

А.С. МАРКОВ
С.В. ШИРИНСКИЙ

**ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН**

Часть 1. Лабораторные работы № 1 – 3

Методическое пособие
по курсу
«Специальные электрические машины»

для студентов, обучающихся по направлению
«Электроэнергетика и электротехника»

УДК
621.313
М268

*Утверждено учебным управлением МЭИ
Подготовлено на кафедре Электромеханики МЭИ*

Рецензент: докт.техн.наук, профессор Беспалов В.Я.

Марков А.С., Ширинский С.В.

Исследование специальных электрических машин. Часть 1. Лабораторные работы № 1–3: методическое пособие / А.С.Марков, С.В.Ширинский. – М.: Издательство МЭИ, 2015. – 24 с.

Пособие содержит описания объектов исследования, программы лабораторных работ, порядок их проведения и обработки результатов испытаний. Включены работы по исследованию различных специальных видов электрических машин. Представленные лабораторные работы базируются на многолетних методических разработках сотрудников кафедры Электромеханики МЭИ, среди которых следует особо выделить работы Токарева Б.Ф., Фисенко В.Г.

Пособие предназначено для подготовки бакалавров по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Продолжительность лабораторных занятий – 4 часа.

© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2015 г.

ВВЕДЕНИЕ

Разнообразие видов специальных электрических машин обусловлено отчасти специальными условиями их применения или специальными требованиями к выходным характеристикам электромеханических преобразователей, отчасти постоянным прогрессом электромеханики, приводящим к появлению принципиально новых конструкций самих электрических машин или машинно-вентильных агрегатов и применению новых активных материалов и систем охлаждения. В рамках знакомства с курсом специальных электрических машин, расширяющего представления о трансформаторах, асинхронных и синхронных машинах и коллекторных машинах постоянного и переменного тока, студентам предлагается выполнить ряд лабораторных работ для непосредственного знакомства с устройством и характеристиками некоторых специальных электрических машин.

В первой части сборника представлены лабораторные работы по исследованию промышленного индукторного генератора, электромашинного усилителя поперечного поля и вентильно-индукторного двигателя.

Исследуемый индукторный генератор представляет собой часть электромашинного агрегата, состоящего из приводного асинхронного двигателя и собственно индукторного генератора. Такой агрегат, подключаемый к обычной трехфазной сети промышленной частоты 50 Гц, позволяет получать напряжение повышенной частоты (2400 Гц), которое используется для высокочастотных нагревательных установок или для питания высокочастотных электродвигателей.

Электромашинный усилитель поперечного поля представляет собой одноякорный преобразователь коллекторного типа, объединяющий в себе два генератора постоянного тока. Соединенный с преобразователем приводной асинхронный двигатель позволяет использовать такой агрегат в качестве усилителя мощности постоянного тока с коэффициентом усиления до 10000 для точного регулирования частоты вращения в приводах постоянного тока большой мощности.

Вентильно-индукторный двигатель представляет собой машинно-вентильный агрегат, объединяющий простоту и надежность индукторного двигателя с управляемостью полупроводникового преобразователя. Две его части, машинная и вентильная, должны быть оптимально согласованы для получения наилучших механических характеристик и широкого диапазона регулирования. Одним из важных моментов проектирования вентильно-индукторного двигателя является расчет магнитных проводимостей зазора между явновыраженными полюсами статора и ротора при различных углах рассогласования. В лабораторной работе исследуется вопрос определения магнитной проводимости по конечно-элементной модели машинной части агрегата. Эта часть непосредственно связана с индивидуальными расчетными заданиями студентов.

Лабораторная работа № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА

Индукторные машины (машины с электромагнитной редукцией частоты вращения) используют для работы магнитные поля высших гармонических, что позволяет создавать тихоходные двигатели при питании от сети промышленной частоты или высокочастотные генераторы при вращении ротора с частотой 3000 об/мин. В общем случае индукторная машина имеет на статоре две обмотки с разной полюсностью, работающие на разных частотах, и зубчатый ротор, что позволяет получить большое число конструктивных исполнений. В данной работе исследуется одна из простейших конструкций индукторного генератора, содержащая на статоре обмотку возбуждения постоянного тока и обмотку якоря. При вращении зубчатого ротора происходит электромеханическое преобразование энергии, связанное с изменением взаимной индуктивности между обмоткой якоря и обмоткой возбуждения.

Целью работы является изучение конструкции, принципа действия и характеристик индукторного генератора.

Программа работы. Экспериментальная часть

1. Ознакомиться с конструкцией агрегата, его паспортными данными, со схемой лабораторной установки, с приборами.
2. Осуществить пуск агрегата (установки).
3. Снять характеристику холостого хода генератора $U_{\Gamma} = f(I_{2B})$ при $I_{\Gamma} = 0$.
4. Снять нагрузочную характеристику $U_{\Gamma} = f(I_{2B})$ при $I_{\Gamma} = I_{\text{ном}} = \text{Const}$, $\cos\varphi_{\Gamma} = \text{Const}$.
5. Снять внешние характеристики $U_{\Gamma} = f(I_{\Gamma})$ при $I_{2B} = \text{Const}$, $\cos\varphi_{\Gamma} = \text{Const}$.
6. Снять регулировочную характеристику $I_{2B} = f(I_{\Gamma})$ при $U_{\Gamma} = U_{\text{ном}} = \text{Const}$ и $\cos\varphi_{\Gamma} = \text{Const}$.
7. Для номинального режима работы генератора записать значения токов, напряжений и мощностей генератора и приводного двигателя.

Обработка результатов эксперимента

1. Построить опытные характеристики. Характеристику холостого хода и нагрузочную характеристику построить на одном графике, внешние характеристики построить на одном графике.
2. Определить по внешней характеристике процентное изменение напряжения.
3. Определить КПД агрегата в номинальном режиме работы.

Исследуемый агрегат и его паспортные данные

Исследуемый индукторный генератор (ИГ) имеет одну зубчатую

поверхность: ротор зубчатый, пазы обмотки якоря полузакрытые. Листы стали статора и ротора ИГ показаны на стенде. Магнитное поле возбуждения создается катушками возбуждения, расположенными в шести больших пазах пакета статора, при протекании по ним постоянного тока. Катушки трехфазной обмотки якоря расположены в малых пазах статора. Ротор имеет 48 зубцов с открытыми пазами между ними.

В качестве приводного двигателя используется трехфазный двухполюсный асинхронный двигатель, жестко соединенный с генератором в едином агрегате ГИМ (ГИМ – генератор индукторный машинный). Агрегат имеет вертикальное исполнение. Индукторный генератор расположен снизу, приводной двигатель в верхней части. Агрегат не имеет крепления к полу, а располагается на резиновой прокладке – амортизаторах. Агрегат не имеет выходного конца вала, поскольку его назначение – преобразование частоты тока.

Паспортные данные агрегата:

- индукторный генератор

$$U_{\Gamma} = 230 \text{ В}, f_{\Gamma} = 2400 \text{ Гц}, P_{\Gamma} = 0.8 \text{ кВт}, I_{2\text{В}} = 1.1 \text{ А}, \cos\varphi_{\Gamma} = 0.8, m_{\Gamma} = 3.$$

- приводной двигатель

$$U_{\text{д}} = 220/380 \text{ В}, f_{\text{д}} = 50 \text{ Гц}, m_{\text{д}} = 3, 2p = 2, P_{\text{д}} = 3 \text{ кВт}, \cos\varphi_{\text{д}} = 0.89.$$

Коэффициент полезного действия агрегата

$$\eta = \eta_{\Gamma} \times \eta_{\text{д}} = 0.55 \times 0.84 = 0.46.$$

Электрическая схема установки представлена на рис. 1.1, а также на стенде. Все измерительные приборы в цепи генератора рассчитаны на частоту 3 кГц.

Особенности конструкции и принцип работы индукторного генератора

Индукторные генераторы в составе электромашинного агрегата применяют для нагрева и высокочастотной закалки металлов в кузнечно-прессовых цехах, для питания высокочастотных электроприводов, в авиационных высокочастотных установках, в схемах автоматики, в криогенных установках. Их изготавливают на частоты до 10 кГц. Мощности и частоты вращения таких генераторов весьма различны.

В индукторных генераторах поверхности роторов зубчатые, что способствует возникновению значительных зубцовых гармоник магнитного поля в зазоре. При возбуждении машины постоянным током (либо с помощью постоянных магнитов) магнитодвижущая сила обмотки возбуждения остается неизменной на каждом полюсном делении, но индукция магнитного поля в зубчатом зазоре постоянно изменяется. Индукция в зазоре, как известно, определяется произведением пространственной кривой распределения МДС (F_x) и пространственной

кривой магнитной проводимости зазора ($\lambda_{\delta x}$):

$$B_{\delta x} = F_x \lambda_{\delta x},$$

где магнитная проводимость зазора определяется как

$$\lambda_{\delta x} = \frac{\mu_0}{\delta_x}.$$

Здесь δ_x – зазор и этот зазор неравномерен в индукторной машине с по крайней мере односторонней зубчатостью.

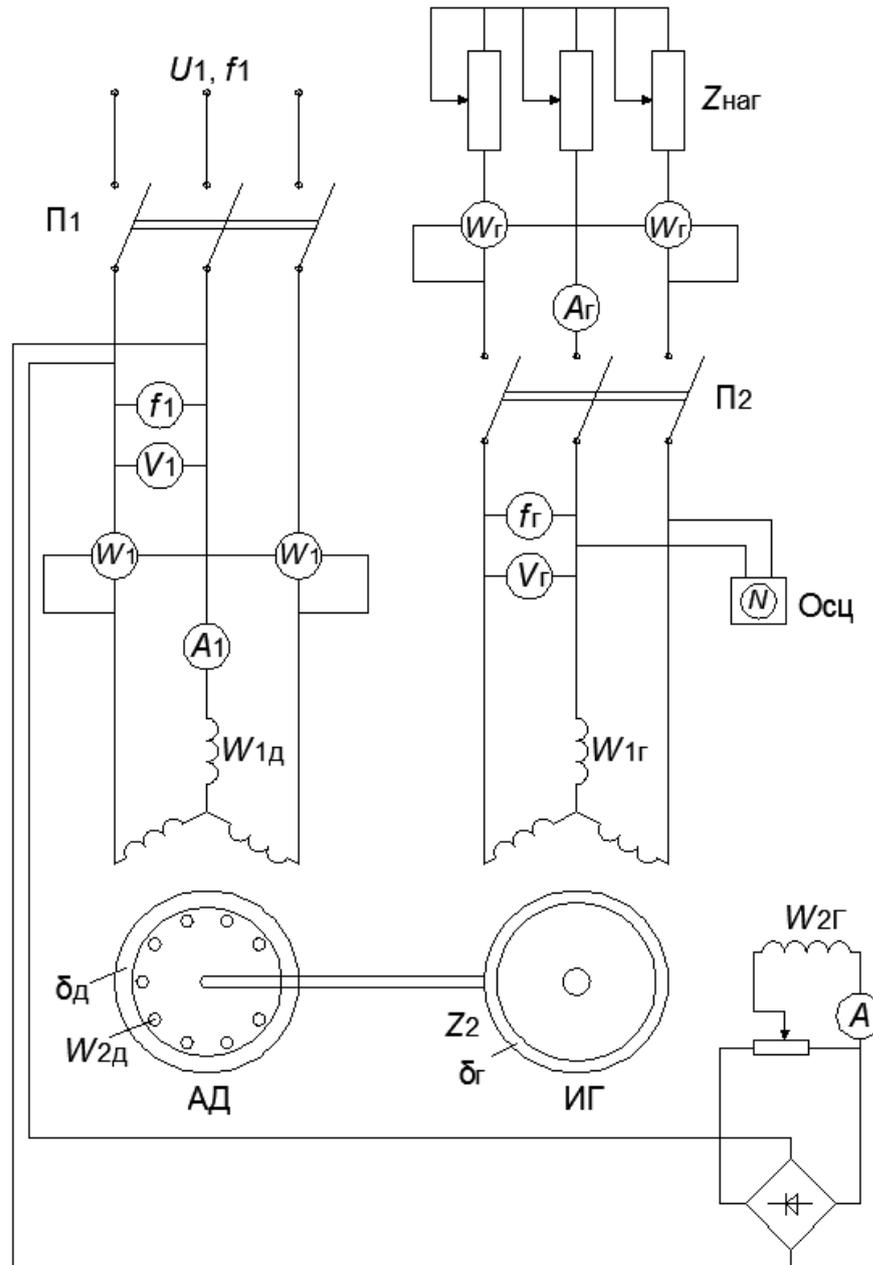


Рис. 1.1. Электрическая схема лабораторной установки для исследования характеристик индукторного генератора.

Пространственное изменение магнитной индукции $B_{\delta x}$ обусловлено зубчатой поверхностью ротора. Индукция над зубцом ротора оказывается большей величины, чем над пазом ротора. При вращении индукторного генератора приводным двигателем проводник секции статорной обмотки якоря оказывается поочередно либо в поле зубца, либо в поле паза ротора. Происходит изменение магнитной индукции, а значит, и потокосцепления проводника якоря и в нем индуцируется ЭДС. Причем, потокосцепление проводника изменяется с частотой перемещения зубцов ротора. Таким образом, частота индуцируемой в проводнике ЭДС f_r определяется числом зубцов Z_2 и частотой вращения ротора n_2 (об/мин)

$$f_r = \frac{Z_2 n_2}{60}.$$

Конструкция зубцовой зоны ротора и статора в индукторных генераторах может быть различна. На частоты до 3 кГц генераторы, как правило, выполняют с одной зубчатой поверхностью на роторе (статор может считаться гладким, если его обмотки расположены в закрытых или полужакрытых пазах с небольшими шлицами).

Для получения частот до 10 кГц и более поверхности как ротора, так и статора делаются зубчатыми с одинаковыми зубцовыми делениями. В последнем случае катушка якоря (одна, две или три) располагается в открытых пазах полюса, охваченного катушкой возбуждения. Зубцы "гребеночной зоны" статора располагаются так, чтобы они оказались над зубцами ротора на ширине одной катушки якоря, а затем на такой же ширине над пазами ротора. При повороте ротора на половину зубцового деления ротора расположение зубцов ротора относительно зубцов статора изменится на противоположное и поток, сцепленный с катушкой якоря, уменьшится до минимального значения. При вращении ротора происходит пульсация магнитного потока, сцепленного с катушкой якоря, и в ней индуцируется ЭДС. При этом суммарный магнитный поток полюса, охваченного катушкой возбуждения, остается неизменным. Поэтому в катушке возбуждения протекает только постоянный ток.

В исследуемом индукторном генераторе используется только одна зубчатая поверхность (на роторе). Частота изменения потокосцеплений катушек якоря (и частота наводимой ЭДС якоря) определяется числом зубцов ротора и частотой его вращения приводным двигателем:

$$f_r = \frac{Z_2 n_2}{60} = \frac{Z_2 n_1 (1-s)}{60} = \frac{48 \cdot 3000 \cdot (1-0.005)}{60} \approx 2400 \text{ Гц.}$$

Экспериментальные исследования

Исследуемым генератором, как было указано, является индукторный генератор на частоту $f_r = 2.4$ кГц. Перед началом исследований необходимо ознакомиться с конструкцией агрегата и паспортом машины, записать

паспортные данные в протокол испытаний. Схема испытания жестко смонтирована на стенде. Следует ознакомиться со схемой включения, расположением приборов на стенде и их пределами измерений и поставить пускатели и приборы в исходное положение. После этого с разрешения преподавателя можно осуществить пуск приводного асинхронного двигателя. Убедившись в нормальной работе агрегата, можно приступить к исследованию индукторного генератора.

Для начала следует установить такой ток возбуждения генератора (A_B), при котором вольтметр (V_G) покажет номинальное значение напряжения. Это будет номинальный ток возбуждения I_{2B} .

Затем следует снять характеристику ХХ генератора, изменяя ток возбуждения, записать значения напряжений и тока возбуждения. С целью снятия внешней и регулировочной характеристик следует подключить сопротивления нагрузки, включив пускатель П2. Внешние характеристики следует снимать при номинальном токе возбуждения I_{2B} , а также при $0,5I_{2B}$, и $1,2I_{2B}$. При снятии регулировочной характеристики следует поддерживать номинальное напряжение генератора U_G .

Обработка опытных данных

Построить характеристики: холостого хода и нагрузочную на одном графике, внешние характеристики на другом графике и отдельно регулировочную характеристику.

Сравнить характеристику индукторного генератора с характеристикой обычного синхронного генератора.

Сравнить энергетические показатели агрегата (КПД и $\cos\phi$) при нагрузке и холостом ходе. Поскольку в опыте были замерены значения мощностей генератора P_G и приводного двигателя P_D , то коэффициент полезного действия агрегата

$$\eta = \frac{P_G}{P_D}.$$

Сравнить полученные данные с КПД, найденным по паспортным данным.

По внешней характеристике необходимо вычислить процентное изменение напряжения при номинальном токе якоря.

Контрольные вопросы

1. Почему электрическое напряжение обмотки якоря индукторного генератора при увеличении тока возбуждения может уменьшаться?
2. Где располагается обмотка возбуждения и обмотка якоря в индукторном генераторе?
3. Каков принцип наведения (индуцирования) ЭДС в обмотке якоря индукторного генератора?

4. Чем определяется электрическая частота ЭДС обмотки якоря индукторного генератора?
5. Каковы конструктивные особенности зубцовых зон индукторных генераторов для частоты 3 кГц и частоты 10 кГц?
6. Какова конструкция и шаг секции обмоток якорей при одной и двух зубчатых поверхностях индукторного генератора?
7. Области применения индукторных генераторов.
8. Способы возбуждения индукторных генераторов.
9. Конструктивные отличия индукторного генератора от обычного синхронного генератора на частоту 10 кГц.

Литература

1. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: Учебник для вузов. Том 2.– М.: Издательство МЭИ, 2004.
2. Осин И.Л., Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств. - М.: Изд. МЭИ, 2003.

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАШИННОГО УСИЛИТЕЛЯ ПОПЕРЕЧНОГО ПОЛЯ

Генераторы постоянного тока могут применяться в системах автоматики для усиления мощности сигналов постоянного тока, получаемой от измерительных или управляющих элементов. Комбинация двух каскадно-включенных генераторов в одном агрегате позволяет получать очень большие коэффициенты усиления. А их реализация в одноякорном варианте существенно удешевляет конструкцию всего агрегата.

Целью настоящей работы является ознакомление с устройством, принципом действия электромашинного усилителя поперечного поля (ЭМУ) и исследование его основных характеристик.

Программа работы

1. Ознакомиться с устройством ЭМУ и его паспортными данными.
2. Снять характеристику холостого хода первой ступени усиления.
3. Снять характеристику холостого хода второй ступени усиления.
4. Снять результирующую характеристику холостого хода ЭМУ и зависимость поперечного тока от тока управления.
5. Снять внешние характеристики при различных степенях компенсации.
6. Снять характеристику регулирования при неизменном сопротивлении цепи нагрузки и разных степенях компенсации.

Обработка результатов эксперимента

1. На одном графике построить характеристику холостого хода первой ступени и зависимость поперечного тока от тока управления.
2. Оценить влияние реакции якоря от поперечного тока на магнитное поле, созданное обмоткой управления (определить отношение МДС F_{d2}/F_1).
3. На одном графике построить характеристику холостого хода второй ступени и результирующую характеристику холостого хода.
4. Определить коэффициенты насыщения магнитной системы ЭМУ по обеим осям и остаточное напряжение. Оценить влияние на эти величины первой ступени усиления.
5. На одном графике построить внешние характеристики и зависимости поперечного тока от тока нагрузки при различных степенях компенсации.
6. Определить процентное изменение напряжения ЭМУ при различных степенях компенсации и при номинальном токе выходной ступени.
7. При номинальной нагрузке определить коэффициент усиления первой ступени и результирующий коэффициент усиления.

8. Построить зависимость результирующего коэффициента усиления ЭМУ от степени компенсации.

9. Построить характеристики регулирования ЭМУ при различных степенях компенсации.

Экспериментальная часть

1. Рабочая схема для выполнения заданной программы приведена на рис.2.1. На стенде она собрана жестко, а переключение соответствующих режимов производится с помощью коммутационной аппаратуры. Привод ЭМУ осуществляется от асинхронного двигателя прямым пуском от сети. Такого рода привод обеспечивает практически постоянную частоту вращения при любых режимах ЭМУ.

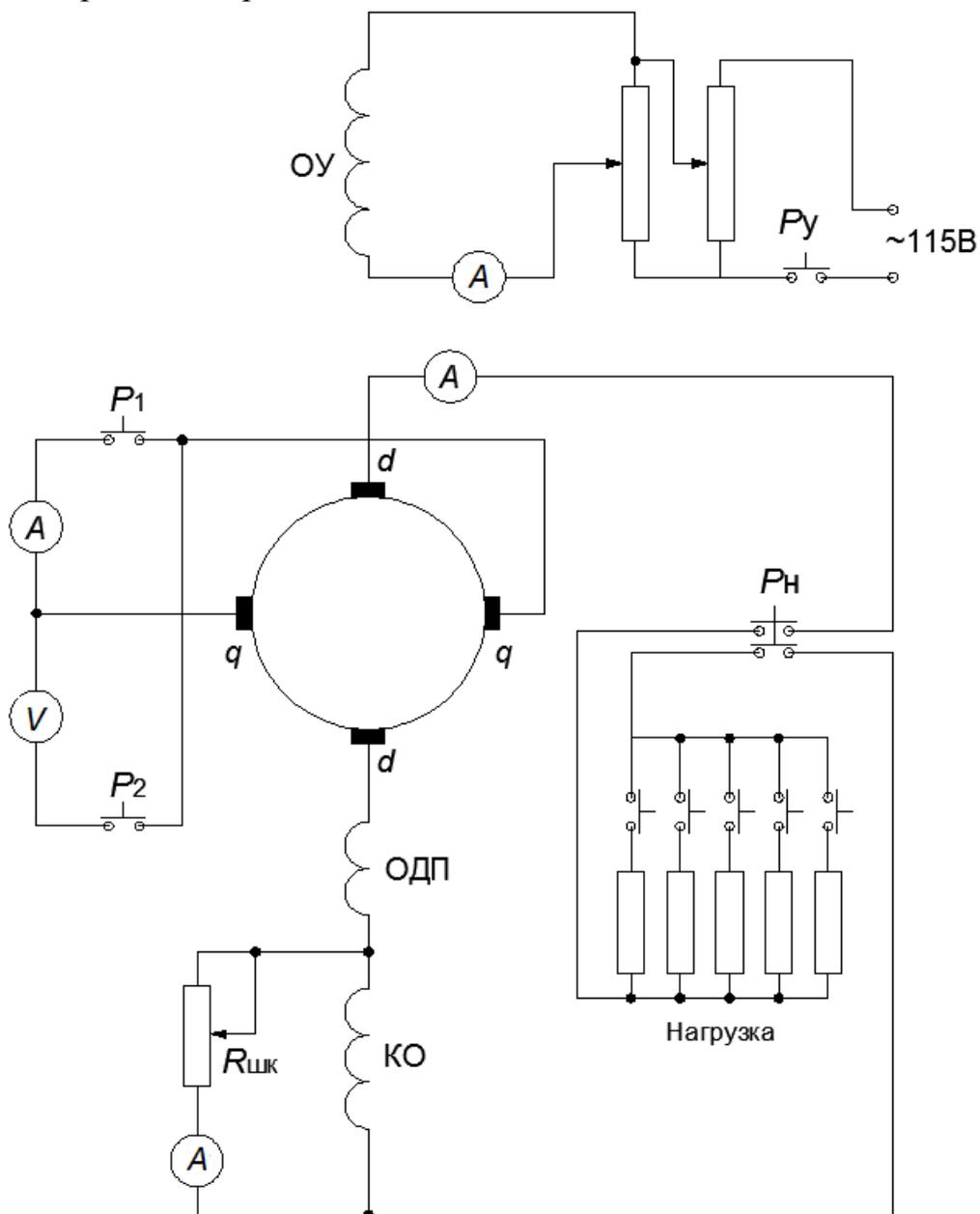


Рис. 2.1. Электрическая схема для исследования характеристик ЭМУ поперечного поля.

2. В ЭМУ поперечного поля использован двухступенчатый способ возбуждения. Для первой ступени усиления входной величиной (током возбуждения) является ток управления I_1 , выходной – ток I_2 в поперечной цепи. Для второй ступени входной величиной (током возбуждения) является ток I_2 , выходной – ток I_3 и напряжение U_3 . Этот способ возбуждения обеспечивает высокий коэффициент усиления поступающего в обмотку управления сигнала.

Для оценки магнитной системы данного ЭМУ снимают три характеристики холостого хода:

- а) характеристика холостого хода первой ступени
 $E_2 = f(I_1)$ при $I_2=0, I_3=0, n=Const$;
- б) характеристика холостого хода второй ступени
 $E_3 = f(I_2)$ при $I_3=0, n=Const$;
- в) результирующая характеристика холостого хода
 $E_3 = f(I_1)$ при $I_3=0, n=Const$.

Первая характеристика снимается при разомкнутых цепях поперечных и продольных щеток (см. схему на рис. 2.1). Вторая и третья характеристики, а также зависимость $I_2 = f(I_1)$ снимаются одновременно при разомкнутой цепи выходной ступени ($I_3=0$) и при изменении тока управления I_1 . Снимают 5-6 точек.

Снятие характеристик нужно начинать с наибольшего значения тока управления. Далее ток управления постепенно уменьшают до нуля, записывая показания приборов. Для получения характеристики, проходящей через начало координат, снятую характеристику смещают по оси абсцисс.

По результатам опытов строятся характеристики: холостого хода первой ступени и зависимость $I_2 = f(I_1)$ (рис. 2.2), холостого хода второй ступени (рис. 2.3), результирующая характеристика холостого хода (рис. 2.4).

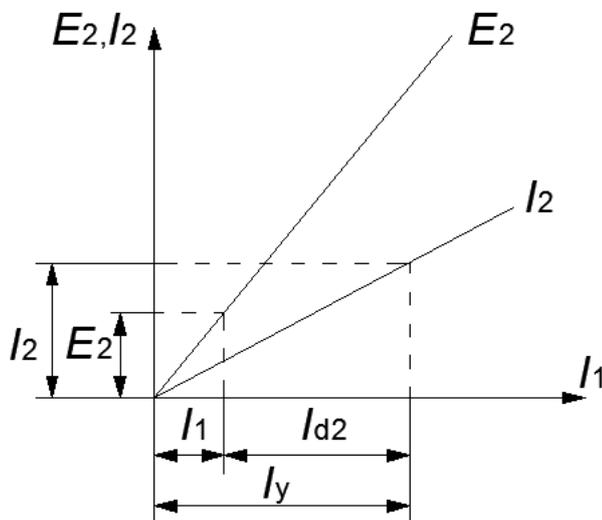


Рис. 2.2. Характеристика холостого хода первой ступени и зависимость $I_2 = f(I_1)$.

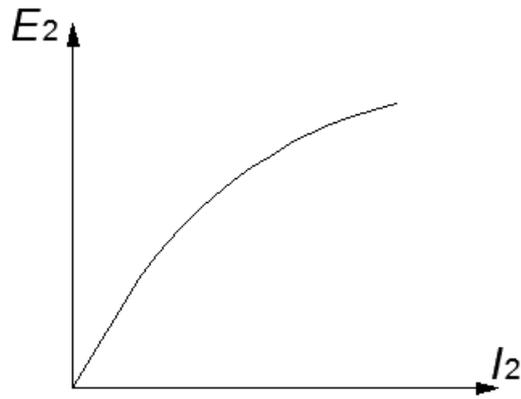


Рис. 2.3. Характеристика холостого хода второй ступени.

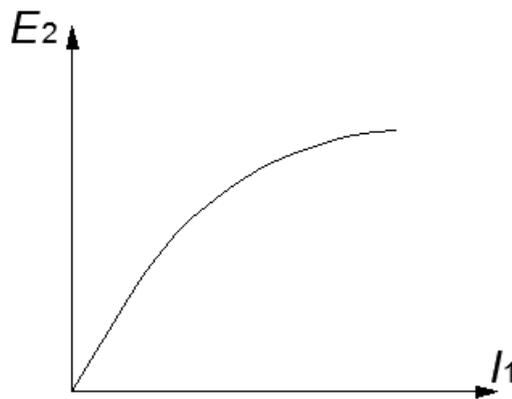


Рис. 2.4. Результирующая характеристика холостого хода.

3. Одной из важнейших эксплуатационных характеристик ЭМУ при работе его на сеть с переменным сопротивлением является внешняя характеристика, представляющая собой зависимость напряжения на выходе U_3 от выходного тока I_3 при постоянных значениях тока управления I_1 и частоты вращения. Внешние характеристики снимаются при замкнутой цепи поперечного тока.

Начинать снимать внешние характеристики следует от точки, когда $I_3=0$ (контактор P_n разомкнут). Изменяя ток управления I_1 , устанавливают выходное напряжение равным номинальному значению $U_{3ном}$. Ток управления, который при этом будет получен, в дальнейшем поддерживают постоянным.

Далее, замыкая контактор P_n и изменяя сопротивление нагрузки, снимают остальные точки внешней характеристики. При снятии внешних характеристик ток I_3 не следует увеличивать более (1,1 - 1,2) $I_{3ном}$. Внешние характеристики снимаются при трех степенях компенсации.

Степень компенсации характеризуется отношением МДС компенсационной обмотки к МДС реакции якоря по продольной оси

$$k_k = \frac{F_k}{F_{d3}}$$

При полной компенсации $k_k=1$, при недокомпенсации $k_k<1$, при перекомпенсации $k_k>1$. Степень компенсации устанавливается с помощью шунтирующего реостата $R_{шк}$. Полную компенсацию ($k_k=1$) устанавливают таким образом, чтобы при постоянных значениях тока управления и частоты вращения ток поперечной цепи I_2 оставался постоянным при изменении выходного тока I_3 .

При увеличении сопротивления шунтирующего реостата по сравнению с сопротивлением при полной компенсации возникает перекомпенсация, а при уменьшении – недокомпенсация.

Степень компенсации определяется из равенства

$$k_k = \frac{(I_3 - I_{шк})}{I_{пк}}$$

где $(I_3 - I_{шк})$ – ток компенсационной обмотки, $I_{пк}$ – ток компенсационной обмотки при полной компенсации.

Степень компенсации во всех случаях следует определять при одном и том же значении тока выходной цепи I_3 (например, при $I_3 = I_{3ном}$). После настройки компенсации следует заметить положение движка реостата $R_{шк}$. Целесообразно после настройки каждой степени компенсации кроме внешней характеристики снять и регулировочную характеристику.

Примерный вид характеристик $U_3 = f(I_3)$ и $I_2 = f(I_3)$ показан на рис. 2.5.

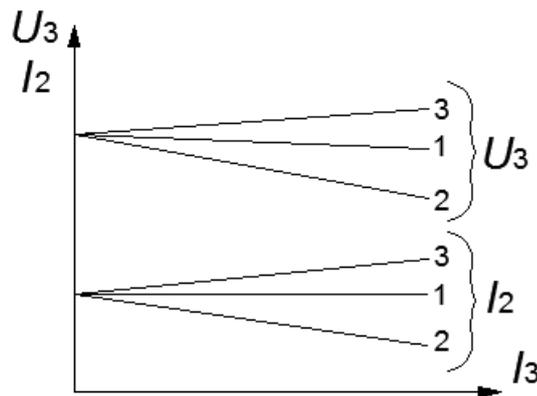


Рис. 2.5. Внешние характеристики ЭМУ и зависимость $I_2 = f(I_3)$.

4. При работе ЭМУ на нагрузку с постоянным сопротивлением (например, в качестве возбудителя) представляют интерес регулировочные характеристики, т.е. зависимость тока на выходе I_3 от тока управления I_1 при постоянном сопротивлении нагрузки $I_3 = f(I_1)$ при $R_{нг} = \text{Const}$.

Эти характеристики снимаются при тех же степенях компенсации, что и внешние характеристики.

Величина сопротивления нагрузочного реостата $R_{нг}$ устанавливается

такой, чтобы при номинальном выходном токе $I_{3\text{ном}}$ было номинальное напряжение $U_{3\text{ном}}$.

При снятии характеристик ток управления I_1 изменяется от нуля до максимального значения и обратно до нуля. Снимается 5-6 точек в каждом направлении.

Примерный вид регулировочных характеристик показан на рис. 2.6.

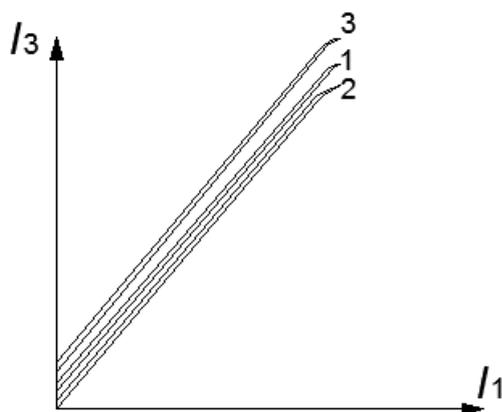


Рис. 2.6. Регулировочные характеристики ЭМУ.

Обработка опытных данных

1. Соотношение между результирующей МДС по продольной оси и продольной составляющей МДС реакции якоря от тока I_2 приближенно можно найти из совместного рассмотрения характеристики холостого хода первой ступени $E_2 = f(I_1)$ и характеристики $I_2 = f(I_1)$. Задавшись током I_2 по характеристике $I_2 = f(I_1)$ находят соответствующий ему ток управления (рис. 2.2). Ток I_y пропорционален МДС обмотки управления. Результирующую МДС по продольной оси при холостом ходе ЭМУ находят по ЭДС E_2

$$E_2 = I_2 R_2 + \Delta U_{щ2},$$

где R_2 – сопротивление поперечной цепи, $\Delta U_{щ2}$ – падение напряжения в щеточном контакте поперечной цепи. В первом приближении можно принять $\Delta U_{щ2} = 1-2$ В. Отложив E_2 на характеристике холостого хода первой ступени получают I_1 , пропорциональный МДС F_1 . Разница между I_y и I_1 равна току I_{d2} , пропорциональному МДС F_{d2} .

Как уже отмечалось, ЭМУ поперечного поля имеет две ступени усиления. Вследствие слабого насыщения магнитной системы влияние первой ступени на вторую в пределах до номинального напряжения незначительно. В этом можно убедиться, если сравнить коэффициенты насыщения при номинальном напряжении, рассчитанные по результирующей характеристике холостого хода и характеристике холостого хода второй ступени.

2. Выходное напряжение ЭМУ равно

$$U_3 = E_3 - I_3 \Sigma R_3,$$

где E_3 – ЭДС выходной ступени, ΣR_3 – сопротивление цепи якоря выходной ступени. Наклон внешних характеристик существенное влияние оказывает степень компенсации.

Процентное изменение напряжения ΔU определяется по внешним характеристикам.

Для оценки усилительных свойств ЭМУ определяется коэффициент усиления по мощности. Каждая ступень усиления характеризуется своим коэффициентом усиления. Коэффициент усиления первой ступени равен отношению мощности поперечной (короткозамкнутой) цепи P_2 к мощности обмотки управления P_1

$$k_{y1} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{I_2(I_2 R_2 + \Delta U_{щ2})}{I_1^2 R_y},$$

где R_y – сопротивление обмотки управления.

Коэффициент усиления второй ступени определяется отношением мощности на выходе ЭМУ P_3 и мощности поперечной цепи P_2

$$k_{y2} = \frac{P_3}{P_2} = \frac{U_3 I_3}{I_2(I_2 R_2 + \Delta U_{щ2})}.$$

Результирующий коэффициент усиления равен

$$k_{y3} = \frac{P_3}{P_1} = \frac{U_3 I_3}{I_1^2 R_y} = k_{y1} k_{y2}.$$

Коэффициенты усиления определяются при $I_3 = I_{3ном}$ по внешним характеристикам, снятым при трех степенях компенсации.

По внешним характеристикам находят соответствующие этому току выходное напряжение U_3 , ток поперечной цепи I_2 и ток управления I_1 . Рассчитав коэффициент усиления по вышеприведенным формулам, строят кривую зависимости результирующего коэффициента усиления от степени компенсации. Коэффициент усиления повышается при перекомпенсации и понижается при недокомпенсации.

Контрольные вопросы

1. Объясните принцип действия и устройство ЭМУ поперечного поля.
2. Каково назначение в ЭМУ второго комплекта щеток на коллекторе?
3. Что такое коэффициент усиления ЭМУ? За счет чего он достигает больших значений?
4. Объясните назначение каждого элемента рабочей схемы исследования ЭМУ.
5. Каково назначение в ЭМУ компенсационной обмотки?

6. Что такое степень компенсации ЭМУ? Как на нее можно влиять?
7. Какими мерами обеспечивается удовлетворительная коммутация продольных и поперечных щеток ЭМУ?
8. Дайте анализ характеристик холостого хода ЭМУ.

Литература

1. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины и микромашины. – М.: Высшая школа, 1981.

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Вентильно-индукторные двигатели стали очень популярны в последнее десятилетие благодаря своей управляемости. Наличие электронного коммутатора и обратной связи по положению ротора позволяет легко встраивать вентильно-индукторные машины в современные системы интеллектуального привода. Однако, сама электромашинная часть этого преобразователя несмотря на свою простоту очень сложна для проектирования и расчета. Невозможность свести электромагнитные процессы к известному круговому полю заставляет использовать полевые расчеты для анализа одного цикла коммутации.

Целью работы является определение минимального и максимального коэффициентов проводимости воздушного зазора для возбужденной фазы двигателя на основе расчета его магнитного поля в поперечном сечении машины.

Программа работы

1. Построить в среде программы численного расчета магнитного поля область поперечного сечения двигателя, задать свойства материалов.
2. Поместить ротор двигателя в рассогласованное положение относительно возбужденной фазы. Построить конечно-элементную сетку.
3. Рассчитать и задать плотности тока в катушках возбужденной фазы.
4. Рассчитать магнитное поле в поперечном сечении двигателя и определить рабочий поток возбужденной фазы.
5. Рассчитать коэффициент проводимости воздушного зазора и сравнить его с минимальным коэффициентом проводимости, полученным в типовом расчете по аналитической формуле. Найти погрешность аналитического расчета.
6. Поместить ротор двигателя в согласованное положение относительно возбужденной фазы. Построить конечно-элементную сетку, задать возбуждение.
7. Рассчитать магнитное поле в поперечном сечении двигателя и рассчитать на его основе коэффициент проводимости воздушного зазора.
8. Сравнить полученный из численного расчета коэффициент проводимости с максимальным коэффициентом проводимости, полученным в типовом расчете по аналитической формуле. Найти погрешность аналитического расчета.

Исходные данные

Исходными данными для выполнения работы являются результаты, полученные каждым студентом в своем варианте типового расчета.

Подготовительным этапом для данной лабораторной работы является выполнение типового расчета до момента окончательного получения геометрических размеров зубцов статора и ротора вентильно-индукторного двигателя.

Согласованным положением ротора вентильно-индукторного двигателя считается такое, при котором напротив возбужденного зубца статора располагается зубец ротора. В этом случае проводимость воздушного зазора между статором и ротором максимальна. Примерный вид линий поля при согласованном положении ротора показан на рис. 3.1.

В рассогласованном положении напротив возбужденного зубца статора располагается паз ротора. В этом случае проводимость воздушного зазора между статором и ротором минимальна. Примерный вид линий поля при рассогласованном положении ротора показан на рис. 3.2.

Порядок выполнения работы

В методическом пособии по типовому расчету вентильного индукторного двигателя для расчета коэффициентов максимальной и минимальной магнитной проводимости воздушного зазора используются аналитические формулы

$$\lambda_{\max}^A = \frac{b_{ZS}}{\delta} + \frac{4}{\pi} \ln \left(\frac{b_{ZR} - b_{ZS}}{2\delta} \right) + \frac{2}{\pi} \ln \left(\frac{2h_{ZR}}{b_{ZR} - b_{ZS}} \right) + 0,964;$$

$$\lambda_{\min}^A = \frac{b_{ZS}}{h_{ZR}} + \frac{4}{3} \left(\frac{h_{ZR} + b_{ZR}}{t_{ZR_MM} - b_{ZR} - b_{ZS}} \right),$$

где b_{ZS} , b_{ZR} – ширина зубцов статора и ротора; h_{ZR} – высота зубца ротора; t_{ZR} – зубцовое деление ротора, δ – воздушный зазор.

Эти формулы являются эмпирическими и, соответственно, не всегда обеспечивают высокую точность. Вместе с тем эти величины являются весьма важными для последующих расчетов, так как они определяют не только характеристики, но и мощность двигателя.

В связи с этим оценка погрешности аналитических формул является весьма важной.

Для более точного определения коэффициента магнитной проводимости воздушного зазора необходимо рассчитать магнитное поле в поперечном сечении двигателя при согласованном и рассогласованном положении ротора относительно возбужденной фазы.

Далее по разности векторных магнитных потенциалов A_1 и A_2 в точках, охватывающих рабочий магнитный поток Φ_{δ} , проходящий через зазор, определяют величину потока по формуле

$$\Phi_{\delta} = (A_2 - A_1)l_{\delta},$$

где l_{δ} – расчетная осевая длина сердечника двигателя.

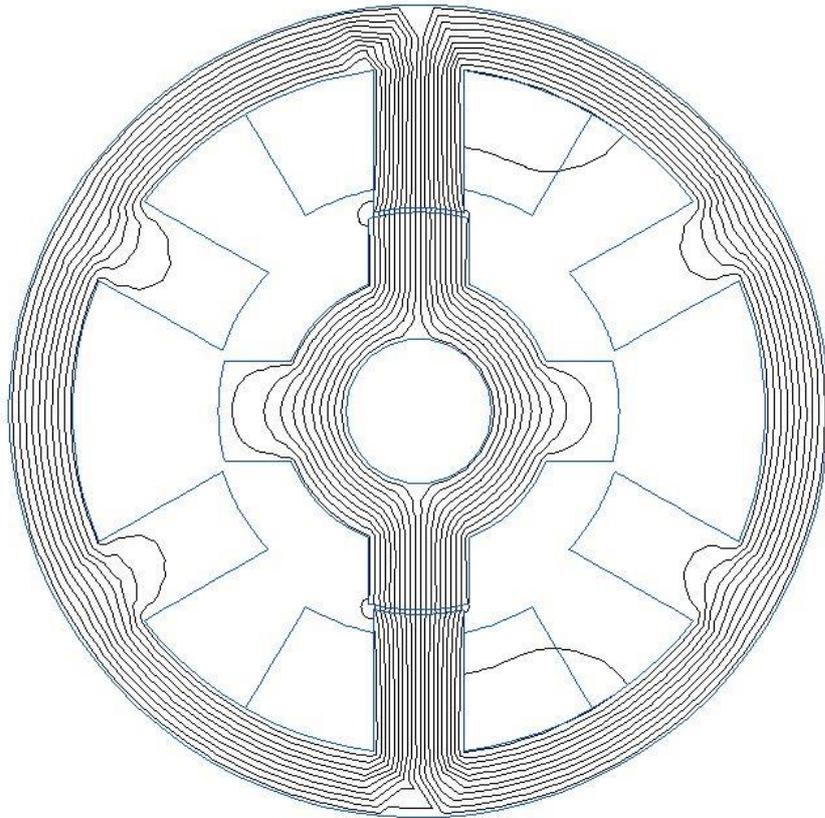


Рис. 3.1. Магнитное поле фазы вентильно-индукторного двигателя при согласованном положении ротора.

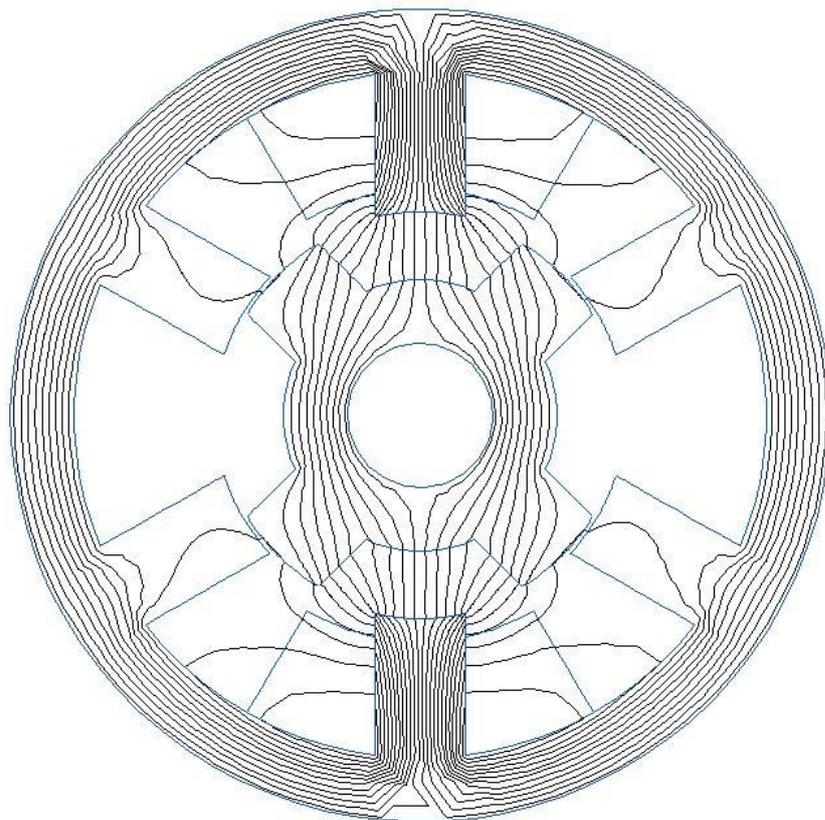


Рис. 3.2. Магнитное поле фазы вентильно-индукторного двигателя при рассогласованном положении ротора.

Затем рассчитывают коэффициент магнитной проводимости

$$\lambda_{\delta} = \frac{\Phi_{\delta}}{\mu_0 I_{\delta} F_{\delta}},$$

где μ_0 – магнитная проницаемость воздуха, Гн/м; F_{δ} – падение магнитного напряжения на величине воздушного зазора, равное в полевой задаче МДС катушки возбуждения (если пренебречь насыщением магнитной системы).

Полученные из численного расчета поля значения максимального и минимального коэффициентов магнитной проводимости зазора следует сравнить с соответствующими значениями, полученными по аналитическим формулам, и выразить погрешность в процентах:

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{\lambda^A - \lambda_{\delta}}{\lambda_{\delta}} \cdot 100\%.$$

Следует отметить, что при расчете магнитного поля для рассогласованного положения ротора относительную магнитную проницаемость стали сердечников можно принять постоянной и равной 10000. Это связано с тем, что при рассогласованном положении воздушный зазор между статором и ротором в области возбужденных зубцов очень большой и в связи с этим насыщение стали отсутствует. В случае согласованного положения ротора было бы интересно ввести в расчет реальную кривую насыщения стали, чтобы оценить влияние насыщения на величину проводимости.

При решении полевой задачи в области полного поперечного сечения машины задаются граничные условия Дирихле для векторного магнитного потенциала на внешнем диаметре сердечника статора $A = 0$. В некоторых конфигурациях можно уменьшить размерность задачи, если применить условия симметрии магнитного поля, воспользовавшись условиями Неймана или периодическими/антипериодическими граничными условиями.

При наложении сетки на область расчета важно обеспечить ее формирование с плавными переходами от крупной сетки к мелкой, так чтобы не было длинных и узких треугольных элементов. В воздушном зазоре по ширине должно укладываться не менее 3 конечных элементов. Выполнение таких требований по наложению сетки существенно влияет на точность результатов расчета.

Для численного расчета поля может быть использована программа конечно-элементного анализа FEMM, свободно распространяемая в интернете (см., например, ссылку <http://www.softpedia.com/get/Science-CAD/FEMM.shtml>).

Контрольные вопросы

1. В чем заключается важность точного определения коэффициента минимальной проводимости воздушного зазора вентильного индукторного двигателя?
2. Что означает согласованное и рассогласованное положение ротора вентильного индукторного двигателя?
3. Чему равно падение магнитного напряжения в зазоре электрической машины при возбуждении одной фазы?
4. Чем отличается коэффициент магнитной проводимости зазора от собственно проводимости зазора?
5. Что такое векторный магнитный потенциал? Дать определение.
6. Что такое граничные условия Дирихле для векторного магнитного потенциала? Что такое граничные условия Неймана?
7. Какое допущение подразумевается при задании граничного условия Дирихле на внешней границе сердечника статора?
8. Почему для численного расчета поля в случае рассогласованного положения ротора можно принять относительную магнитную проницаемость стали равной 10000?
9. В чем особенность построения сетки для данной задачи?

Литература

1. Фисенко В.Г., Попов А.Н. Проектирование вентильных индукторных двигателей. Методическое пособие. – М.: Изд-во МЭИ, 2005.