

**Муниципальное общеобразовательное учреждение
Васильковская основная общеобразовательная школа
Ростовский район Ярославская область**

**Опыты по взаимодействию катушки с постоянным током
и катушки с переменным током, катушки с переменным током
и постоянным магнитом.**

Учитель физики Кастюкевич Сергей Михайлович

2023г.

Известно взаимодействие двух параллельно расположенных проводников с постоянным током: при одинаковом направлении тока в обоих проводниках, они притягиваются, при противоположном направлении тока в проводниках проводники отталкиваются. Цель исследования – взаимодействие проводника с постоянным током и проводника с переменным током на примере взаимодействия катушки с постоянным током и катушки с переменным током, и взаимодействие постоянного магнита и катушки с переменным током.

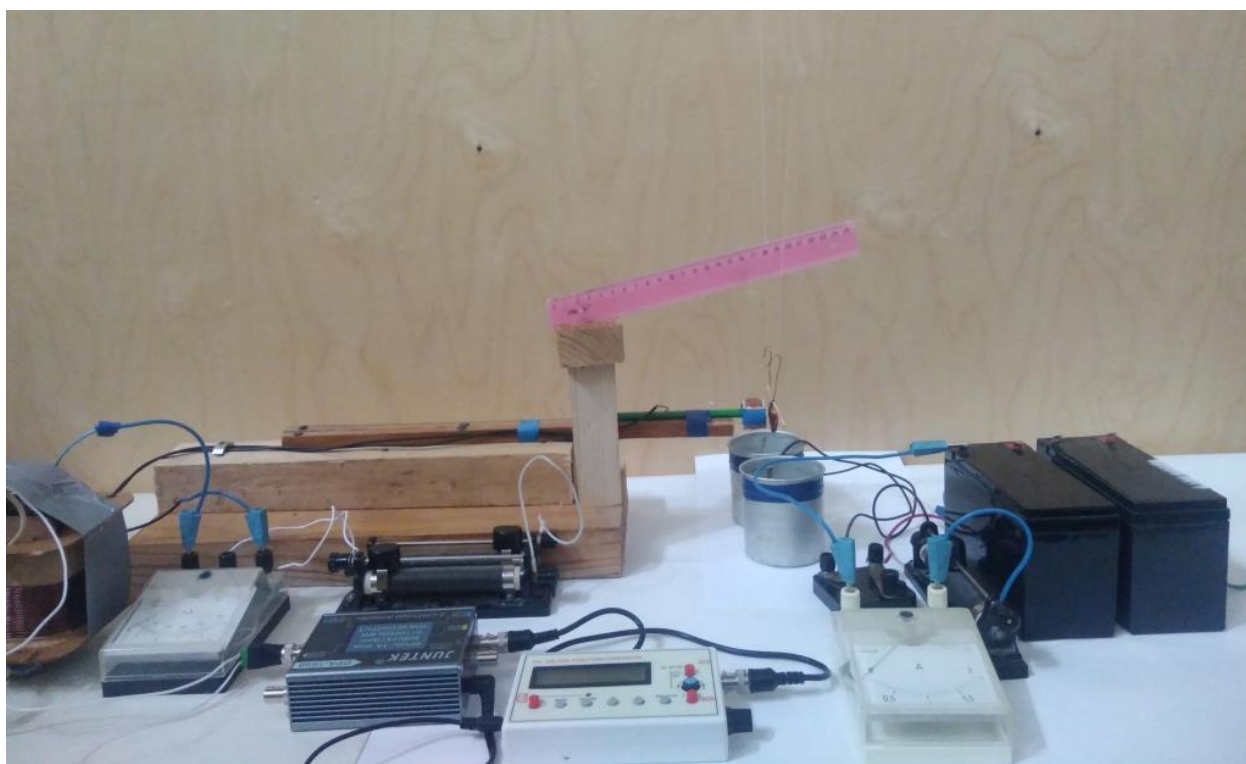
Сила взаимодействия двух проводников с постоянным током пропорциональна произведению силы тока в проводниках. Если один проводник с постоянным током, а второй с переменным, то сила притяжения и отталкивания между проводниками меняется периодически. Сила взаимодействия $F \sim i_1 \cdot i_2 \cdot \sin(\omega t)$, i_1 - постоянный ток, i_2 - переменный ток, меняющийся по закону $\sin(\omega t)$. В исследовании определялось, существуют ли ещё другие закономерности взаимодействия проводника с постоянным током и проводника с переменным током на примере взаимодействия катушки с переменным током и катушки с постоянным током, а также катушки с переменным током и постоянным магнитом (неодимовым) .

Кроме силы взаимодействия $F \sim i_1 \cdot i_2 \cdot \sin(\omega t)$ в опытах наблюдалась постоянно действующая сила отталкивания между неподвижной катушкой с переменным током и подвешенной рядом на нитях катушкой с постоянным током, что вызывало отклонение от положения равновесия катушки с постоянным током. При уменьшении частоты переменного тока, катушка с постоянным током отклонялась на большую величину от положения равновесия при одинаковых значениях силы тока.

В исследовании взаимодействия катушки с постоянным током и катушки с переменным током в зависимости от частоты переменного тока использовался генератор сигналов FG-100 DDS на диапазоне 2 – 100 Гц. Синусоидальный сигнал с генератора шел на усилитель JUNTEK DPA-1698, с усилителя через трансформатор с одинаковым количеством первичных и вторичных витков на неподвижную катушку диаметром 25 мм, длиной 20 мм и числом витков 900 без сердечника. Трансформатор являлся фильтром для постоянного тока при выходе с усилителя на катушку.

В опытах переменный ток в катушке устанавливался таким образом, чтобы отклонение от положения равновесия рядом расположенной подвешенной катушки диаметром 25 мм, длиной 5 мм, массой 9 г с числом витков 350 на частотах от 2 до 100 Гц было одинаковым. Длина нитяного подвеса катушки

на - 7,5 м. Нитяной подвес состоит из двух ниток длиной 7,5 м, подвешенных к потолку на расстоянии 3 м друг от друга. Внизу подвеса, в месте соединения ниток находится катушка. Сила постоянного тока от аккумулятора в подвешенной катушке во всех сериях опытов 1,2 А. Для свободного перемещения подвешенной катушки относительно положения равновесия два алюминиевых контакта от подвешенной катушки находились в алюминиевых сосудах с токопроводящей жидкостью. Подвешенная катушка с алюминиевыми контактами, алюминиевые сосуды с токопроводящей жидкостью, амперметр, аккумулятор, реостат для установления необходимой силы тока образуют замкнутую цепь. В замкнутой подвешенной катушке при включении рядом катушки с переменным током на всех выбранных частотах ЭДС была незначительна и не влияла на результаты опытов. Проводились две серии опытов на частотах 2 Гц – 20 Гц с шагом 1 Гц и 20 Гц – 100 Гц с шагом 10 Гц. В первой серии опытов сила переменного тока измерялась миллиамперметром, во второй серии опытов шунтированным миллиамперметром. Показания шунтированного амперметра потом пересчитывались на показания амперметра без шунта. Отклонение подвешенной катушки от положения равновесия во всех сериях опытов 3 мм.

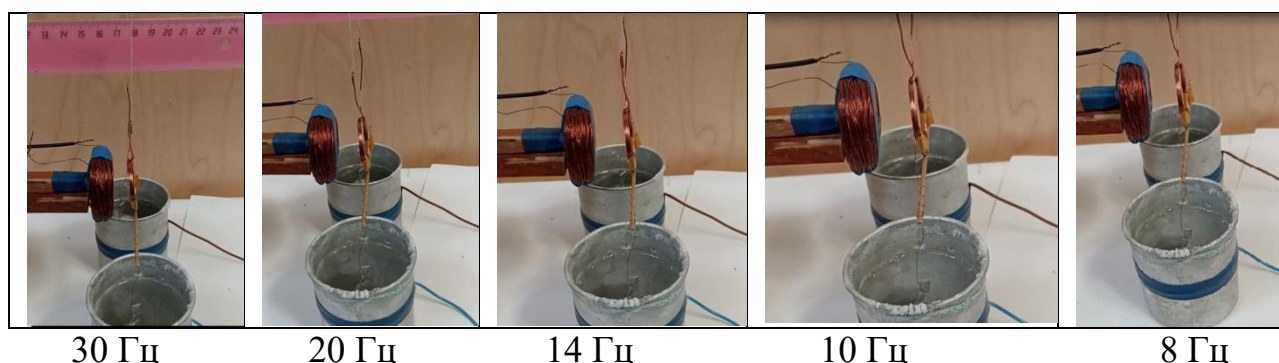


Результаты опытов приведены в таблице значений силы тока по показаниям миллиамперметра неподвижной катушки при одинаковом отклонении от положения равновесия подвешенной катушки, в зависимости от частоты

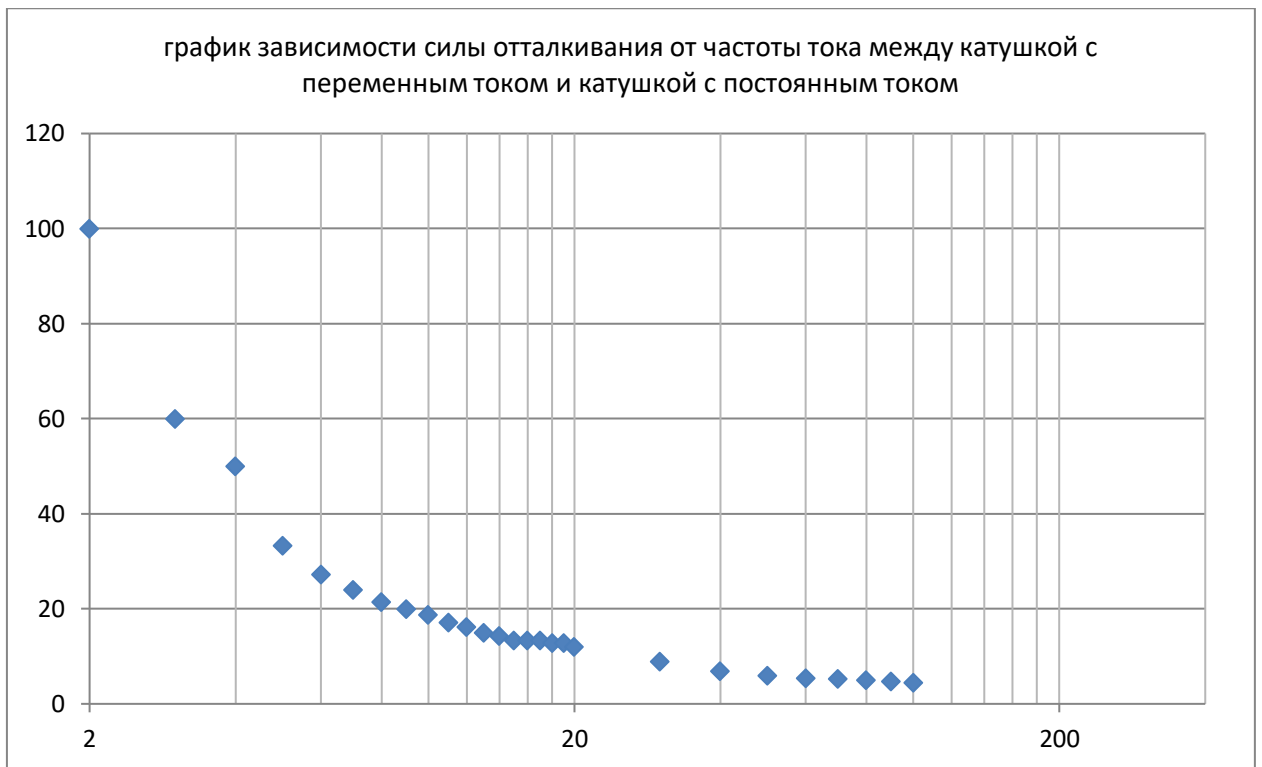
тока. Относительная сила отталкивания рассчитана для одинаковой силы переменного тока в неподвижной катушке на всех частотах, на частоте 2 Гц сила отталкивания принимается за 100. При частоте 2 Гц, ток 6 мА, сила отталкивания 100 условных единиц. При таком же отклонении от положения равновесия при частоте 3 Гц, ток 10 мА, тогда при силе тока 6 мА при таком же отклонении от положения равновесия сила отталкивания будет меньше и составляет $6/10 \cdot 100 = 60$ условных единиц. Аналогично рассчитаны все остальные значения относительной силы отталкивания в таблице.

частота Гц	ток мА	сила отталкивания, если ток 6 мА	частота Гц	ток мА	сила отталкивания, если ток 6 мА
2	6	100	15	45	13,33333333
3	10	60	16	45	13,33333333
4	12	50	17	45	13,33333333
5	18	33,33333333	18	47	12,76595745
6	22	27,27272727	19	47	12,76595745
7	25	24	20	50	12
8	28	21,42857143	30	67,5	8,888888889
9	30	20	40	87,5	6,857142857
10	32	18,75	50	100	6
11	35	17,14285714	60	110	5,454545455
12	37	16,21621622	70	115	5,217391304
13	40	15	80	120	5
14	42	14,28571429	90	127,5	4,705882353
15	45	13,33333333	100	135	4,444444444

На фотографиях ниже сила постоянного тока в подвешенной катушке одинакова, отклонение от положения равновесия примерно одинаково, сила переменного тока в неподвижной катушке каждый раз становится меньше:



На основании таблицы зависимости силы отталкивания между катушкой с постоянным током и катушки с переменным током от частоты тока строится график. Горизонтальная ось – логарифмическая шкала частот, вертикальная ось – сила отталкивания в относительных единицах.

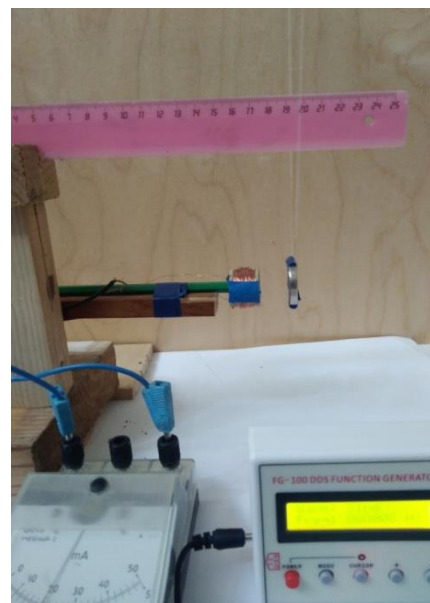
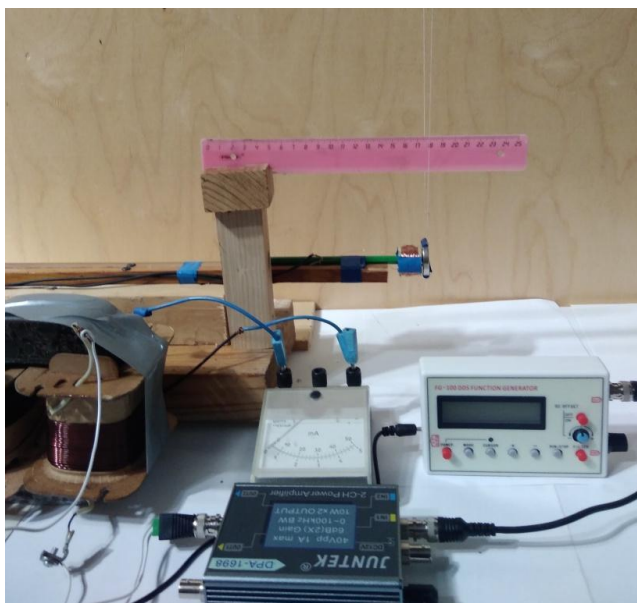


Аппроксимация функции зависимости силы отталкивания между катушкой с постоянным током и катушкой с переменным током от частоты тока на основании измерений - наиболее близкая функция гиперболическая регрессия (коэффициент корреляции 0,9932) и степенная регрессия (коэффициент корреляции 0,9416). Функция зависимости получается $F \sim k/v$.

В опытах при частоте 4 Гц переменный ток в подвешенной катушке 40 мА, постоянный ток в неподвижной катушке 1,2 А отклонение от положения равновесия подвешенной катушки 5,5 мм. Если в подвешенной катушке постоянный ток 40 мА, то для такого же отклонения от положения равновесия для постоянного тока в неподвижной катушке требуется 0,08 А (для случая взаимного расположения катушек с постоянным током, когда между ними возникает сила отталкивания). Отношение $0,08/1,2 = 0,067$. Тогда при частоте 1 Гц, на основании полученной зависимости, коэффициент отношения силы отталкивания между катушкой с постоянным током и катушкой с переменным током по отношению к силе отталкивания между катушками с постоянным током, при одинаковых действующих значениях силы тока $k = 0,27$ и формула принимает вид $F \sim 0,27/v$.

Проводились аналогичные серии опытов при использовании такой же неподвижной катушки с переменным током и подвешенным неодимовым магнитом диаметром 30 мм, толщиной 5 мм и массой 26,4 г. Использовался генератор сигналов FG-100 DDS на диапазоне 2 – 350 Гц. Синусоидальный сигнал с генератора шел на усилитель JUNTEK DPA-1698, с усилителя через

трансформатор с одинаковым количеством первичных и вторичных витков на неподвижную катушку. Трансформатор являлся фильтром для постоянного тока при выходе с усилителя на катушку (фотографии ниже).



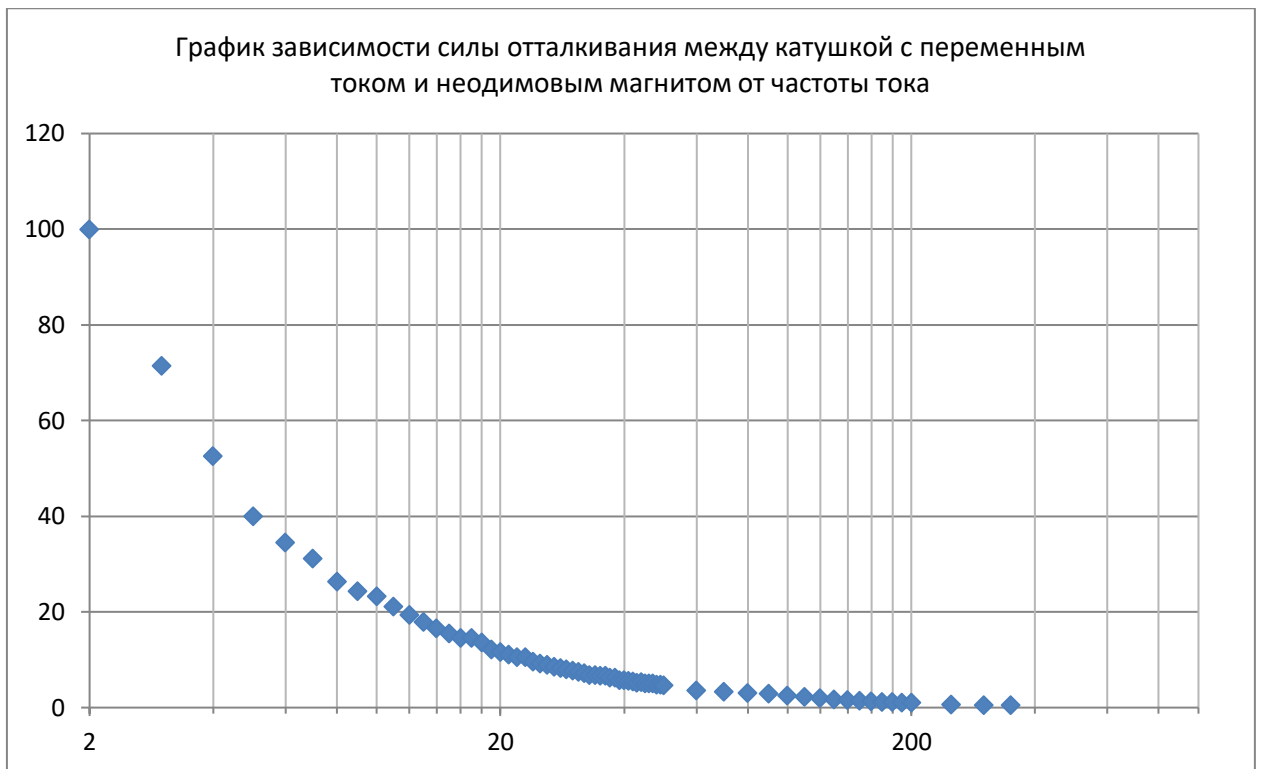
Переменный ток в катушке устанавливался таким образом, чтобы отклонение от положения равновесия неодимового магнита для каждой серии опытов было одинаковым. Длина нитяного подвеса 7,5 м. Первая серия опытов от 2 до 10 Гц с шагом 1 Гц, вторая серия опытов от 10 до 50 Гц с шагом 1 Гц, третья серия опытов от 50 до 200 Гц с шагом 10 Гц, четвертая серия опытов – от 200 до 350 Гц с шагом 50 Гц. В первой серии опытов отклонение подвешенного магнита от положения равновесия составляло 16 мм, во второй серии опытов – 6 мм, в третьей серии опытов – 6 мм, в четвертой серии опытов – 2,5 мм. В первой и второй серии опытов использовался миллиамперметр, в третьей и четвертой серии опытов – шунтированный миллиамперметр. Показания второй, третьей и четвертой серии опытов миллиамперметра пересчитывались относительно первой серии опытов. Показания шунтированного миллиамперметра пересчитывалось на показания амперметра без шунта.

Таблица значений силы тока в показаниях миллиамперметра неподвижной катушки при одинаковом отклонении от положения равновесия неодимового магнита в зависимости от частоты тока. Относительная сила отталкивания рассчитана для одинаковой силы тока на всех частотах, на частоте 2 Гц сила отталкивания принимается за 100:

частота Гц	ток мА	сила отталкивания	частота Гц	ток мА	сила отталкивания
			35	150,5	6,644518272
2	10	100	36	150,5	6,644518272
3	14	71,42857143	37	159,1	6,285355123
4	19	52,63157895	38	159,1	6,285355123
5	25	40	39	172	5,813953488
6	29	34,48275862	40	172	5,813953488
7	32	31,25	41	176,3	5,672149745
8	38	26,31578947	42	180,6	5,53709856
9	41	24,3902439	43	189,2	5,285412262
10	43	23,25581395	44	184,9	5,408328826
11	47,3	21,14164905	45	197,8	5,055611729
12	51,6	19,37984496	46	197,8	5,055611729
13	55,9	17,88908766	47	197,8	5,055611729
14	60,2	16,61129568	48	206,4	4,84496124
15	64,5	15,50387597	49	206,4	4,84496124
16	68,8	14,53488372	50	215	4,651162791
17	68,8	14,53488372	60	279,5	3,577817531
18	73,1	13,67989056	70	301	3,322259136
19	81,7	12,23990208	80	322,5	3,100775194
20	86	11,62790698	90	344	2,906976744
21	90,3	11,07419712	100	387	2,583979328
22	94,6	10,57082452	110	451,5	2,214839424
23	94,6	10,57082452	120	494,5	2,022244692
24	103,2	9,689922481	130	559	1,788908766
25	107,5	9,302325581	140	623,5	1,603849238
26	111,8	8,944543828	150	666,5	1,500375094
27	116,1	8,613264427	160	731	1,367989056
28	120,4	8,305647841	170	795,5	1,257071025
29	124,7	8,019246191	180	860	1,162790698
30	129	7,751937984	190	903	1,107419712
31	133,3	7,501875469	200	946	1,057082452
32	137,6	7,26744186	250	1359,875	0,735361706
33	146,2	6,83994528	300	1655,5	0,604047116
34	146,2	6,83994528	350	1951,125	0,512524825

На основании таблицы зависимости силы отталкивания между магнитом и катушки с переменным током от частоты тока строится график.

Горизонтальная ось – логарифмическая шкала частот, вертикальная ось – сила отталкивания в относительных единицах.



Аппроксимация функции зависимости силы отталкивания между магнитом и катушкой с переменным током от частоты тока на основании измерений - наиболее близкая функция гиперболическая регрессия (коэффициент корреляции 0,9986) и степенная регрессия (коэффициент корреляции 0,9899). Функция зависимости получается $F \sim k/\nu$. На частоте 1 Гц, на основании полученной зависимости, коэффициент отношения силы отталкивания между магнитом и катушкой с переменным током по отношению к силе отталкивания между магнитом и катушкой с постоянным током, при одинаковых действующих значениях силы тока $k = 0,22$, и зависимость принимает вид $F \sim 0,22/\nu$.

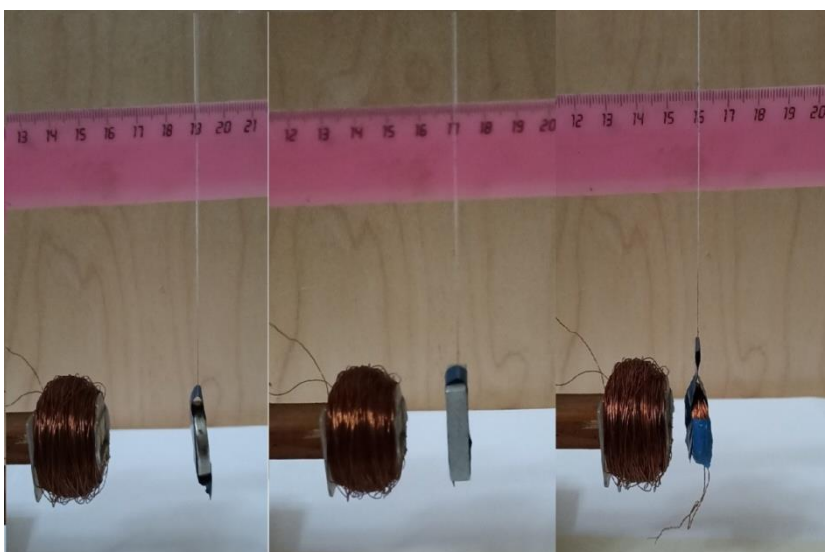
Из проведенного исследования следует, что между катушкой с постоянным током и катушкой с переменным током действует сила отталкивания. Сила отталкивания на частотах 2 Гц – 100 Гц подчиняется зависимости $F = k/\nu$, где коэффициент пропорциональности $k = 0,27$, по отношению к силе отталкивания между аналогичными катушками, если в обеих катушках постоянный ток с таким же действующим значением. Очевидно, при больших частотах зависимость $F \sim k/\nu$ действует. На частоте меньше 2 Гц опыты не проводились из-за ограниченности возможностей приборов. Очевидно, что при $\nu = 0$ зависимость $F \sim k/\nu$ не работает. Коэффициент отношения силы отталкивания между магнитом и катушкой с переменным током по отношению к силе отталкивания между магнитом и катушкой с

постоянным током, при одинаковых действующих значениях силы тока $k = 0,22$, что отличается от коэффициента для катушки с постоянным током и катушки с переменным током ($k = 0,27$). Разность значений коэффициентов связана с характеристиками постоянного магнита (неодимового), точностью измерений и точностью приборов. Из приведенного исследования следует, что сила взаимодействия между катушкой с постоянным током и катушкой с переменным током на частотах больше 2 Гц определяется как $F \sim i_1 \cdot i_2 \cdot (\sin(\omega t) + k/v)$, на частотах меньше 2 Гц сила взаимодействия экспериментально не определена. Проводились опыты по взаимодействию прямолинейных проводников, один из которых с постоянным током, другой с переменным током. Зависимость $F \sim i_1 \cdot i_2 \cdot (\sin(\omega t) + k/v)$ выполнялась и для этих видов проводников

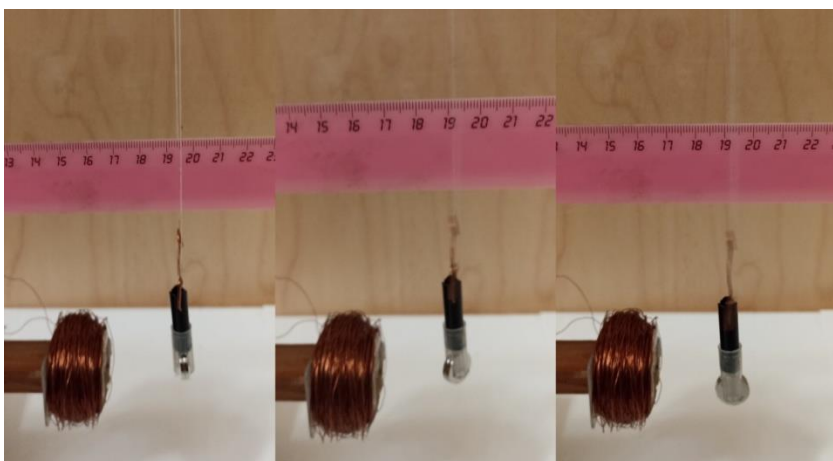
Что является причиной возникающей силы отталкивания? Может причина в колебаниях подвешенной катушки с постоянным током или подвешенного магнита относительно неподвижной катушки с переменным током? Масса подвешенного магнита 26,4 грамм, если к магниту прикрепить груз такой же массы, то вследствие увеличения массы в 2 раза амплитуда колебаний, максимальная скорость и максимальное ускорение также уменьшается в 2 раза, так как движение происходит под действием периодически меняющейся силы по закону $\sin(x)$. Если верно предположение, что сила отталкивания зависит от колебаний подвешенной катушки или магнита, то, при уменьшении амплитуды колебаний, скорости, ускорения сила отталкивания соответственно уменьшится. Без этого предположения для одинакового отклонения подвешенного магнита с грузом требуется увеличение переменного тока в неподвижной катушке в два раза, с учетом предположения о влиянии колебаний подвешенного магнита на силу отталкивания увеличение переменного тока необходимо более чем в 2 раза. В опытах на частоте 8 Гц для отклонения магнита с грузом на 15 мм от положения равновесия требовалось 50 мА, для магнита без груза – 25 мА. На частоте 50 Гц для отклонения магнита с грузом на 21 мм требовалось 1,0 А, для магнита без груза 0,5 А. При увеличении массы магнита в 2 раза сила переменного тока в неподвижной катушке необходимо увеличить тоже в 2 раза для одинакового отклонения от положения равновесия подвешенного магнита относительно неподвижной катушки с переменным током. Поэтому предположение о том, что причина возникающей силы отталкивания связана с колебаниями подвешенной катушки с постоянным током или подвешенного магнита относительно неподвижной катушки с переменным током неверна. Следовательно, сила отталкивания между катушкой с

переменным током и катушкой с постоянным током, катушкой с переменным током и постоянным магнитом, не зависит от того, подвешена катушка с постоянным током или магнит относительно неподвижной катушки с переменным током или они тоже неподвижны относительно неподвижной катушки с переменным током.

И еще: на частоте 50 Гц при одинаковой силе тока отклонение от положения равновесия для магнита максимальное (по совмещенной ниже фотографии), алюминиевого бруска меньше, еще меньше замкнутого контура катушки из медной проволоки (в последних случаях взаимодействие вследствие возникновения индукционного тока в алюминиевом бруске и замкнутой катушке).



Сила отталкивания между магнитом и катушкой с переменным током не зависит от угла поворота вектора магнитной индукции магнита относительно оси катушки с переменным током (совмещенная фотография ниже, отклонение от положения равновесия одинаково, во всех случаях фотографии сила тока и частота одинаковы).



И еще: в опытах с использованием другого генератора наблюдался пик графика на частотах 0,6-0,8 Гц. Пик получался неровный, может это связано с моим оборудованием. Опыты проводились до 0,5 Гц. На частоте менее 0,5 Гц опыты не проводились. Время начала опытов 16 апреля 2019 года, в этот день я получил патент на полезную модель RU 188542 «Модель магнитного листка Ампера». Первые опыты проводились по взаимодействию неподвижного и вращающегося магнитов, у второго магнита ось вращения вектора магнитной индукции перпендикулярна вектору магнитной индукции неподвижного магнита. Сила отталкивания между магнитами сразу была заметна, на меньших частотах вращения сила отталкивания была больше, чем на больших частотах.