

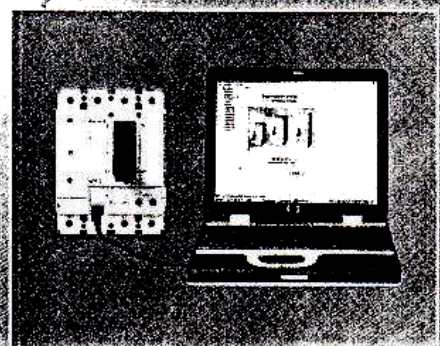
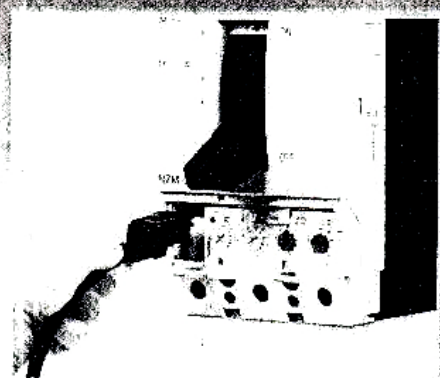
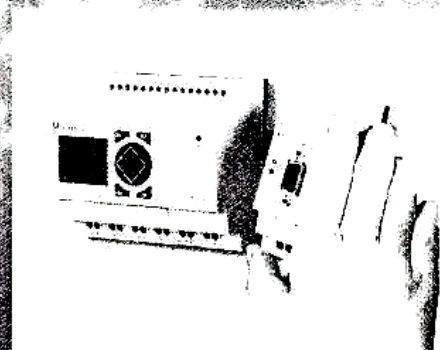
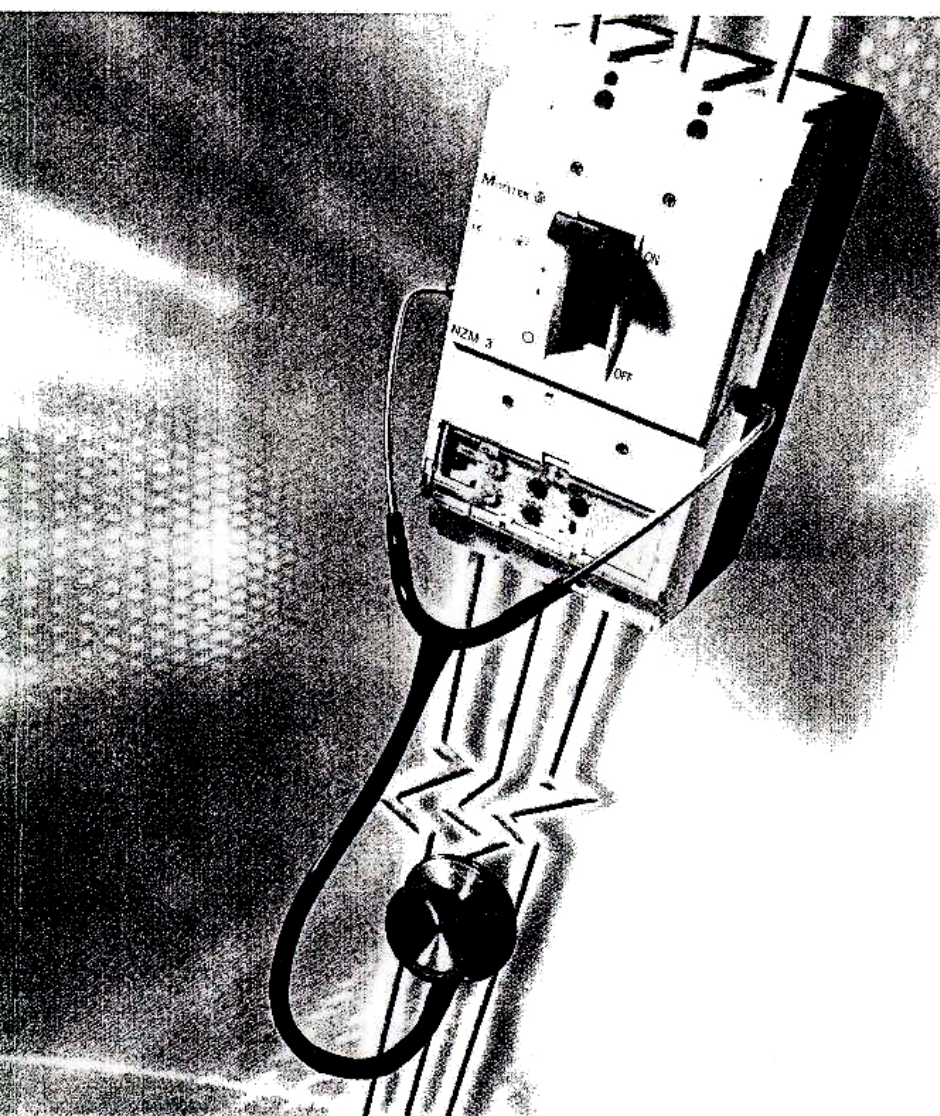
ЭЛЕКТРО панорама

9-2005

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

www.moeller.com.ua

**Автоматические выключатели NZM:
Встроенная диагностика –
технология будущего**



Plug&Work !

- Встроенная комплексная диагностика NZM – от контактов к управляющей системе
- NZM – новый стандарт надежности и безопасности

ДП «Моэллер Электрик»
02098 г. Киев
Березняковская 29, 6 этаж
Тел.: +38 044 496 09 58
Факс: +38 044 496 09 54
office@moeller.kiev.ua
www.moeller.com.ua

MOELLER



Think future. Switch to green.

Тонкая математика Магнитного поля

Ю.В. Черников

В настоящее время трехфазные асинхронные двигатели, характерной особенностью которых является создание и использование вращающихся магнитных полей, широко применяются повсеместно.

Предыстория работ в области вращающихся магнитных полей имеет почти двухсотлетнюю давность. Еще до начала 20-х годов XIX столетия неоднократно наблюдалось тормозящее влияние медного корпуса компаса на колебания магнитной стрелки.

Наиболее интересный опыт, ставший историческим, продемонстрировал 22 ноября 1824 года в Парижской академии наук ее бессменный секретарь Франсуа Доминик Араго. Он показал, что если над укрепленным на вертикальной оси медным диском вращать постоянный магнит, то диск также начинает вращаться (рис. 1). То, что при этом не происходит никаких обычных магнитных явлений притяжения или отталкивания, обнаруживалось тотчас же, как только прекращалось вращение магнита. В состоянии покоя не наблюдалось никаких явлений взаимодействия между диском и магнитом. Этому явлению, названному тогда «магнетизмом вращения», в котором в зародышевой форме был заключен принцип работы асинхронного электродвигателя, многие ученые пытались дать сколько-нибудь удовлетворительное объяснение. Но ни сам Ф.Д. Араго, ни А.М. Ампер и С. Пуассон во Франции, ни Ч. Баббедж и Ф. Гершель в Англии, не могли дать «магнетизму вращения» правильного объяснения.

Объяснить явление Араго стало возможным только после открытия М. Фарадеем явления электромагнитной индукции. Решающим днем опытов было 17 октября 1831 года. «Цилиндрический полюсовый магнит, — гласит запись этого дня в лабораторном журнале, — был вставлен в конец цилиндра с соленоидом (рис. 2), затем он был быстро внесен внутрь во всю длину, и стрелка гальванометра отклонилась; далее он был удален, и стрелка снова отклонилась, но в противоположном направлении. Этот эффект повторялся каждый раз, когда магнит вносили или удаляли. Из этого следует, что волна электричества создавалась от простого приближения магнита, а не от его похождения *in situ*» (на месте) [1]. Задача «превратить магнетизм в электричество» была разрешена.

24 ноября 1831 года М. Фарадей, докладывая в Королевском обществе об открытии электромагнитной индукции, особо остановился на опыте Араго, который лишь подтвердил, что опыт Фарадея «полностью согласуется с результатами магнитоэлектрической индукции». В фундаментальном труде М. Фарадея «Экспериментальные исследования по электричеству» [2] имеется специальная глава «Объяснение магнитных явлений Араго» (опубликована в ноябре 1831 года), в которой он доказывает, что изменение магнитного потока при вращении магнита над медной пластинкой вызывает появление в ней индуцированных токов, а в результате взаимодействия поля вращающегося магнита и этих токов возникает сила, под действием которой пластинка вращается. Опытами Араго был установлен тот важный факт, что проводящее тело может совершать механическую работу, если его поместить во вращающееся магнитное поле. Однако, как видно из описания опыта, Араго получал вращающееся поле при помощи вращающегося постоянного магнита.

Прошло столетие, прежде чем ученые вспомнили о «магнетизме вращения». 28 июня 1879 года английский ученый Уолтер Бейли сделал в Лондонском физическом обществе доклад на тему: «Способ получения вращения Араго». Доклад сопровождался демонстрацией прибора (рис. 3). На деревянной подставке были

вертикально установлены четыре стержневых электромагнита. Между прибором и источником тока включался коммутатор, приводившийся в движение от руки. Конструкция коммутатора была такова, что при его вращении в обмотки электромагнитов в определенной последовательности направлялись импульсы постоянного тока. При этом верхние концы сердечников поочередно получали северную или южную полярность.

В приборе Бейли достигалось шаговое перемещение магнитного поля, что было аналогично движению постоянного магнита вокруг вертикальной оси, и этот эффект впервые был получен при помощи неподвижного устройства. Естественно, что диск начинал вращаться на оси. Прибор Бейли был настолько технически несовершенным, что не получил никакого применения.

В 1888 году итальянский физик Галилео Феррарис и сербский инженер и ученый Никола Тесла сообщили о результатах своих работ, выполненных независимо друг от друга, по созданию вращающегося магнитного поля при помощи переменных токов.

18 марта 1888 года профессор Музея индустрии Г. Феррарис выступил в Туринской академии наук с докладом на тему: «Электродинамическое вращение, производимое посредством переменных токов», в котором показал, что вращающееся магнитное поле возникает как результирующее поле при наложении двух переменных магнитных полей, пространственный угол между векторами индукции которых составляет 90° , имеющих одинаковую частоту и амплитуду, но сдвинутых одно относительно другого по фазе. В случае, когда разность фаз равна четверти периода (90°), вектор суммарной магнитной индукции получает непрерывное вращательное движение, не изменяясь, однако, по абсолютной величине.

Таким образом, Г. Феррарис дал четкое и строгое математическое описание явления вращающегося магнитного поля, создава-

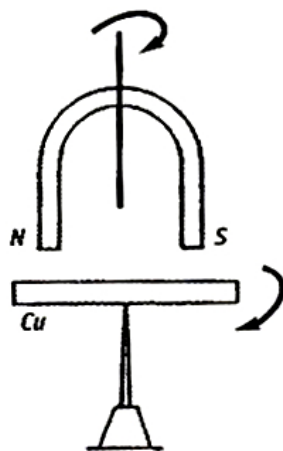


Рис. 1. Опыт Араго

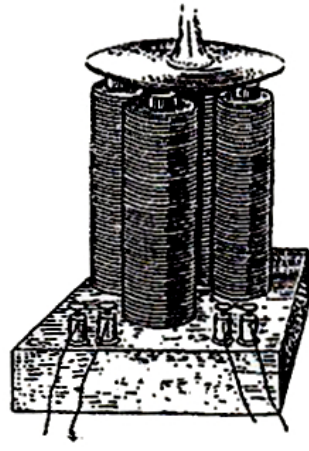


Рис. 3. Прибор Бейли

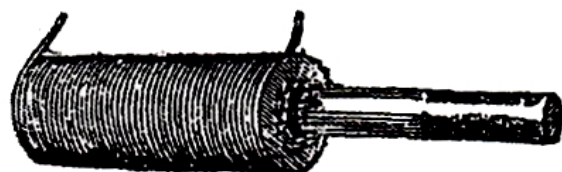


Рис. 2. Соленоид и цилиндрический магнит

емого при помощи двух переменных токов. Здесь же он впервые пользуется и самим термином «вращающееся магнитное поле».

Для получения двух таких токов, которые требуются для создания вращающегося поля, Г. Феррарис предложил пользоваться методом «расщепления фазы» или, иначе говоря, методом введения искусственной фазы. Такой сдвиг Г. Феррарис наблюдал между первичным и вторичным токами недогруженного однофазного трансформатора с разомкнутым сердечником системы Голяра – Гиббса. Г. Феррарис построил небольшую экспериментальную модель индукционного двигателя с непрерывным вращением вала. На рис. 4 показан поперечный разрез такого двигателя, где обозначено: 1 и 1' – первая пара последовательно соединенных катушек, каждая из которых состоит из 96 витков проволоки диаметром 1,92 мм; 2 и 2' – вторая пара параллельно соединенных катушек, каждая из которых состоит из 504 витков проволоки диаметром 0,97 мм; 3 – полый медный цилиндр длиной 180 мм при внешнем диаметре 90 мм; 4 – вал. Катушки 1 и 1' включались в первичную цепь трансформатора, а катушки 2 и 2' – во вторичную цепь трансформатора последовательно с добавочным сопротивлением 15–20 Ом, которое уменьшало разность фаз до угла, близкого к 90°. Двигатель развивал максимальную мощность в 3 Вт при 650 об/мин.

Г. Феррарис не придал серьезного значения своему изобретению, поскольку, по его ошибочным расчетам, коэффициент полезного действия подобного электродвигателя не мог превосходить 50 %, что было совершенно неприемлемо для промышленного применения [3]. Это было драматическое заблуждение.

Исследователи трудов Н. Тесла (Т. Мартин, С. Бокшан) утверждают, что мысль о возможности построения индукционного двигателя с использованием открытого им принципа вращающегося магнитного поля, т.е. без коммутационного устройства, возникла у него еще в 1882 году в Париже, когда он работал в эдисоновской «Континентальной компании» на заводе в городе Иври. В этом же году Н. Тесла сумел конкретизировать и предметно описать модель системы, состоящей из двухфазного генератора переменного тока, связанного посредством контактных колец и проводов с двухфазным индукционным двигателем [4].

Н. Тесла обратился к некоторым французским промышленникам с предложением открыть дело по производству бесколлекторных двигателей, но его инициатива повисла в воздухе. Н. Тесла не оставалось ничего другого, как испробовать счастья в США. Отплытие состоялось весной 1884 года. Переехав в США, Н. Тесла в конце 1887 года подал первые семь патентных заявок на многофазные системы, на которые ему были выданы патенты 1 мая 1888 года. Всего Н. Тесла только в области многофазных систем получил 41 патент. В докла-

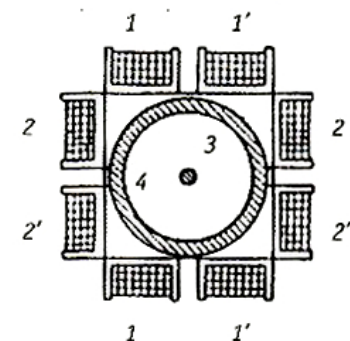


Рис. 4. Двигатель Феррариса

де, сделанном им 16 мая 1888 года в Американском институте инженеров-электриков, он дал математическую формулировку сущности явления вращающегося магнитного поля, показав, что два тока – синусоидальный и косинусоидальный (т.е. отличающиеся по фазе на 90°), пространственный угол между векторами магнитной индукции которых также равен 90°, создают «непрерывное перемещение магнитного поля». При этом

суммарная магнитная индукция равна максимальной величине индукции, создаваемой одним током. В докладе Н. Тесла также привел принципиальные схемы предложенных им многофазных машин. Наиболее типичной схемой установок «системы Тесла» являлась схема, показанная на рис. 5, где слева изображен двухфазный синхронный генератор, а справа – асинхронный двигатель. Ротор двигателя имел обмотку в виде двух взаимно перпендикулярных короткозамкнутых катушек, причем сопротивление обмотки было значительным.

Н. Тесла считал двухфазную систему наиболее экономичной. Следует отметить, что в текстах некоторых американских патентов Н. Тесла указывал возможность получения как несвязанной трехфазной системы с шестью линейными проводами, так и связанной трехфазной системы, имеющей только три линейных провода, но все свои усилия в практической деятельности он направлял по пути усовершенствования двухфазной системы.

Изобретение Н. Теслы знаменовало собой начало новой эры в электротехнике. Уже в июне 1888 года фирма «Вестингауз электрик компании» купила у него за миллион долларов все патенты на двухфазную систему и организовала на своих заводах выпуск асинхронных двигателей, которые поступили в продажу в 1889 году. Эти двигатели оказались весьма неудачно сконструированы. Существенным недостатком построенных двигателей Тесла были выступающие полюса, каждый с сосредоточенной обмоткой, что явилось результатом механического переноса конструктивных форм машин постоянного тока в технику переменного тока, вследствие чего эти двигатели имели очень большое магнитное рассеяние и крайне неблагоприятное распределение намагничивающей силы вдоль воздушного зазора. Неудачной была и указанная выше конструкция ротора. Все это заметно снижало пусковые и рабочие характеристики двигателя.

В становлении техники многофазных токов очень важны исследования и изобретения русского инженера Михаила Осиповича Доливо-Добровольского [5]. Как и Н. Тесла, большую часть своей жизни он провел на чужбине – с 1887 года по 1919 год занимал руководящие посты в электротехническом концерне АЕГ в Берлине. Проблемой многофазных токов он заинтересовался после изучения туринской лекции Г. Феррариса. Начав свои теоретические и экспериментальные исследования осенью 1888 года и выполнив их в чрезвычайно короткий срок (в течение года), он раскрыл сущность ошибки Г. Феррариса, первым доказал оптимальность связанной трехфазной системы и создал трехфазный асинхронный двигатель с ротором в виде беличьего колеса и обмотками на статоре, которые были рассредоточены по всей его окружности. М.О. Доливо-Добровольский выполнил ротор в виде стального цилиндра (что уменьшало его магнитное сопротивление и увеличивало эффективность использования магнитного поля), а в просверленные по периферии последнего каналы закладывались медные стержни (что уменьшало электрическое сопротивление, вследствие чего индуцированные в роторе токи могли свободно протекать). На лобовых частях ротора эти стержни электрически соединялись между собой. Это решение оказалось наилучшим. После того как он получил в 1889 году патент на этот ротор, его устройство принципиально не менялось до настоящего времени.

В заключении статьи целесообразно привести высказывание члена-корреспондента АН СССР, профессора Т.П. Кравца, редактора и научного комментатора русского перевода трудов М. Фарадея: «...история, как на дне промывательной машины, сохраняет немногие крупинки золота – достижения первостепенной важности и вечного значения; все остальное ее бурный поток уносит – и факты, и имена, и даты...».

Литература:

1. Радянский М.И. Михаил Фарадей. Биографический очерк. – М.: ГЭИ, 1946.
2. Фарадей М. Экспериментальные исследования по электричеству, том 1/перевод с англ. Е.А. Чернышевой и Я.Р. Шмидт-Чернышевой под ред. член-корр. АН СССР, проф. Т.П. Кравца / . – М.: Изд-во АН СССР, 1947.
3. Веселовский О.Н. Михаил Осипович Доливо-Добровольский. – М.: ГЭИ, 1958.
4. Цверева Г.К. Никола Тесла. – Л.: «Наука», 1974.
5. Веселовский О.Н. Вращающееся магнитное поле. – «Электротехника», 1958, № 9.

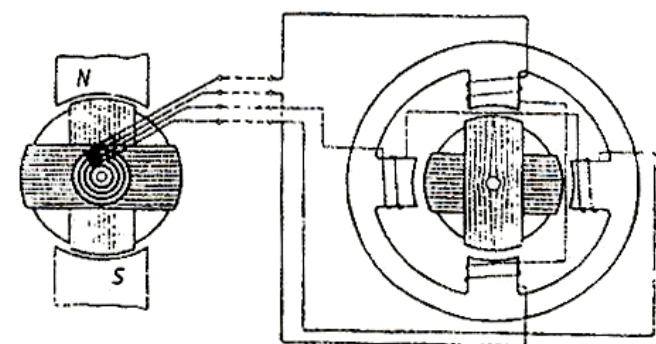


Рис. 5. Генератор и двигатель Тесла