требованием, предъявляемым к исполнительному механизму. Поэтому проблему их расчета можно рассматри-

вать как весьма актуальную.

В основном методы расчета, используемые при проектировании электродвигателей постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов, базируются на положениях, которые были заложены еще в 30-50 годах. Это труды Э. Арнольда, С. Эвершеда, А.С. Кантера, А.М. Сенкевича, Г. Ротерса и других отечественных и зарубежных ученых, которые подверглись существенным изменениям до настоящего времени.

Расчет всех электрических машин, в том числе и ДПТ с постоянными магнитами, состоит из двух основных этапов:

1. Расчет размеров и параметров обмоток. На основании заданных величин полезной мощности, частоты вращения, режима работы и т.д., предварительно определяются геометрические и обмоточные параметры машины. При этом необходимо учитывать свойства применяемых электротехнических, магнитных и конструктивных материалов.
2. Поверочный расчет машины. Расчет магнитной и электрической цепей, определение условий работы постоянных магнитов, расчет потерь, КПД, рабочих характеристик и т.д.

В данной статье рассмотрены только методы поверочного расчета, так как именно они требуют обеспечения высокой точности результатов.

Классический метод расчета по схемам замещения

Рабочий процесс в рассматриваемых электрических машинах наглядно может быть представлен с использованием схем замещения магнитной цепи. Расчет параметров схемы замещения предполагает, что известны геометрические размеры и обмоточные данные машины.

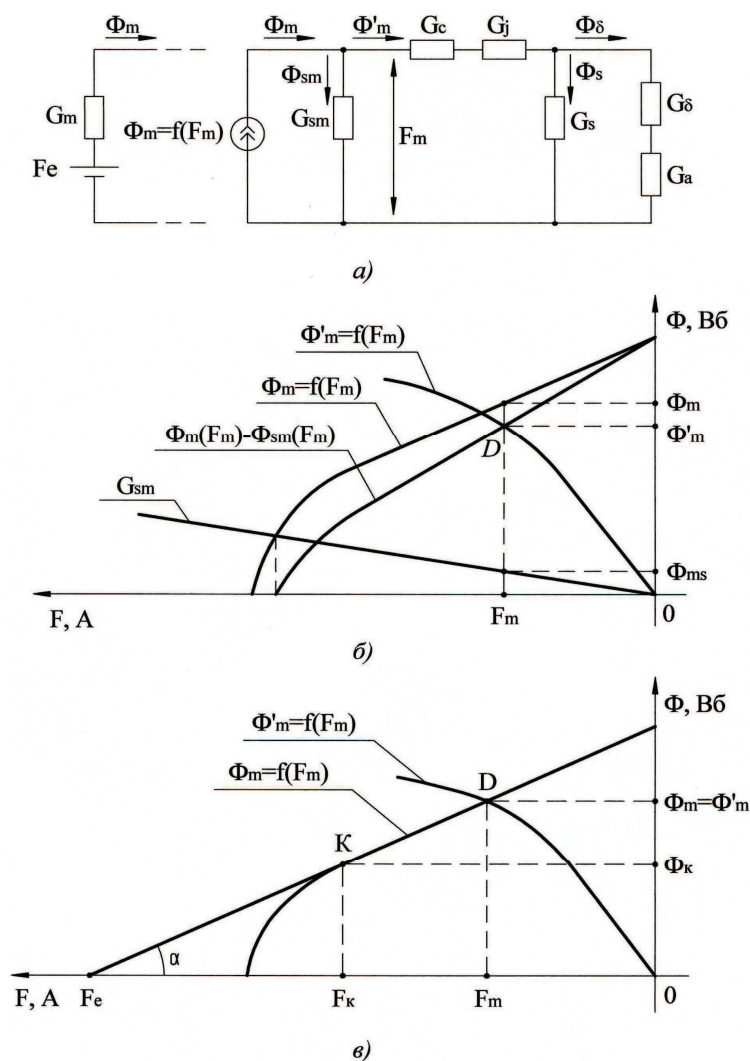


Рисунок 1. Графоаналитический способ расчета магнитной цепи ДПТ с ПМ по эквивалентной схеме замещения

Схема замещения магнитной цепи электродвигателя с постоянными магнитами обычно содержит приведенные к паре полюсов собственную проводимость рассеяния магнита G_{sm} , проводимость стыка «магнит-корпус» G_c , проводимость рабочего зазора машины G_δ , а также введенные А.М. Сенкевичем нелинейные проводимости стальных участков магнитопровода G_j , G_a . При этом постоянный магнит на схеме замещения представляется зависимым источником магнитного потока $\Phi_m = f(H_m)$, характеристика которого определяется кривой намагничивания (рисунок 1) /6/.

Положение рабочей точки магнита определяется графоаналитическим методом Кантера, согласно которому по результатам расчета схемы замещения на рабочей диаграмме строится нагрузочная характеристика магнита $\Phi_m(F_m) - \Phi_{sm}(F_m)$ с учетом собственного рассеяния и кривая намагничивания внешней магнитной цепи $\Phi'_m = f(F_m)$, точка D пересечения которых определяет величину магнитного потока Φ'_m , отдаваемого магнитом во внешнюю цепь.

При расчете ДПТ с ПМ собственное рассеяние магнитов, как правило, не учитывается, в результате чего отдаваемый магнитный поток $\Phi_m = \Phi'_m$ определяется точкой пересечения кривой намагничивания магнитопровода $\Phi'_m = f(F_m)$ с рабочей характеристикой магнита $\Phi_m = f(F_m)$.

Кривые намагничивания магнитопровода $\Phi'_m = f(F_m)$ на рабочих диаграммах строятся по методике, принятой при расчете магнитных цепей электромагнитных устройств. Для нескольких произвольных значений полезного потока Φ_δ с учетом нелинейных свойств стальных участков магнитопровода определяются характеризующие зависимость $\Phi'_m = f(F_m)$ магнитные потоки и МДС на соответствующих схеме замещения участках магнитной цепи электродвигателя.

В некоторых случаях для аналитических расчетов магнитных цепей постоянный магнит на схеме замещения представляется в виде последовательно включенных собственной проводимости магнита G_m и источника фиктивной (или сторонней) намагничивающей силы F_e , величины которых определяются следующими соотношениями:

$$G_m = \operatorname{tg} \alpha = \rho \cdot \frac{S_m}{h_m} \quad (1)$$

$$F_e = \frac{\Phi_\kappa}{G_m} + F_\kappa \quad (2)$$

где: ρ – коэффициент магнитного возврата; Φ_κ , F_κ – магнитный поток и МДС, определяемые точкой K конца линейного участка кривой размагничивания (рисунок 1, в); α – угол наклона нагрузочной линии постоянного магнита.

Для построения эквивалентной схемы замещения электродвигателя постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов магнитная система электродвигателя разделяется на сектора:

- n_m – количество рабочих участков магнитных полюсов вдоль полюсной дуги;
- n_h – количество частей по высоте магнита;
- n_n – количество частей, на которые разбивается межполюсное пространство.

Магнитная система электродвигателя постоянного тока с постоянными магнитами разделяется на $2 \cdot (n_m + n_n)$ частей, проводящих магнитный поток в радиальном направлении.

n_m , n_n , n_h не зависят от количества зубцов якоря и определяются уровнем дискретизации цепной математической модели ДПТ с СМ, а также зависят от свойств и ограничений используемого программного продукта для реализации расчета математической модели электродвигателя (рисунок 2).

На рисунке 3 представлен пример расчетной схемы замещения рассматриваемого двигателя. Точность расчета по таким схемам замещения зависит от количества разбиений.

Однако увеличение числа разбиений приводит к увеличению числа расчетных уравнений, которые, как правило, ограничиваются программными продуктами.

Выше представлена схема замещения двухполюсного электродвигателя. Однако ис-

пользование этого метода при большом числе полюсов приводит к уменьшению точности расчета из-за ограничений, накладываемых программным продуктом.

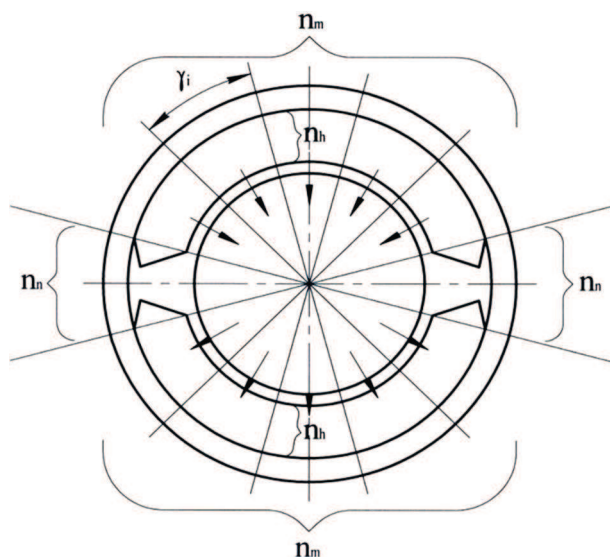


Рисунок 2. Эскиз разделения магнитной системы электродвигателя постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов на сектора

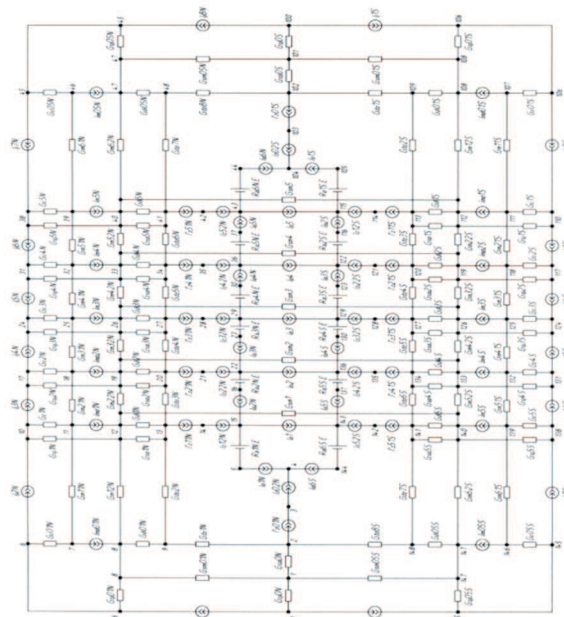


Рисунок 3. Схема замещения двухполюсного электродвигателя постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов

Метод проводимости зубцовых контуров

Магнитное поле, образованное токами обмоток, представляется контурами, проходящими через зубцы ротора и статора электродвигателя /5/.

Форма МДС должна обязательно рассматриваться совместно с распределением удельной проводимости воздушного зазора. Обе эти величины должны рассматриваться взаимосвязано, так как только их произведение дает реальную величину -индукцию на гладкой поверхности.

Полученное распределение МДС зубцового контура является следствием введения особых граничных условий - бесконечной проводимости воздушного зазора вне контура.

Поле любого контура может быть принято состоящим из трех независимых частей: полей двух пазов, несущих ток контура, и равномерного поля под зубцом возбужденного контура. Поле в области каждого паза может рассматриваться отдельно от полей других пазов и поля под зубцом.

Этот метод содержит большое количество допущений, которые сказываются на точности результата. Кроме этого, он требует проработки вопроса учета полей постоянных магнитов.

Метод конечных элементов

На протяжении последних десятилетий благодаря развитию вычислительной техники быстро расширяется сфера применения вычислительных методов. Одно из лидирующих мест занимает здесь метод конечных элементов /4/. Метод ориентирован на решение задач, связанных с распространением электромагнитных волн в различных средах.

К этому классу задач можно отнести и моделирование работы электрических машин самых разнообразных типов.

Метод конечных элементов является аналитической процедурой. Ключевая идея метода при анализе поведения конструкций заключается в следующем: сплошная среда (конструкция в целом) моделируется путем разбиения ее на области (конечные элементы), в каждой из которых поведение среды описывается с помощью отдельного набора выбранных

функций, представляющих напряжения и перемещения в указанной области. Эти наборы функций часто задаются в такой форме, чтобы удовлетворить условиям непрерывности описываемых ими характеристик во всей среде. Поэтому если конструкция неоднородна и состоит из большого количества отдельных конструктивных элементов, поведение каждого из которых описывается своим дифференциальным уравнением, то в этом случае, как правило, можно применить лишь метод конечных элементов.

Особые преимущества метода заключаются в удобстве формирования уравнений и возможности представления совершенно нерегулярных и сложных конструкций и условий нагружения.

Метод конечных элементов стремительно развивается. Популярность метода и интерес к нему объясняются возможностью отражать реальные аспекты, возникающие в прикладных задачах проектирования.

Основной указанной предпосылкой развития метода является возможность автоматически эффективно построить и решить систему алгебраических уравнений высокого порядка.

Математическое описание электромагнитных процессов в общем случае представляет собой систему уравнений Максвелла в дифференциальной форме без учёта токов смещения, дополненную материальными уравнениями, определяющими электрофизические свойства материалов (магнитную проницаемость и удельную электрическую проводимость). В общем случае магнитная проницаемость может зависеть от напряжённости магнитного поля. Явления магнитного гистерезиса и анизотропии магнитных свойств материалов не учитываются. При выполнении расчётов для магнитомягких материалов задаётся постоянное среднее значение магнитной проницаемости. Система уравнений Максвелла решается с использованием векторного магнитного потенциала.

Методом конечных элементов можно проводить расчет магнитной индукции и других связанных с ней параметров. Так, на рисунке 4 показано распределение магнитного поля в магнитной системе двигателя, причем ротор находится в положении, при котором направление тока в одной из фаз изменяется на противоположное.

На рисунке 5 представлены результаты такого расчета.

В качестве примера программных комплексов, основанных на современных конечно-элементных технологиях, можно назвать ANSYS, который сегодня успешно используется такими известными фирмами, как Siemens, Bosch, Motorola, General Electric, Intel и т.д.

Универсальный программный комплекс конечно-элементного моделирования ANSYS является одним из лучших в своей области и позволяет решать широкий спектр таких задач, как электромагнетизм.

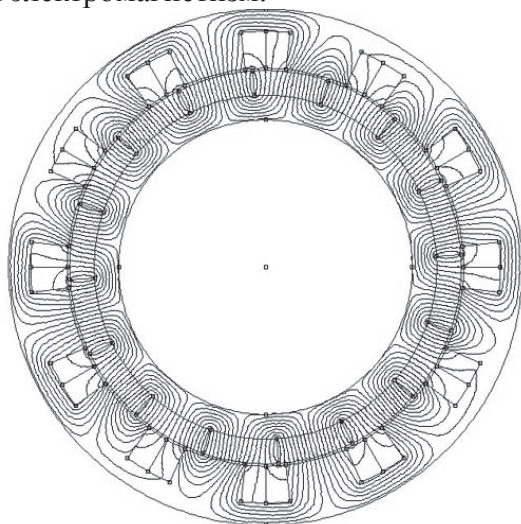


Рисунок 4. Распределение магнитного поля в магнитной системе двигателя в момент переключения направления тока в одной из фаз

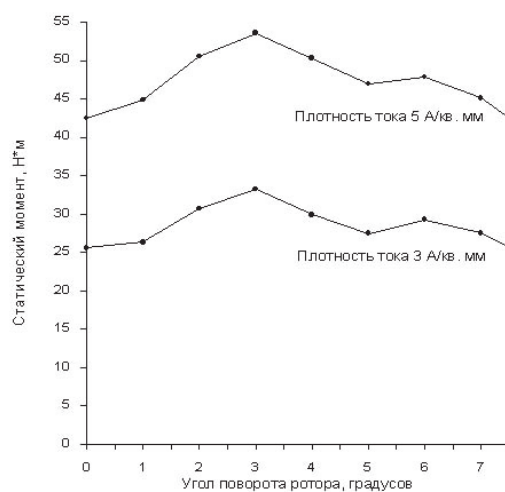


Рисунок 5. График зависимости статического момента на валу двигателя от угла поворота ротора

Одним из преимуществ ANSYS является его способность к решению так называемых связанных задач, с учетом различных сочетаний видов взаимодействий и процессов, например электромагнетизм. Этот спектр возможностей позволяет проводить расчеты электрических машин большинства типов и моделировать различные режимы работы с учетом динамики системы. При необходимости процесс работы электрической машины можно смоделировать полностью: электромагнитные процессы, механические напряжения и деформации, возникающие в процессе работы, реакции в опорах, тепловой режим и т.д.

Таким образом, ANSYS позволяет провести комплексный расчет заданного режима работы электрического двигателя или генератора. В результате могут быть получены закон движения ротора при пуске, закон изменения пусковых токов, точки локального перегрева, потери на нагрев, поля механических, электромагнитных, тепловых распределенных параметров и т.д.

Метод граничных элементов

Метод граничных элементов [1] представляет собой соединение двух подходов решения краевых задач для дифференциальных уравнений с частными производными. Это сведение краевых задач к эквивалентным интегральным уравнениям и аппроксимация решений при помощи функций формы, подобных используемым в методе конечных элементов.

В методе граничных элементов уравнение, описывающее поле с помощью функции Грина, преобразуется в интегральное уравнение относительно неизвестных функций поля на границе. Граница разбивается на отдельные элементы, поле на которых аппроксимируется полиномами. Преимуществом метода является уменьшение размерности задачи и, как следствие, меньшая по сравнению с методом конечных элементов требуемая память ЭВМ и время счета.

Недостатком данного метода является оперирование полными несимметричными матрицами с коэффициентами, вычисляемыми путем численного интегрирования. Кроме этого, отсутствует программное обеспечение этого метода, что затрудняет его использование.

Литература

1. Бреббия К. и др. Методы граничных элементов: Пер. с англ. / Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л. - М.: Мир, 1987. - 524 с., ил.
2. Громадка П. Т., Лей Ч. Комплексный метод граничных элементов в инженерных задачах: Пер. с англ. - М.: Мир, 1990. - 303 с., ил.
3. Норри Д., Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов: Пер. с англ. - М.: Мир, 1981. - 304 с., ил.
4. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы / Р. Галлагер. - М.: Мир, 1984. - 428 с.: ил.
5. Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах / Иванов-Смоленский А.В., Абрамкин Ю.И., Власов А.И. [и др.]; под ред. Иванова-Смоленского А.В. - М. Энергоатомиздат, 1986. - 216 с.: ил.
6. Борискин П.И., Акимов С.В. Схема замещения автотракторного электродвигателя с возбуждением от составных магнитов: Электротехнические комплексы автономных объектов: Сборник научных статей. Страницы истории кафедры. - М.: Издательский дом МЭИ, 2008. - 138 с.
7. Нигматулин Ш.М., Любимый О.И., Шендеровский И.М. Особенности моделирования магнитного поля в рабочем зазоре автомобильного вентильного генератора. Материалы 77-й международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», МГТУ «МАМИ» 27-28 марта 2012 г. с. 54-59