УДК 621.31:537.63

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ЭДС ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ ДИСКАХ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

© 2022 г. А. Р. Лепешкин^{1, 2,} *, А. Б. Кувалдин¹, Ю. Ю. Захаров¹, О. И. Ильинская², М. А. Федин¹, А. О. Кулешов¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)", Москва, Россия

> **E-mail: lepeshkin.ar@gmail.com* Поступила в редакцию 18.04.2022 г. После доработки 13.05.2022 г. Принята к публикации 23.05.2022 г.

Разработан метод исследования ЭДС во вращающихся дисках в электромагнитном поле постоянных магнитов. Приведены результаты исследований сигналов ЭДС и их спектров во вращающихся дисках из разных металлических сплавов в электромагнитном поле постоянных магнитов. Предложенный метод можно использовать для исследований ЭДС во вращающихся небольших дисках в электромагнитном поле постоянных магнитов.

DOI: 10.31857/S0367676522090162

введение

В связи с использованием постоянных магнитов в моделировании нагрева вращающихся деталей [1-3] представляются актуальными работы по исследованию ЭДС вихревых токов во вращающихся дисках в электромагнитном поле, созданном сильными постоянными магнитами. В случае вращения магнитов относительно неподвижного диска также будут возникать вихревые токи в диске и приводить к его нагреву.

Следует также отметить, что известны работы по электродинамике вращающихся тел [4–7], которые показывают важное фундаментальное и прикладное значение проведения исследований в этой области.

С начала 20 в. неоднократно различными исследователями [4, 5] при различном уровне техники эксперимента были проведены попытки изучить так называемое "электрическое поле вращающегося магнита". Изначально идея таких исследований восходит к представлениям М. Фарадея о силовых линиях магнитного поля. Он полагал, что силовые линии есть реально существующие образования в пространстве вокруг магнитов, создаваемые самими магнитами, и, соответственно, при перемещении магнита перемещаются вместе с ним. Действительно, перенося магнит с места на место мы переносим и его "магнитное поле". Вращение является частным случаем механического движения и, следовательно, при осевом

вращении цилиндрического аксиально намагниченного магнита линии магнитного поля также вращаются вместе с магнитом. В таком случае силовые линии, пересекая неподвижный в лабораторной системе пробный заряд, создают силовое действие, аналогичное силе Лоренца, возникающей тогда, когда движущийся заряд пересекает силовые линии магнитного поля. Проводником является при таком подходе магнит или диэлектрик значения не имеет. Фарадеем был впервые в мире построен так называемый "униполярный генератор", создающий ЭДС во вращающемся диске, снабженном скользящими контактами, один из которых расположен на оси вращающегося магнита, а второй на его ободе. Такой генератор и сегодня довольно широко используется в технике. Многочисленные опыты, проведенные с генератором Фарадея, подтвердили идею "вращающегося" магнитного поля. Принцип работы униполярного генератора достаточно подробно описан в книгах И.Е. Тамма, Р. Фейнмана, Л.Д. Ландау и Е.М. Лившица, а также других авторов.

Эксперименты с униполярным генератором и со скользящими контактами с целью выяснить, вращается электромагнитное поле или нет, проводят до сих пор [7]. Некоторые ученые, например, Кеннард и Барнетт [5] и другие отказались от скользящих контактов и замкнутых электрических цепей, исследуя электрическое поле вращающегося магнита, чтобы избежать погрешностей эксперимента. Для этого им пришлось перейти от

техники измерения электрических токов в замкнутой цепи к измерению разности электрических потенциалов в разомкнутой цепи. т.е. перейти от техники гальванометрии к технике электрометрии. Кеннард (в статье 1912 г.), проводя свой опыт не смог обнаружить отклонение электрометра при вращении магнита, хотя его расчеты по теории Вебера показывали, что электрометр должен отклоняться. Заявленная чувствительность электрометра составляла доли милливольта. Барнетт критиковал его методику измерений, доказывая, что она ошибочна. Кроме того, на упрощенной схеме Кеннарда не показан ряд важных деталей установки, в частности, не показан электростатический экран вокруг магнита (без этого экрана электрометр увидит только обычное Кулоновское поле, возникающее в силу неизбежной трибоэлектрической зарядки вращающегося магнита и окружающего его воздуха). Сам Барнетт (в статье 1913 г.), годом позже, провел электрометрические опыты с двумя электродами, находящимися внутри цилиндрического вращающегося электромагнита, и обнаружил, что при вращении электродов разность потенциалов на них возникает, а при вращении магнита – нет. Он также использовал некое "защитное кольцо", которое он упоминает в описании, но его расположение и полключение к схеме неизвестно. Возможно оно было заземлено в схеме. Это могло играть решающее значение для результатов опыта, когда не было зарегистрировано электрическое поле вращающегося магнита. Некоторые прямые измерения потенциального электрического поля вращающихся магнитов, выполненные в начале прошлого века, дали нулевой результат [5]. Исключение составляет лишь эксперимент Вильсонов (в статье 1913 г.) с вращающимся магнитным диэлектриком [4], когда было зарегистрировано электрическое поле вращающегося магнитного диэлектрика.

Столетие спустя ученые в работе [6] повторили опыт Барнетта на современной элементной базе с использованием полевых транзисторов в чувствительных электрометрах, усовершенствовав его, для проведения исследований потенциального электрического поля вращающегося магнита. Магнит приводился во вращение асинхронным электродвигателем с частотой 1470 об./мин. Кроме того, в их опыте [6] использовались по 2 кольцевых электрода, размещенных на различном расстоянии от магнита и не сообщалось ни о каких электростатических экранах между магнитом и электродами. Как будет показано ниже, даже и в этом случае можно получить ложноотрицательный результат. Однако экспериментаторы получили однозначные результаты. Им удалось установить не только факт наличия электрического поля вращающегося магнита, но и то, что это поле убывает квадратично с расстоянием. Более того, оно не зависит от объема вращающегося

магнита, а зависит только от его магнитного момента, что ставит под сомнение выводы некоторых исследователей, базирующихся на представлениях теории относительности. Проведенные эксперименты подтверждают, что снаружи от вращающегося магнита (по крайней мере вблизи его экваториальной плоскости) есть электрическое поле, что согласуется с экспериментами Вильсонов [4].

В работе [7] проводились исследования параметров электромагнитного поля, созданном постоянными магнитами, в котором вращался металлический диск со скользящими контактами без исследования его количественных характеристик ЭДС от вихревых токов. Однако в работе [7] в другом эксперименте не было зарегистрировано электромагнитное поле в случае вращающегося магнита, т.е. были допущены ошибки, соответствующие экспериментам Кеннарда и Барнетта в начале века.

В целом, анализ работ в исследуемой области показал, что отсутствуют детальные исследования ЭДС в дисках, вращающихся в электромагнитном поле, созданном постоянными магнитами.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью данной работы являлась разработка метода и устройства для исследования ЭДС (вихревых токов) во вращающихся дисках в электромагнитном поле постоянных магнитов.

В указанной цели новизна работы состоит в исследовании сигналов ЭДС и их спектров во вращающихся дисках из разных металлических сплавов в электромагнитном поле постоянных магнитов при быстром увеличении частоты вращения и затем при постепенном снижении частоты вращения от максимального до минимального значения с проведением кратковременных экспериментов без применения скользящих колец и токосъемников. Причем. результаты исследований сигналов ЭДС и их спектров в нескольких вращающихся дисках можно получить с использованием многоканального анализатора спектра сразу в одном эксперименте при одинаковых условиях вращения в электромагнитном поле, созданного постоянными магнитами. Это обеспечивает сравнение результатов исследований ЭДС дисков из разных металлических сплавов, вращающихся в электромагнитном поле постоянных магнитов. Анализ указанных исследований позволит получить более полную физическую информацию об ЭДС (вихревых токов) во вращающихся дисках и для совершенствования методов их нагрева в электромагнитном поле постоянных магнитов [1].

ЭДС от вихревых токов наводится при вращении диска в магнитном поле, создаваемом постоянным магнитом, в соответствии с законом электромагнитной индукции Фарадея. На небольшой



Рис. 1. Устройство для проведения исследований ЭДС во вращающихся дисках (ротора).

частоте вращения указанная ЭДС мала. При увеличении частоты вращения увеличивается скорость изменения (пульсации) магнитного потока в диске, и наведенная ЭДС от вихревых токов становится значимой в диапазоне больших частот вращения.

В данной работе для исследования указанной ЭДС было создано устройство (рис. 1), которое содержит вращающийся ротор (трехслойный диск) и алюминиевый крепежный диск с 8 сильными постоянными магнитами, которые ранее использовались при исследованиях на разгонном стенде [1], на котором использовался ртутный токосъемник, имеющий лучшие измерительные характеристики по точности по сравнению с известными контактными и бесконтактными токосъемниками. Сильные постоянные магниты с размерами $60 \times 30 \times 20$ мм изготовлены из самарий-кобальтового сплава и имеют рабочую температуру до 300° С.

Вращающийся ротор диаметром 250 мм содержит диск из намотанного изолированного медного провода, состоящий из 24 витков, тонкий диск

из нержавеющей стали толщиной 0.1 мм, тонкий диск из алюминиевого сплава толщиной 0.3 мм. К кажлому лиску были полключены по лва соелинительных провода (первый провод к ободной части, второй провод к внутреннему отверстию вблизи оси вращения). Между каждым диском были установлены тонкие изолирующие прокладки, исключающие электрические контакты. Собранный ротор из трех дисков на металлический оси был установлен с зазором 20 мм по отношению к внешней плоскости магнитов. Ось ротора (трехслойного диска) совпадала с центром отверстия алюминиевого крепежного диска, на котором находились сильные постоянные магниты. Жгут из шести соединительных проводов от лисков был закреплен на металлической оси и проходил через отверстие крепежного алюминиевого диска с постоянными магнитами и далее подключался к многоканальному низкочастотному анализатору спектра МІС-200. Указанный жгут из тонких гибких соединительных проводов легко скручивался при вращении трехслойного ротора. Это позволило обеспечить проведение кратковременных экспериментов с вращением ротора и исследовать одновременно ЭДС в трех дисках с помощью анализатора спектра MIC-200 сразу в одном эксперименте при наводимых вихревых токах от сильных постоянных магнитов без применения специальных токосъемников. Устройство для проведения исследования ЭДС во вращающихся дисках по разработанному методу приведено на рис. 1.

Для проведения исследований ротор резко приводился во вращение, потом постепенно тормозился и в течении этого времени (нескольких секунд) регистрировалась ЭДС во вращающихся трех дисках в одном эксперименте с использованием многоканального анализатора спектра MIC-200.

Полученные зависимости ЭДС во времени в проведенном эксперименте показаны на рис. 2.



Рис. 2. Сигналы ЭДС при вращении: *1* – диск из медного провода, *2* – диска из алюминиевого сплава, *3* – диска из нержавеющей стали.



Рис. 3. Спектры сигналов ЭДС при вращении в эксперименте: *1* – спирального проводника из медного сплава, *2* – диска из алюминиевого сплава, *3* – диска из нержавеющей стали.

После обработки сигналов были получены их спектры в проведенных экспериментах. На рис. 3 представлены спектры сигналов в эксперименте.

Анализ сигналов рис. 3 показывает, что сигнал ЭДС в диске 1 из медного провода имеет более синусоидальную форму по сравнению с сигналами в сплошных дисках 2 (из нержавеющей стали) и 3 (из алюминиевого сплава). гле преобладают высшие гармоники. Из анализа спектров на рис. 3 следует, что частоты первой гармоники в дисках 1, 2 и 3 соответственно равны 7, 12 и 7 Гц. Кроме того, из анализа рис. 3 на повышенных частотах вращения (в некотором диапазоне частот вращения) диск 1 (рис. 1) из медного провода можно использовать в качестве датчика частоты вращения. С использованием этого обстоятельства и анализа спектров (первых гармоник) было получено, что максимальная частота вращения в эксперименте составляла 420 об./мин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны метод и устройство для исследования ЭДС во вращающихся дисках в электромагнитном поле постоянных магнитов. Указанные постоянные магниты были изготовлены из самарий-кобальтового сплава.

Приведены результаты исследований сигналов ЭДС и их спектров во вращающихся дисках из разных металлических сплавов в электромагнитном поле постоянных магнитов. В частности, указанные результаты исследований получены при быстром увеличении частоты вращения и затем при постепенном снижении частоты вращения от максимального до минимального значения с проведением кратковременных экспериментов без применения скользящих колец и токосъемников. Причем, данные результаты исследований сигналов ЭДС и их спектров в нескольких вращающихся дисках получены с использованием многоканального низкочастотного анализатора спектра сразу в одном эксперименте при одинаковых условиях вращения в электромагнитном поле, созданного постоянными магнитами. Это обеспечило сравнение результатов исследований ЭДС дисков из разных металлических сплавов, вращающихся в электромагнитном поле постоянных магнитов.

Анализ проведенных исследований позволил получить более полную физическую информацию об ЭДС (вихревых токов) во вращающихся дисках и для совершенствования методов их нагрева в электромагнитном поле постоянных магнитов.

Предложенный метод можно использовать для исследований ЭДС во вращающихся небольших дисках в электромагнитном поле постоянных магнитов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Лепешкин А.Р., Кувалдин А.Б., Ильинская О.И. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 11. С. 1532; Lepeshkin A.R., Kuvaldin A.B., Ilyinskaya O.I. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 11. P. 1195.
- 2. Лепешкин А.Р., Ильинская О.И., Кувалдин А.Б., Лепешкин С.А. // Изв. РАН. Энергетика. 2020. № 2. С. 112.
- 3. Kuvaldin A.B., Lepeshkin S.A., Lepeshkin A.R. // Acta Technica CSAV. 2014. V. 59. No. 3. P. 279.
- 4. Weber T.A. // Amer. J. Phys. 1997. V. 65. No. 10. P. 946.
- 5. Kholmetskii A.L. // Amer. J. Phys. 2003. V. 71. P. 558.
- 6. *Тимофеев В.Б., Тимофеева Т.Е.* // Вест. СВФУ им. М.К. Аммосова. 2012. Т. 9. № 2. С. 24.
- 7. Родин А.О. // Электричество. 1994. № 7. С. 67.

Method for studying EMF in rotating disks in the electromagnetic field of permanent magnets

A. R. Lepeshkin^{*a*, *b*, *, A. B. Kuvaldin^{*a*}, Y. Y. Zakharov^{*a*}, O. I. Ilyinskaya^{*b*}, M. A. Fedin^{*a*}, A. O. Kuleshov^{*a*}}

^a National Research University "MPEI", Moscow, 111250 Russia ^b Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993 Russia *e-mail: lepeshkin.ar@gmail.com

A method for studying EMF in rotating disks in the electromagnetic field of permanent magnets has been developed. The results of studies of EMF signals and their spectra in rotating disks made of various metal alloys in the electromagnetic field of permanent magnets are presented. The proposed method can be used to study the EMF in rotating small disks in the electromagnetic field of permanent magnets field of permanent magnets.