

"Эксперимент 2020-04-04" Демонстрация отталкивания магнита и катушки с переменным током

Автор: Миняев Андрей Русланович

Код УДК: 537.6/8

Код ББК: 22.33

Объектом исследования является сила магнитного взаимодействия катушки с переменным током и постоянного магнита. Вызывает сомнение равенство модуля силы магнитного притяжения и магнитного отталкивания при прочих равных условиях. Высказывается гипотеза, что модуль силы магнитного отталкивания может превышать модуль силы магнитного притяжения. Ставятся цели: 1) обнаружение выраженного отталкивания постоянного магнита на свободном подвесе и катушки БЕЗ сердечника с переменным током; 2) сравнение силы отталкивания магнита от катушки переменного тока с силой отталкивания магнита от катушки постоянного тока. Приводятся измеренные экспериментальные данные в таблицах и графиках, производится оценка эффекта.

Введение

Как известно [1, 164], [2, 12] при изучении электромагнетизма и в проектировании электрооборудования расчет силы (электро)магнитного взаимодействия производится по формуле силы Ампера (или по закону Био-Савара). Величина силы пропорциональна силе тока I , что означает смену знака силы при смене направления тока, при этом модуль силы Ампера считается сохраняющимся. Аналогичные рассуждения делаются и по индукции B магнитного поля - изменение направления индукции магнитного поля B изменяет направление силы Ампера, при этом сама величина (модуль) силы Ампера также считается неизменной.

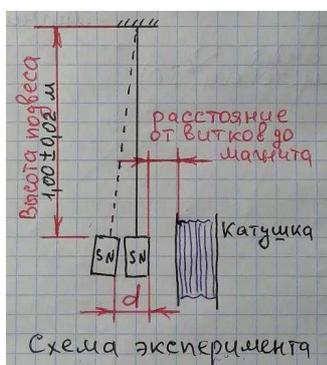
В электродвигателях и электромагнитах этот факт одинаковости сил магнитного притяжения и отталкивания считается очевидным. В электроустановках эти силы, как правило, работают совместно, создавая суммарный эффект.

Однако со строго научной, фундаментальной точки зрения нуждается в экспериментальной (да и теоретической тоже) проверке сама одинаковость сил магнитного притяжения и отталкивания, которая и производится в данной работе.

Высказываемая гипотеза

На основании экспериментальных данных научно обосновано предположение о возможном превышении модуля силы магнитного (электромагнитного) отталкивания над модулем силы магнитного (электромагнитного) притяжения при прочих равных условиях: одинаковых величинах силы тока и одинаковом модуле индукции магнитного поля и одинаковых расстояниях.

Описание оборудования



Установка в таком виде очень проста и может быть легко воспроизведена на любом подходящем оборудовании любой лаборатории или в домашних условиях. Она прежде всего имеет наглядную цель и лишь впоследствии — научно-исследовательскую. Она состоит из магнита, подвешенного на нити, катушки БЕЗ сердечника, линейки для измерения отклонения d магнита и системы питания катушки. Высота подвеса 1 м (погрешность $\pm 0,02$ м) используется для расчета силы, отклоняющей магнит. Расстояние от магнита до витков катушки приводится для справки, так как на основе данных работы не предполагается построение физических и математических моделей. Для этой цели необходимо проведение более точных измерений.

Система питания состоит из автотрансформатора (ЛАТРа), понижающего трансформатора (220/24), контрольного амперметра переменного тока (использовался мультиметр), клемм и соединительных проводников.

ЛАТР желателен для плавной регулировки и минимизации переходных процессов включения-выключения тока. Катушка на нити долго колеблется - мягкое добавление тока позволяет уменьшить колебания. Однако эксперимент может быть проведен БЕЗ применения ЛАТРа - отметьте начальное равновесное положение магнита, включите ток и дождитесь успокоения колебаний...

Понижающий трансформатор 220/24 обеспечивает **безопасную** величину токов и напряжений как для человека, так и для исследуемой катушки. Сопротивление катушки постоянному току получилось примерно 5 Ом и при типичной силе тока 2...4 ампера требуется напряжение порядка 10...20 В, поэтому трансформатор нужен на напряжение 24 В.

Контрольный **амперметр** желателен, но также вторичен - эксперимент может быть проведен БЕЗ него...

Конечно было интересно пронаблюдать обычное отталкивание магнита в поле катушки постоянного тока, для чего была применена схема питания постоянным током. Поскольку сила взаимодействия оказалась достаточно большой, то был применен балласт (5-10 Ом, имеющиеся под руками другие такие же катушки) для уменьшения силы тока.

Используемый повсеместно переменный ток обладает ценным свойством — его положительная и отрицательная полярности имеют абсолютно совпадающую по модулю величину — и по амплитуде и по протекающему за пол-периода заряду (могут быть лишь случайные, относительно редкие отклонения), что объясняется принципом его трансформации. Именно это важно в данной работе для сравнения сил магнитного притяжения и отталкивания.

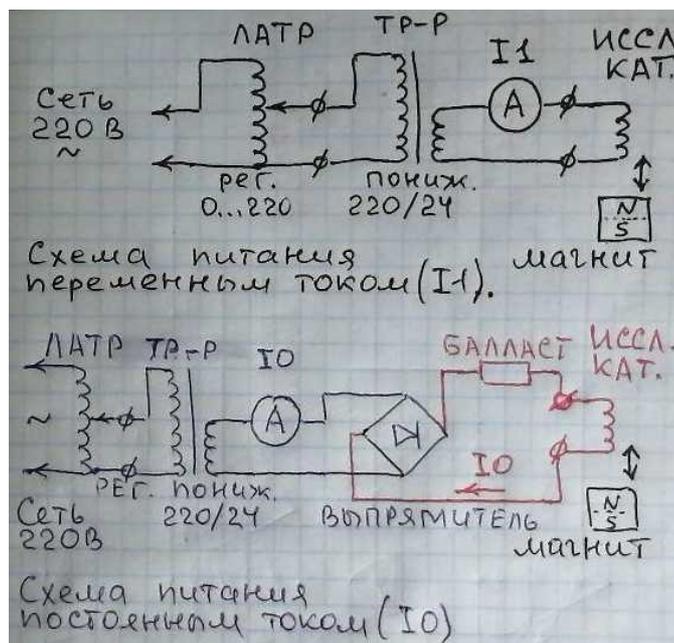
При питании электромагнита переменным током постоянный магнит в поле его должен испытывать лишь периодические толчки чередующегося направления с частотой питания сети — 50 Гц. Именно этот принцип и применяется в основе разнообразных электродинамических звуковоспроизводящих устройств (в них как раз магнит неподвижен, а катушка - она обычно намного легче - испытывает колебания под влиянием переменного тока.) При этом согласно действующей общепринятой теории [1, 164], [2, 12] средняя равновесная точка вибрирующего сердечника (если он имеет постоянный магнит) смещаться НЕ должна при включении тока (при условии механической линейности подвеса).

В настоящей установке как раз и используется аналогичная электромеханическая схема. В поле электромагнита переменного тока размещен свободно подвешенный постоянный магнит, который и взаимодействует с равновеликими по модулю чередующимися по направлению силами.

Поскольку магнит взаимодействует с чередующимися силами противоположного направления с катушкой электромагнита, то заметное отклонение магнита в какую-либо сторону от катушки говорит об отличии силы отталкивания от силы притяжения.

Используемые магниты и катушка

Была применена катушка БЕЗ сердечника с числом витков 550, толщиной провода 0,56 мм, внутренним диаметром обмотки 24 мм, наружным - 55 мм, осевой толщиной 14 мм, длина провода оказалась около 68 метров и ее сопротивление постоянному току получилось примерно 5 Ом. Для ее изготовления на 3d-принтере были распечатаны детали каркаса, хотя пробный эксперимент предполагает использование ЛЮБОЙ подходящей катушки (даже бескаркасной). Для крепления



использован латунный крепеж, пластиковый кронштейн и планка из дсп - все немагнитное.



Теперь об использованных магнитах и их обозначениях в результатах ниже. Всего было три типоразмера магнитов: один типоразмер - ферритовые от бензонасоса (форма - сегмент цилиндрического слоя); и два - неодимовые с никелевым покрытием (дисковый и цилиндрический).

"1фвыпN" - ферритовый магнит выпуклым "севером" N к катушке;

"2фвыпS" - ферритовый магнит выпуклым "югом" S к катушке;

"3фвогN" - ферритовый магнит вогнутым "севером" N к катушке;

"4фвогS" - ферритовый магнит вогнутым "югом" N к катушке;

"5Днслаб" - неодимовый "слабый" дисковый магнит диаметром 38 мм и толщиной 2x1.5 мм;

"6Днсиль" - неодимовый "сильный" дисковый магнит диаметром 38 мм и толщиной 2x1.5 мм;

"7Цн" - неодимовый цилиндрический магнит диаметром 30 мм и толщиной 2x10 мм.

Для упрощения конструкции ВСЕ магниты использованы по 2 штуки - примагничены два одинаковых сквозь тонкую пластиковую пленку от упаковки, для тонкой регулировки положения пленка к подвеске крепилась медной проволокой, позволяющей ее согнуть и выровнять плоскости, углы, положения и проч.

Проведение измерений

Эксперименты со всеми тремя магнитами проводились по одинаковой методике и преследовали простую демонстрационную цель. Для удобства применялись две линейки: одна - для измерения отклонения от положения равновесия, другая - для измерения расстояния от плоскости витков катушки до характерной точки подвески магнита. Сначала линейки устанавливались в удобное положение и осторожно прибавлялось напряжение ЛАТРа, увеличивалась сила тока. Измерялось отклонение магнита от положения равновесия.

В качестве базового при первом измерении был применён именно ферритовый магнит с большим удельным сопротивлением. Это гарантировало отсутствие токов Фуко и отсутствие Ленцевского отталкивания. На неодимовых магнитах величина отклонения по порядку величины соответствовала отклонению ферритовых магнитов, что говорит о слабом влиянии токов Фуко в неодимовых магнитах. В последствие предполагается провести специальное измерение Ленцевского эффекта на дисках из алюминия/дюрала.

Для сравнения проводилось измерение отталкивания магнитов постоянным током. Поскольку возникает вопрос о средневыпрямленном и среднеквадратическом значении силы тока, то для измерения использовался амперметр только переменного тока, а в эксперименте с постоянным током использовался выпрямительный мост. Таким образом влияние коэффициента формы ($k=1.11$) переменного тока оказывалось одинаковым и в измерениях на переменном токе, и в измерениях на постоянном токе. Это позволило вообще не обращать внимание на коэффициент формы при обработке результатов. К этому вопросу мы еще вернемся в будущих статьях.

Поскольку подвешенный магнит вибрировал в поле переменного тока, то для исключения аэродинамического влияния эксперимент был повторен четырежды на ферритовых магнитах - как выпуклой стороной, так и вогнутой стороной к катушке. Во всех случаях наблюдалось устойчивое отклонение магнита от катушки, по порядку величины соответствующее отклонению плоских неодимовых магнитов.

Результаты измерений

Для большего вашего удобства все результаты здесь представлены в нескольких форматах и размещены на нескольких серверах.

Сайт <http://easy-physics.club/>

Статья <http://easy-physics.club/sci/2020-04-04-ex1.html>

Таблицы <http://easy-physics.club/sci/2020-04-04-ex1-rezult.html>

Гугл-документ - "[Эксперимент 2020-04-04](#)"

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1gvP5NmraqawT753iZYziqM9VV45cPn-3SE6b1i7jmLI/edit?usp=sharing>

Яндекс-документ - "[Эксперимент 2020-04-04](#)"

<https://yadi.sk/i/BaYuvbNXWIVXvQ>

Во всех форматах имеется 8 страниц, содержащих следующее:

0-ая "**Окат**" - упрощенный расчет использованной катушки

1-ая "**1фвыпN**" - результаты измерений и расчетов по ферритовому магниту 1фвыпN;

2-ая "**2фвыпS**" - ---/-- по ферритовому магниту 2фвыпS;

3-ая "**3фвогN**" - ---/-- по ферритовому магниту 3фвогN;

4-ая "**4фвогS**" - ---/-- по ферритовому магниту 4фвогS;

5-ая "**5Днслаб**" - ---/-- по неодимовому диску 2x 38x1.5мм;

6-ая "**6Днсиль**" - ---/-- по неодимовому диску 2x 38x1.5мм;

7-ая "**7Цн**" - ---/-- по неодимовому цилиндру 2x 30x10 мм.

В таблицах результатов (листы 1...7) перечислим и прокомментируем все колонки по порядку:

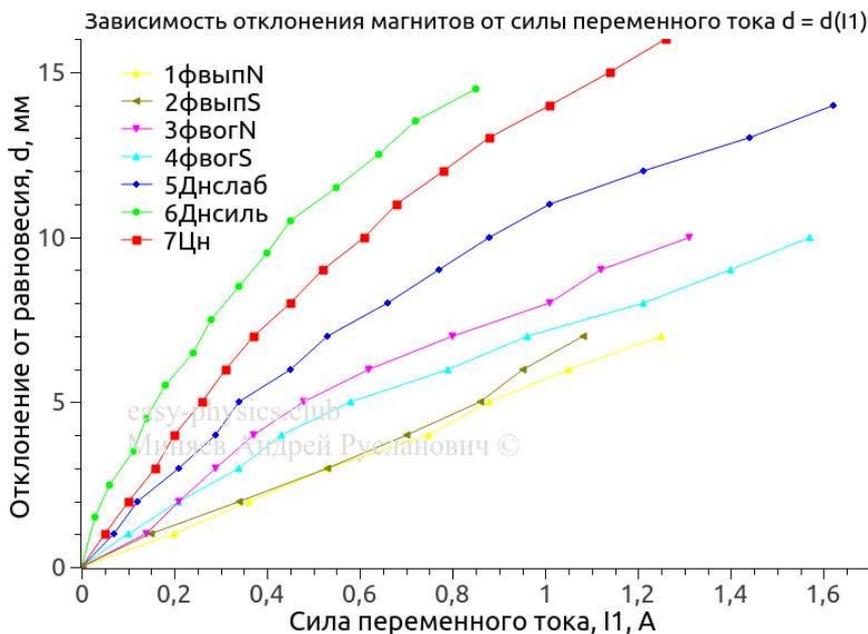
- **A - Контрольное число, см** - отсчеты по линейке, закрепленной на катушке. По ней можно определить расстояние от катушки до характерной точки магнита.
- **B - Отклонение от равновесия, d, мм** - отсчеты по линейке, расположенной на полу и на которой "ноль" выставлен на положение равновесия магнита.
- **C - Расстояние от витков до магнита, мм** - разность, вычисленная по колонке **A**.
- **D - Сила переменного тока I1, A** - измеренная сила переменного тока при данном (колонка **B**) отклонении от равновесия
- **E - Сила постоянного тока I0, A** - измеренная сила постоянного тока, вызывающая такое же (колонка **B**) отклонение от равновесия (такую же силу отталкивания).
- **F - Сила отталкивания Fотт, Н** - вычислялась по массе магнита и по отклонению от положения равновесия ($d \cdot m \cdot g / (\text{длину подвеса})$).
- **G - Относит. величина эффекта I0 / I1** - отношение постоянного тока к переменному току, показывает насколько постоянный ток вызывает большее отталкивание, чем переменный

Остальные колонки оставим пока без комментариев.

Непосредственная оценка силы отталкивания оказалась недостаточно информативна с позиции общности, она зависит от объемных характеристик магнита, его формы, силы намагниченности (Энергии магнитного поля и остаточной индукции магнитного поля, которая сама по себе еще и неоднородна). Оказалось, что простое отклонение от равновесия **d** и легче воспринимается, и более информативно. Оно автоматически учитывает, что у более тяжелого магнита и энергия магнитного поля больше - отклонение окажется близким у магнитов разного размера-массы и

пропорциональным остаточной индукции. Этот вопрос нуждается в более глубокой теоретической проработке, оставим его для будущих статей. В данной статье как основной результат использовано именно отклонение d магнита от положения равновесия.

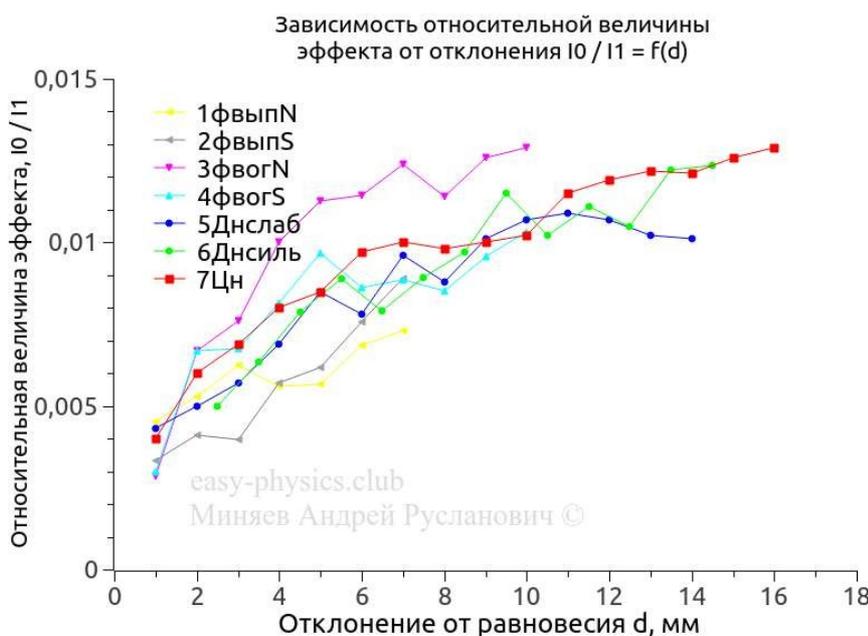
По измеренным данным построены некоторые зависимости.



Зависимость отклонения магнитов от силы переменного тока $d = d(I_1)$

По представленным графикам видно, что ВСЕ магниты показывают уверенное отклонение от катушки. Т.е. можно сделать вывод - постоянные магниты действительно отталкиваются от катушки с переменным током, и, следовательно, сила магнитного отталкивания превышает силу магнитного притяжения в описываемых условиях. Неодимовые магниты показывают БОЛЬШОЙ эффект (линии 5,6,7 идут выше линий 1,2,3,4), что, на первый взгляд, объясняется просто их БОЛЬШЕЙ силой

намагничивания (БОЛЬШИМ модулем магнитной индукции), но конечно, нужно в будущем исключить возможное влияние проводимости магнитов (влияние Ленцевского отталкивания). По ферритовым магнитам вывод пока можно сделать следующий - вогнутая сторона магнита дает немного сильнее эффект (линии 3,4 идут выше линий 1,2), что может объясняться как аэродинамикой, как большей кривизной силовых линий, так и просто разбросом величины их намагниченности - нужны более корректные эксперименты, исключающие аэродинамические эффекты и в которых будет возможность измерить модуль индукции магнитного поля магнита.



Зависимость относительной величины эффекта от отклонения $I_0 / I_1 = f(d)$

Хотелось бы количественно оценить обнаруженный эффект и в качестве меры, некоторой условной единицы, логично использовать стандартную силу электромагнитного взаимодействия. Для этого были проведены вспомогательные калибровочные измерения силы отталкивания магнита и катушки с постоянным током I_0 в максимально совпадающих условиях. Далее вычислялась вспомогательная величина I_0 / I_1 "Относительная величина эффекта", показывающая, насколько постоянный ток I_0

влияет сильнее переменного I_1 (впоследствии из этой величины можно получить феноменологические коэффициенты "четности"), или "на сколько процентов отталкивание сильнее притяжения".

Здесь представлены зависимости этой величины от отклонения магнита от равновесия - т.е. пространственная относительная оценка эффекта. По зависимостям видно, что с удалением магнита и катушки эффект **УВЕЛИЧИВАЕТСЯ!** Вывод пока предварительный, но ощущается его важность для построения теории в будущем...

Также можно сделать еще один вывод, что сама разница сил притяжения и отталкивания относительно невелика и составляет 0.6...1.3%, т.е. вероятность заметить столь малую разницу сил была крайне мала, особенно при использовании приборов с погрешностью 1...3%! Тем не менее эта разница (и воспроизводимые зависимости ее) имеет фундаментальное значение - из неё следует чётность электромагнитных эффектов.

Впоследствии предполагается это исследование сделать существенно глубже, обширнее, точнее и из него получить данные для математических и физических моделей.

Выводы.

1. Показано отталкивание всех магнитов от катушки с переменным током, что свидетельствует о превышении силы магнитного отталкивания над силой магнитного притяжения для всех видов использованных магнитов и для катушки представленной геометрии. Это подтверждает высказанную в начале статьи гипотезу.
2. Показана пропорциональность отталкивания магнита силе переменного тока в катушке.
3. Относительная величина разности сил отталкивания и притяжения составила 0.6...1.3% по сравнению со стандартным отталкиванием на постоянном токе.
4. Обнаружено, что относительная величина эффекта возрастает с увеличением расстояния между магнитом и катушкой.

Замечания экспериментаторам.

1. Будьте осторожны с силами токов более 3А - многие клеммы очень быстро выходят из строя. Будьте осторожны с ЛАТРами и трансформаторами - напряжение сети 220 В (и даже "низкое" напряжение) **опасно!**
2. Стальные магниты с "мягкой" петлей намагничивания непригодны, эффект проявляется на ферритовых и неодимовых магнитах с "жесткой", "прямоугольной" петлей.

Список литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Том 2. Электричество. Издание 4-е, переработанное. М.: Издательство «Наука». Главная редакция физико-математической литературы, 1970
2. Тихомирова С.А. Физика. 11 класс : учеб. для общеобразоват. учреждений (базовый и профильный уровни) / С. А. Тихомирова, Б. М. Яворский. - 3-е изд., стер. - М. : Мнемозина, 2012. - 303с. : ил.

Миняев Андрей Русланович © , 20 апреля 2020 г.