электронный научно-технический журнал
ИНЖЕНЕРНЫЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51036. ISSN 2307-0595

Адаптация обобщенной модели электрической машины индуктивного типа к изучению принципов электромеханического преобразования энергии с помощью лабораторного макета

10, октябрь 2014

Степанов А. В., Баранов Е. Н.

УДК: 621.313(075.8)

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана
stepanov.bmstu@gmail.com

Электромеханические преобразователи – это обширный класс устройств, в которых преобразование электромагнитной энергии в механическую и обратно – существенная и полезная сторона изучаемого явления. В практике современного инженера количество электромеханических устройств, с проектированием и применением которых ему приходиться иметь дело, в последнее время увеличивается. При этом возрастает потребность в электромеханических устройствах особых типов (линейные и волновые электродвигатели, машины с вентильной коммутацией, шаговые электродвигатели, моментные датчики, устройства электромагнитного подвеса и др. [1 – 3].

Разнообразие конструктивных решений электромеханических преобразователей создает трудности при изучении студентами этого типа устройств, что усугубляется тем обстоятельством, что различные электромеханические преобразователи обычно изучаются в рамках различных технических дисциплин.

Между тем понятно, что с точки зрения сущности электромагнитных процессов на самом деле во всех случаях используется принцип действия электрической машины индуктивного типа, технически реализованный уже в классических электрических машинах – синхронной, асинхронной и постоянного тока. Заложенные в них принципы создания электродвижущих и электромагнитных сил используются, в конечном счете, в самых экзотических конструкциях. Все разница, например, в том, что в классических машинах электромагнитные силы используются для создания крутящего момента ротора, в линейных двигателях – линейной движущей силы, а в волновых – для создания радиальных сил, растягивающих или сжимающих упругий элемент.

Таким образом, становится понятной необходимость изучения электромеханических явлений в электрических машинах с общих позиций, на основе обобщенной модели [3 – 5], и одновременно с использованием интегральных понятий теории электрических и маг-

нитных цепей, изучаемых ранее студентами [1, 2]. Такой подход обеспечивает понимание сущности работы весьма различных по конструкции и назначению устройств. На основе этого подхода можно объяснить принцип действия и основные особенности любой классической электрической машины (кроме, пожалуй, униполярной). Однако подобный обобщённый подход к теоретическому изучению электромеханических преобразователей энергии пока ничем не подкреплен с практической стороны. Лабораторная база обычно формируется на основе серийных конструкций, которые демонстрируют скорее не общность, а различие в принципах действия подобных устройств. Было бы крайне желательно предварительно изучить общие свойства любого электромеханического преобразователя, в том числе и на лабораторной модели обобщённой электрической машины индуктивного типа. В основу такой модели можно положить упомянутый выше обобщенный преобразователь, разумеется, с некоторыми конструктивными дополнениями.

Целью работы является создание методики, позволяющей с единых позиций изучать основные принципы работы электрических машин различного типа на лабораторном макете. Этот лабораторный макет должен удовлетворять следующим требованиям.

- Конструкция должна быть предельно простой и в силу этого иметь на роторе и статоре минимально необходимое число обмоток.

- Активная зона электрической машины (магнитопровод с обмотками) должна оставаться неизменной при демонстрации принципа действия электрической машины любого типа. Все изменения в лабораторной установке должны сводится к внешним коммутациям зажимов обмоток и замене источников питания.

- Концы всех обмоток должны быть выведены на общую коммутационную панель для простоты необходимых переключений. Для вывода обмоток ротора должны быть предусмотрены скользящие контакты.

1. Структура лабораторного макета обобщённого электромеханического преобразователя

На рис. 1 схематически изображен обобщенный электромеханический вращающийся преобразователь с четырьмя обмотками, удовлетворяющий поставленным условиям. Внешняя неподвижная часть – статор и внутренняя подвижная – ротор выполнены в виде одноосных цилиндров из ферромагнитного шихтованного материала. В пазах помещены обмотки C_1 и C_2 статора с магнитными осями, сдвинутыми в пространстве на 90 градусов, с токами i_1 и i_2 соответственно. Обмотки статора, в отличие от изображенных на рис. 1, лучше выполнить распределенными. Подобная же система обмоток P_1, P_2 с токами i_3 и i_4 расположена на роторе. Картину взаимного расположения обмоток ротора и статора, изображенную на рис. 1, будем в дальнейшем считать соответствующей выбранному началу отсчета во времени ($t = 0$) для всех электромеханических процессов.

Единственное возможное перемещение в системе – это вращение ротора вокруг оси. В этом случае в качестве пространственной координаты следует выбрать угловое перемещение – угол поворота ротора α, отсчитываемый относительно некоторой оси. Такой осью отсчета считаем неподвижную горизонтальную ось, проходящую через центр вращения ротора, которая, в частности на рис. 1 совпадает с направлением магнитной оси обмотки статора C_1. На рис. 1 показаны также направления токов в обмотках для $t = 0$, которые в дальнейшем считаем положительными.

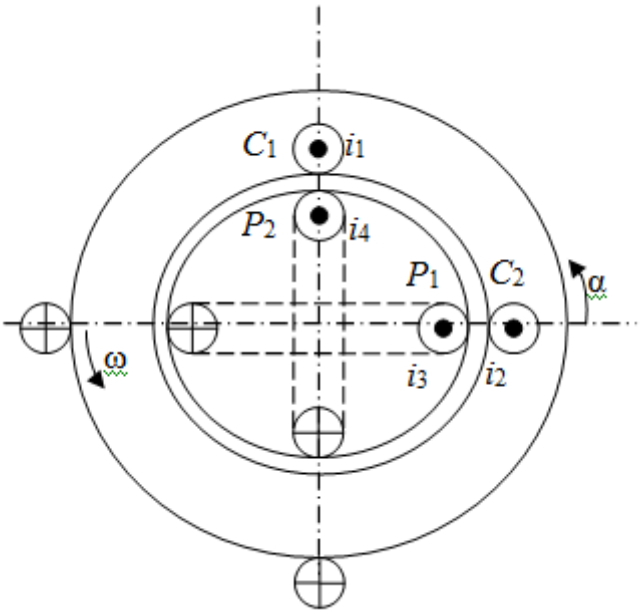

Рис. 1. Вращающийся электромагнитный преобразователь

На рис. 2 изображена электрическая схема лабораторной установки. Концы обмоток статора и ротора выведены на коммутационную панель с зажимами 1 – 8 (обмотки ротора - через скользящие контакты СК). Предусмотрено включение последовательно со всеми обмотками небольших (1 – 2 Ом) сопротивлений R_1 – R_4 для наблюдений картины токов и их измерений.

Преобразователь должен быть снабжен датчиком углового положения ротора (ДПР). В качестве нагрузочного устройства может использоваться дисковый электромагнитный тормоз или машина постоянного тока в режиме генератора. В комплект входят в также электронный коммутатор (ЭК) и источник постоянного тока (ИПТ). Электронный коммутатор выполняет функции источника двухфазного переменного тока регулируемой частоты, который может управляться как по сигналам ДПР, так и внешним органом управления.

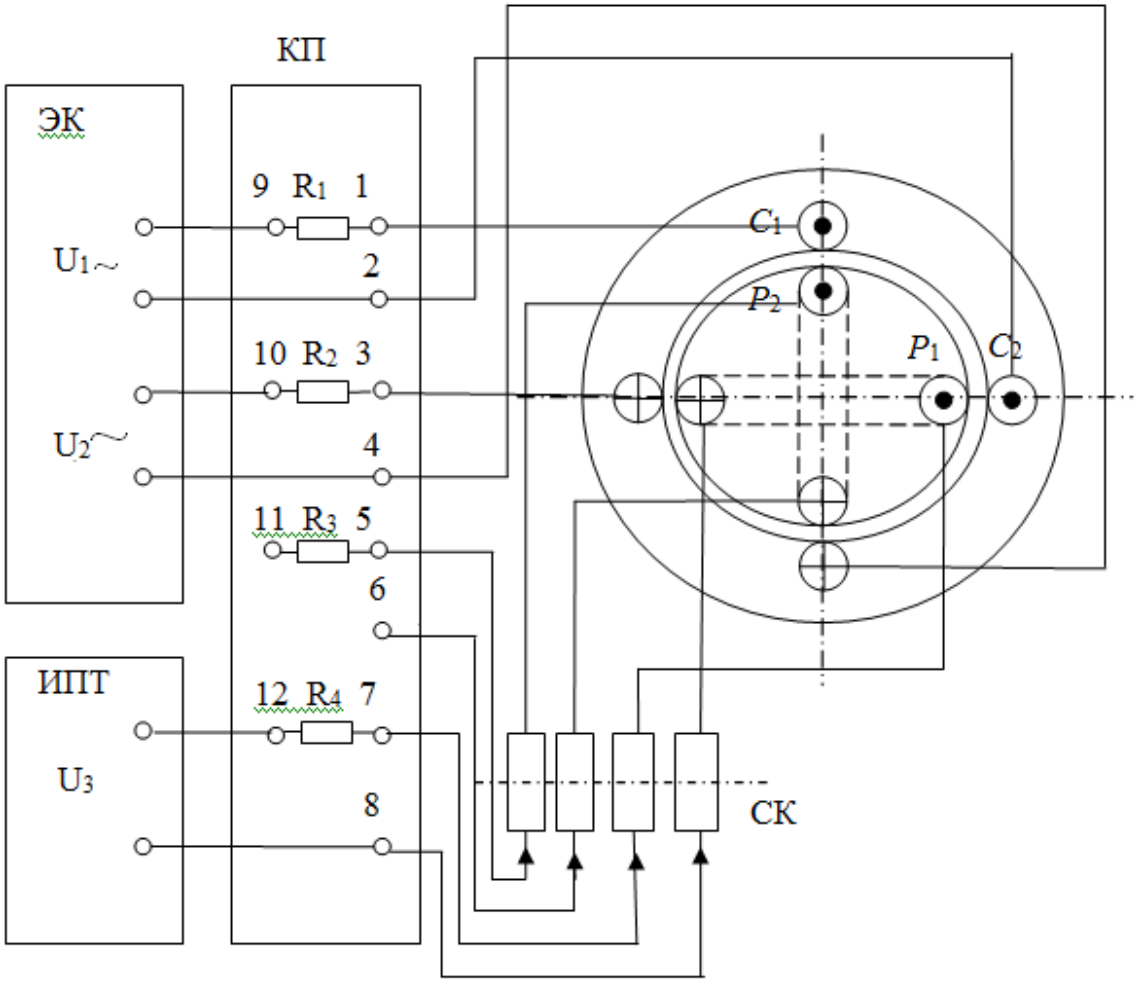

Рис. 2. Принципиальная схема лабораторной установки

2. Электромагнитный момент обобщённого электромеханического преобразователя

Рассчитаем электромагнитный крутящий момент машины методом возможных перемещений, в основе которого лежит анализ баланса энергии в электромеханических системах [1]. Такая система при отсутствует вращение ротора превращается в статическое устройство – линейную электрическую цепь. Это условие выполняется при отсутствии насыщения в магнитной цепи машины. В целом же такая электромеханическая система будет сугубо нелинейной, так как электромагнитные силы и ЭДС перемещения в общем случае зависят от произведений переменных.

Электромагнитный момент преобразователя с четырьмя обмотками в общем случае равен

$$T = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_1(\alpha)}{d\alpha} + \frac{1}{2} i_2^2 \frac{dL_2(\alpha)}{d\alpha} + \frac{1}{2} i_3^2 \frac{dL_3(\alpha)}{d\alpha} +$$

$$+\frac{1}{2}i_4^2\frac{dL_4(\alpha)}{d\alpha}+\frac{1}{2}i_1 i_2\frac{dM_{12}(\alpha)}{d\alpha}+\frac{1}{2}i_1 i_3\frac{dM_{13}(\alpha)}{d\alpha}+$$

$$+\frac{1}{2}i_1 i_4\frac{dM_{14}(\alpha)}{d\alpha}+\frac{1}{2}i_2 i_3\frac{dM_{23}(\alpha)}{d\alpha}+\frac{1}{2}i_2 i_4\frac{dM_{24}(\alpha)}{d\alpha}+\frac{1}{2}i_3 i_4\frac{dM_{34}(\alpha)}{d\alpha} \qquad (1)$$

Здесь T – электромагнитный момент преобразователя, L_1, L_2, L_3, L_4 - собственные индуктивности обмоток с токами i_1, i_2, i_3, i_4, M_{12}, …, M_{34} – коэффициенты взаимоиндукции обмоток. Из (1) следует, что любая составляющая электромагнитного момента существует лишь тогда, когда есть токи в соответствующих обмотках и если коэффициенты самоиндукции и взаимоиндукции изменяются при повороте ротора. Если электрическая машина является неявнополюсной, то индуктивности обмоток ротора и статора постоянны. Если в конструкции электрической машины ротор и статор выполнены в виде цилиндров с равномерным зазором между ними (рис.1), то индуктивности обмоток ротора и статора постоянны и не зависят от угла поворота ротора. Следовательно,

$$\frac{dL_1(\alpha)}{d\alpha}=0,\quad \frac{dL_2(\alpha)}{d\alpha}=0,\quad \frac{dL_3(\alpha)}{d\alpha}=0,\quad \frac{dL_4(\alpha)}{d\alpha}=0.$$

В дальнейшем будем рассматривать только основной момент, характерный для всех видов электрических машин классического исполнения. Следует учесть еще, что в устройстве с равномерным воздушным зазором коэффициенты взаимоиндукции взаимно неподвижных обмоток (двух на статоре и двух на роторе) не зависит от угла поворота ротора, поэтому

$$\frac{dM_{12}(\alpha)}{d\alpha}=0,\quad \frac{dM_{34}(\alpha)}{d\alpha}=0.$$

Таким образом, имеем

$$T=\frac{1}{2}i_1 i_3\frac{dM_{13}(\alpha)}{d\alpha}+\frac{1}{2}i_1 i_4\frac{dM_{14}(\alpha)}{d\alpha}+\frac{1}{2}i_2 i_3\frac{dM_{23}(\alpha)}{d\alpha}+\frac{1}{2}i_2 i_4\frac{dM_{24}(\alpha)}{d\alpha}, \qquad (2)$$

Принципы действия всех основных типов классических машин могут быть проиллюстрированы, на основе обобщенной модели, работой рассматриваемого четырехобмоточного преобразователя. В таком случае разница в принципах действия машин разного типа можно объяснить только различными законами изменения во времени токов i_1, …, i_4 в обмотках.

3. Реализация основных типов электрических машин на основе обобщенного электромеханического преобразователя

Синхронная машина. Рассмотрим теперь так называемый режим синхронного вращения электромеханического преобразователя.

В этом режиме используется одна обмотка ротора, называемая обмоткой возбуждения и питаемая через скользящие контакты от источника постоянного тока. Можно использовать только одну обмотку P_1 и P_2, но для увеличения крутящего момента соединить последовательно обмотки P_1 и P_2. Чтобы не вводить новых обозначений, будем считать обмотку P_2 разомкнутой ($i_4 = 0$). В таком случае, учитывая (2), получим

$$T(\alpha) = \frac{1}{2} i_1 i_3 \frac{dM_{13}(\alpha)}{d\alpha} + \frac{1}{2} i_2 i_3 \frac{dM_{23}(\alpha)}{d\alpha}. \quad (3)$$

Токи в обмотках статора C_1, C_2 питаются от двухфазного источника и равны

$$i_1 = I_m \sin(\omega t + \psi), \quad (4)$$

$$i_2 = I_m \sin(\omega t + \psi + \pi/2). \quad (5)$$

Здесь ω – угловая частота токов, ψ – начальная фаза тока i_1, в сущности определяющая, какие значения имеют токи i_1, i_2 в момент $t = 0$, т. е. при начальном положении обмотки ротора P_3, показанном на рис. 1. При этом пусть соблюдается следующее условие: угловая частота ω токов i_1, i_2 равна угловой скорости ω вращения ротора (один оборот ротора за один период переменного тока). В этом случае в соотношении

$$\alpha = \omega t \quad , \quad (6)$$

величину α можно понимать и как пространственный угол поворота ротора. Факторы, обеспечивающие подобное синхронное вращение, пока не рассматриваются.

Вычислим составляющие основного электромагнитного момента. Проанализируем предварительно соотношения $dM_{13}(\alpha)/d\alpha$, $dM_{23}(\alpha)/d\alpha$, определяющие электромагнитный момент (3). Если за начальное положение ротора принято положение по рис. 1, то коэффициент $M_{13}(\alpha) = 0$ в начальный момент времени. При вращении против часовой стрелки максимум будет достигнут после поворота ротора на угол $\alpha = \pi/2$, причем включение обмоток будет согласным. Таким образом, имеем

$$M_{13}(\alpha) = M_{max} \sin\alpha. \quad (7)$$

Аналогичные рассуждения приводят к результату

$$M_{23}(\alpha) = M_{max} \sin(\alpha + \pi/2). \quad (8)$$

Положительные значения коэффициентов соответствуют согласному включению обмоток, отрицательные – встречному включению.

Тогда, с учетом (7), (8), первая составляющая электромагнитного момента, обусловленная взаимодействием обмотки ротора P_1 с обмоткой статора C_1 равна

$$T_{13}(\alpha) = i_1 i_3 \frac{dM_{13}(\alpha)}{d\alpha} = i_1 i_3 M_{max} \cos(\alpha) = I_m i_3 M_{max} \sin(\alpha + \psi) \cos(\alpha) =$$

$$= \frac{1}{2} i_3 I_m M_{max} \sin(\psi) + \frac{1}{2} i_3 I_m M_{max} \sin(2\alpha + \psi). \quad (9)$$

Таким образом момент $T_{13}(\alpha)$ имеет постоянную составляющую, не зависящую от протранственной координаты – угла поворота ротора α и переменную составляющую, изменяющуюся синусоидально в функции двойного пространственного угла 2α, или, иначе,

изменяющуюся с двойной частотой 2ω по сравнению с частотой переменного тока в обмотке статора, поскольку, согласно (6), $2\alpha = 2\omega t$.

Среднее значение (постоянная составляющая момента) равна

$$T_{13\text{ср}} = \frac{1}{2} i_3 I_m M_{\max} \sin(\psi) \tag{10}$$

Величина (10), зависит от величины постоянного тока i_3 в обмотке ротора, амплитуды I_m переменного тока i_1 в обмотке статора, а также определяется значением начальной фазы ψ тока i_1. Момент принимает максимальное по модулю значение, если $\psi = \pm\pi/2$, и равно нулю, если $\psi = 0$.

На рис. 3 приведены графики электромагнитных процессов такого двухобмоточного преобразователя (обмотку C_2 можем пока считать разомкнутой) в функции пространственного угла α. Эти процессы можно одновременно рассматривать и как процессы во времени, так как $\alpha = \omega t$, причем, в режиме синхронного вращения ω = const. Графики момента $T_{13}(\alpha)$ построены для двух значений $\psi = 0$ и $\psi = \pi/2$. В первом случае момент является знакопеременным, в среднем за оборот равным нулю. Во втором случае среднее за период значение момента максимально.

Подобный двухобмоточный преобразователь является простейшей однофазной синхронной электрической машиной. Она способна создавать крутящий момент и может использоваться в качестве электродвигателя. Однако ее момент имеет большую переменную составляющую, а при некоторых пространственных положениях ротора вообще равен нулю.

Вычислим теперь вторую составляющую основного электромагнитного момента (3), обусловленную взаимодействием обмотки ротора P_1 и обмотки статора C_2:

$$T_{23}(\alpha) = i_2 i_3 \frac{dM_{23}(\alpha)}{d\alpha} = i_2 i_3 M_{\max} \cos(\alpha + \pi/2) =$$

$$= i_3 I_m M_{\max} \sin(\alpha + \psi + \pi/2) \cos(\alpha + \pi/2) =$$

$$= \frac{1}{2} i_3 I_m M_{\max} \sin(\psi) + \frac{1}{2} i_3 I_m M_{\max} \sin(2\alpha + \psi + \pi) =$$

$$= \frac{1}{2} i_3 I_m M_{\max} \sin(\psi) - \frac{1}{2} i_3 I_m M_{\max} \sin(2\alpha + \psi). \tag{11}$$

Суммирование, согласно (3), первой (9) и второй (11) составляющей момента приводит к следующему важному результату:

$$T(\alpha) = T_{13}(\alpha) + T_{23}(\alpha) = i_3 I_m M_{\max} \sin(\psi). \tag{12}$$

Таким образом, в соответствии с формулой (12), наличие второй обмотки статора не только удваивает среднее значение электромагнитного момента, но и приводит к взаимной компенсации переменных составляющих моментов $T_{13}(\alpha)$ и $T_{23}(\alpha)$, так что $T(\alpha)$ = const.

Введем понятие линии геометрической нейтрали. Это линия, проходящая через центр вращения ротора и перпендикулярная магнитной оси обмотки возбуждения. На рис.

1 эта линия в начальный момент времени совмещена с горизонтальной осью. Но поскольку обмотка возбуждения вращается вместе с ротором, в данной конструкции вращающейся является, и линия нейтрали машины.

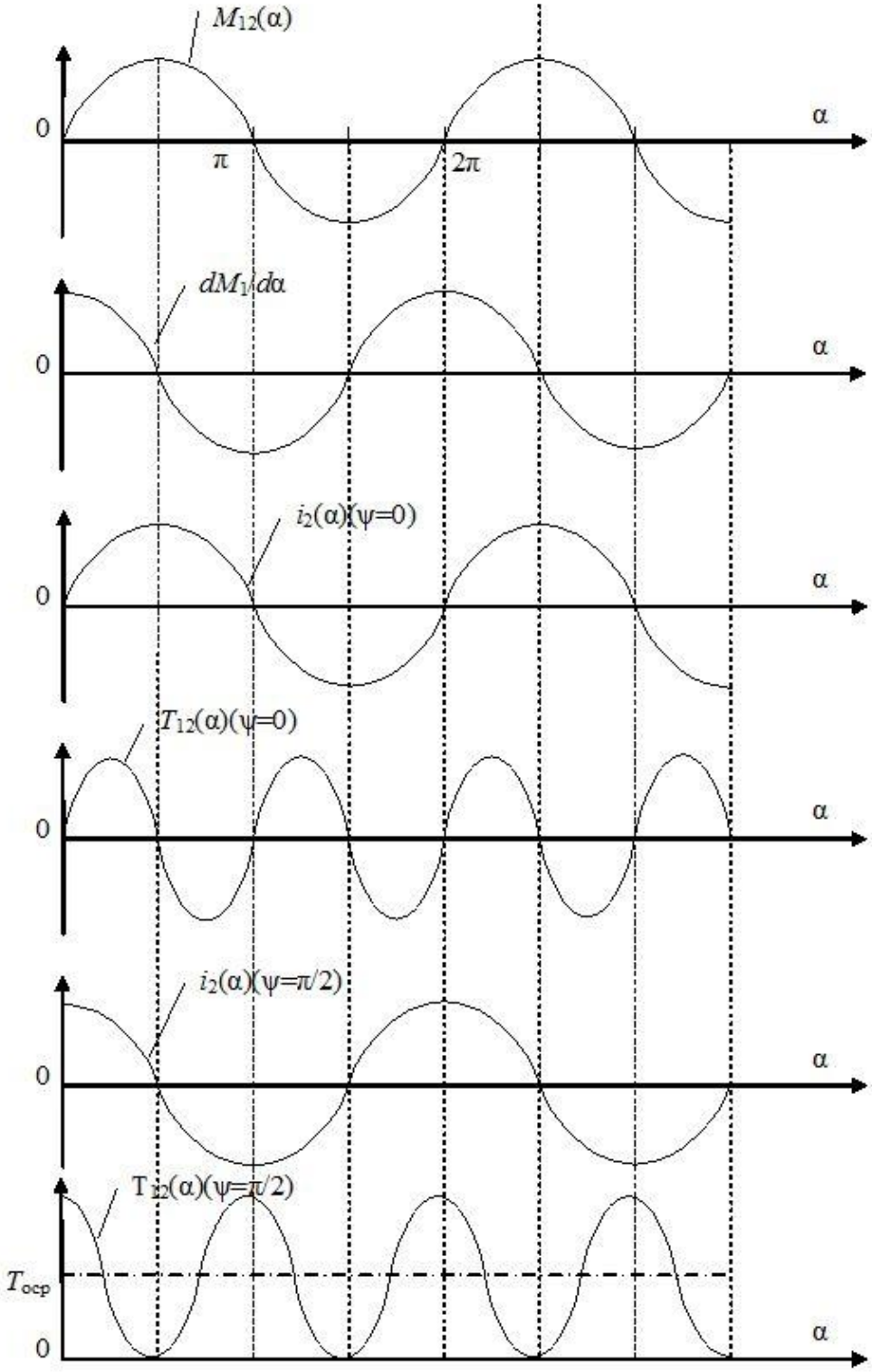

Рис. 3. Графики электромагнитных процессов двухобмоточного преобразователя

Поскольку время одного оборота ротора в режиме синхронного вращения соответствует периоду переменных токов i_1, i_2, значению угла ψ в формулах (9 – 11) можно дать вполне определенное пространственное толкование.

Действительно, согласно рис. 1, в момент $t = 0$ обмотка ротора и обмотка статора с током i_1 взаимно перпендикулярны. Если изменение направления тока i_1 произойдет именно в момент времени ($\psi = 0$, $i_1 = 0$ при $t = 0$), то, согласно (10), среднее значение момента взаимодействия этих обмоток равно нулю. Если же ток принимает значение, равное нулю, в тот момент времени, когда ротор успеет повернуться на четверть оборота (за четверть периода переменного тока), то среднее значение момента будет наибольшим. В случае максимального момента ток i_1 следует считать изменяющимся по закону $i_1 = I_m\sin(\omega t+\psi)$, где $\psi = \pi/2$. Таким образом, наиболее благоприятные моменты времени для изменения направления тока i_1 (в дальнейшем будем называть их моментами коммутации) – это моменты совпадения магнитных осей обмотки ротора и обмотки статора (или, иначе, - это моменты совмещения плоскости обмотки статора с линией геометрической нейтрали). Этот вывод справедлив для каждой секции обмотки статора в конструкции многообмоточной машины.

До сих пор мы рассматривали процессы в электромеханических преобразователях в терминах теории электрических цепей, используя такие интегральные понятия, как электрический ток, коэффициенты самоиндукции и взаимоиндукции. Эти же процессы могут быть объяснены с позиций теории электромагнитного поля.

Анализ работы двухобмоточного преобразователя показывает, что он может развивать крутящий момент, в среднем за оборот ротора не равный нулю, уже при условии взаимодействия вращающегося магнитного поля обмотки возбуждения с пульсирующим полем единтвенной обмотки статора, но только в режиме синхронного вращения.

В конструкции с двумя обмотками статора, пространственно сдвинутыми на 90 градусов, с токами i_1, i_2, сдвинутыми по фазе на 90 электрических градусов, эти две неподвижные обмотки создают, как известно, суммарное магнитное поле, вращающееся в пространстве (т. е. относительно статора) со скоростью

$$\omega_{\text{П}} = \omega \quad = 2\pi f \quad (1/\text{c}). \tag{13}$$

Таким образом, в режиме синхронного вращения магнитные поля обмоток ротора и статора вращаются с одинаковыми скоростями (13), т. е. взаимно неподвижно относительно друг друга.

В выражении для основного электромагнитного момента (12) угол ψ рассматривался ранее, как начальная фаза второго тока равная $\psi = \pi/2$. Но углу ψ можно дать новое, пространственное толкование, считая, что $\psi = \theta$ пространственный угол между магнитными осями полей ротора и статора:

$$T \quad = i_3 I_m M_{\max} \sin(\theta).$$

Взаимодействие взаимно неподвижных магнитных полей ротора и статора в режиме синхронного вращения является, в сущности, непременным условием функционирования

не только классической синхронной машины, работу которой мы до сих пор и рассматривали, но и любой другой машины индуктивного типа. Разница между ними состоит только в том, каким техническим способом обеспечивается этот режим синхронного вращения. Различие между указанными способами приводит, конечно, к существенным отличиям в конструкции тех или иных устройств, но не затрагивает сущности происходящих в них электромеханических процессов.

Рассмотрим возможные способы создания вращающихся магнитных полей ротора и статора (рис. 4). В классической синхронной машине (рис.4а) магнитное поле ротора неподвижно относительно ротора ($\omega_{пр} = 0$) и вращается в пространстве вместе с ним. Следовательно, режим синхронного вращения полей ротора и статора возможен лишь в том случае, если скорость ротора $\omega_р$ равна скорости вращения магнитного поля статора $\omega_п$, а последняя жестко определяется частотой токов в обмотке статора (13), т. е. частотой источника питания.

Рис. 4. Варианты реализации режима синхронного вращения в электрических машинах индуктивного типа

Реализация указанных соотношений угловых скоростей принципиально возможна в двух вариантах. В первом случае обмотки статора питаются от двух фазного (или трехфазного) источника с фиксированной частотой (классическая синхронная машина). Магнитное поле статора вращается в пространстве с постоянной скоростью $\omega_п$ = const. Но тогда и $\omega_р = \omega_п$ = const, следовательно, режим синхронного вращения возможен только при единственной (синхронной) скорости, до которой ротор необходимо так или иначе разогнать («втянуть в синхронизм»). Здесь применен простейший способ коммутации токов в обмотках статора – питание обмоток переменным током («естественная коммутация»).

Соединения обмоток с источниками питания на рис. 2 соответствуют этому режиму. «Втягивание в синхронизм» можно осуществить медленным и плавным увеличением частоты ЭК от минимальной до номинальной (внешнее управление) при полной разгрузки ротора.

Вентильная электрическая машина. Однако, ничего не меняя в конструкции машины, можно поставить задачу обеспечения синхронного вращения полей ротора и статора при любой скорости ротора, а именно: пусть ротор вращается с любой скоростью, но

«ведет» за собой поле статора, т. е. управляет его скоростью, заставляя источник питания вырабатывать систему переменных токов необходимой в каждом случае частоты, так что по-прежнему $\omega_{пр} = 0$, $\omega_р = \omega_п$, но тогда $\omega_п = var$ (рис.4б). В этом случае любая скорость ротора во всем диапазоне ее изменения будет синхронной. Здесь необходима уже искусственная коммутация токов в обмотках статора, которая осуществляется электронным, коммутатором по сигналам датчика углового положения ротора (ДПР) всякий раз, когда проводники той или иной обмотки статора оказываются на линии геометрической нейтрали машины. Частота переключений токов здесь определяется скоростью вращения ротора.

Такой двигатель можно назвать синхронным двигателем с самосинхронизацией (или короче «вентильным электродвигателем»). Этот двигатель не обеспечивает постоянства скорости вращения при различных моментах нагрузки, но не требует и «втягивания в синхронизм», так как для него любая скорость является синхронной.

Машина постоянного тока. Теперь представим себе, что внутренняя часть машины (бывший ротор) закреплена неподвижно, а внешняя часть (бывший статор) способна вращаться. Произведено так называемое обращение машины. В этом новом устройстве индуктор с обмоткой возбуждения P_1 неподвижен, неподвижна и линия геометрической нейтрали машины. Обмотки C_1, C_2 расположены на новом, внешнем роторе и вращаются вместе с ним под действием электромагнитного момента. Каждый раз, когда проводники одной из двух обмоток пересекают линию геометрической нейтрали машины, в обмотке должен коммутироваться (изменять направление) ток. Эту принудительную коммутацию может осуществлять, как электронный коммутатор, так и традиционный электромеханический (коллектор). В таком случае магнитное поле внешнего ротора неподвижно в пространстве. Но при этом неподвижно и магнитное поле возбуждения, создаваемое индуктором.

Таким образом, реализуется третий вариант «синхронного вращения» полей ротора и статора, когда их скорости в пространстве одновременно равны нулю (рис.4в). Но если ротор вращается со скоростью $\omega_р$, а создаваемое его обмотками поле неподвижно в пространстве, значит, оно вращается относительно ротора со скоростью ротора, но в противоположном направлении ($\omega_{пр} = -\omega_р$). Это вращение и обеспечивает коммутатор, управляющий переключением токов в обмотках ротора.

В сущности, ничего не меняя в конструкции электромеханического преобразователя, мы получили уже машину в варианте двигателя постоянного тока, причем электромеханические процессы, а также и механическая характеристика такой машины не отличаются от того, что имеет место в вентильном электродвигателе.

Традиционный двигатель постоянного тока имеет конструкцию с внутренним ротором. Но поскольку конструкции обмоток ротора и статора нашего электромеханического преобразователя совершенно идентичны (рис.1), видоизменить конструкцию в нужном направлении не представляет труда. Сделав внешнюю часть машины снова неподвижной (статор), а внутреннюю вращающейся (ротор), мы можем в качестве обмотки возбуждения использовать, например, обмотку C_2 (вместо P_2), а обмотки P_1, P_2 использовать в качестве

обмоток ротора. Для этого необходимо присоединить обмотки ротора P_1, P_2 к клеммам 1, 2 и 3, 4 коммутационной панели (рис. 2), а одну из обмоток статора (или обе, соединенные последовательно) – к клеммам 7, 8. Активная часть такой машины уже и конструктивно ничем существенным не отличается от классической машины постоянного тока. Ничем не отличаются и характеристики такой машины от характеристик, с одной стороны – вентильного электродвигателя, с другой _ классической машины постоянного тока. По сравнению с вентильным электродвигателем конструкция классической машины постоянного тока является обращенной. Единственная трудность ее реализации в комплексе с электронным коммутатором и ДПР, заключается в необходимости соединения выходных клемм коммутатора с концами коммутируемых вращающихся обмоток. Для этого потребуется, в простейшем случае, четыре скользящих контакта, предусмотренные в конструкции предлагаемого электромеханического преобразователя (рис. 2).

Асинхронная машина. Рассмотрим, наконец, последний вариант синхронного вращения полей ротора и статора (рис.4г), реализованный в конструкции асинхронной машины. Обмотки статора C_1, C_2 питаются, как и в случае классической асинхронной машины, от источника двухфазного переменного тока фиксированной частоты и создают в пространстве вращающееся с постоянной скоростью $\omega_п$ = const магнитное поле статора. Возможность для ротора вращаться с любой скоростью, при том что создаваемое его обмотками магнитное поле будет вращаться со скоростью магнитного поля статора $\omega_п$ = const, реализуется лишь в том случае, если поле ротора будет вращаться относительно ротора со скоростью $\omega_{пр} = \omega_п - \omega_р$. Тогда $\omega_р + \omega_{пр} = \omega_п$. Так как скорость вращения магнитного поля, созданного системой обмоток, относительно той части машины, на которой эти обмотки располагаются, определяется частотой токов в обмотках (13), необходимо питать эти обмотки m – фазной (в нашем случае двухфазной) системой токов с частотой $\omega_п - \omega_р$, где $\omega_п$ = const. Как, известно, эта задача решена в конструкции асинхронного электродвигателя с короткозамкнутами обмотками ротора, которая представляет собой динамический трансформатор, в котором осуществляется электромагнитная передача энергии через воздушный зазор со статора на ротор во всех случаях, когда скорость вращения ротора отличается от скорости вращения магнитного поля статора, т. е. в режиме асинхронного вращения. Уникальность асинхронной машины состоит в том, что магнитные поля ротора и статора вращаются одновременно и относительно ротора, и относительно статора. Взаимодействие этих полей и определяет возникновение электромагнитного крутящего момента.

В предложенном устройстве создание системы двух короткозамкнутых обмоток ротора достигается замыканием накоротко клемм 5, 6, и 7, 8 на коммутационной панели (рис. 2), с одновременным отключением обмоток ротора от источника постоянного тока.

Заключение

В статье обосновано применение простейшего четырехобмоточного электромеханического преобразователя энергии в качестве универсальной лабораторной модели электрической машины индуктивного типа, что открывает новые методические возможности при изучении различных типов электрических машин. При наличии вспомогательного оборудования (источники постоянного и переменного тока, коммутатор, управляемый датчиком углового положения ротора, измерительные приборы), имеется возможность моделирования основных электромеханических процессов и характеристик четырех типов электрических машин: синхронной машины, машины постоянного типа, вентильной и асинхронной. При этом никаких конструктивных изменений в активной зоне такой обобщенной машины при переходе с одного режима на другой не требуется.

Показано, что основные физические модели, объясняющие процессы силового взаимодействия ротора и статора для всех типов машин одинаковы. Все типы машин в своей работе подчиняются некоторым общим фундаментальным требованиям, и лишь механизмы реализации этих требований отличаются в деталях. Подобный подход должен способствовать более качественному усвоению необходимого объема знаний в области электромеханического преобразования энергии и более уверенной ориентации в разнообразных конструкциях современных электрических машин.

Список литературы

1. Уайт Д., Вудсон Г. Электромеханическое преобразование энергии / Пер. с анг. / М.: Энергия, 1964. 528 с.
2. Шмитц Н., Новотный Д. Введение в электромеханику /Пер. с анг./ М.: Энергия, 1969. 336 с.
3. Овчинников И.Е. Теория вентильных электрических двигателей. Л.: Наука, 1985. 164 с.
4. Баранов Е.Н. Принципы и устройства электромеханического преобразования энергии. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1983. 36 с.
5. Постников И.М. Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин. М.: Высш. шк. 1975. 319 с.