

В.Т. Чемерис

Моделирование электродинамических усилий в
лабораторной установке для демонстрации магнитной
левитации

Установка состоит из 3-х элементов:

1. Плоская катушка дискового типа.

Её размеры: толщина (с изоляцией) 10 мм, наружный диаметр 175 мм,

Диаметр центрального отверстия 65 мм.

Масса катушки 1,39 кг. Объём 209,07 см³.

Площадь полусечения 55 см².

Средняя плотность по объёму 6,648 г/см³. Сопротивление на постоянном токе 4,05 Ом.

Полное сопротивление на переменном токе частоты 50 Гц равно 8,356 Ом.

Индуктивное сопротивление 7,309 Ом.

Собственная индуктивность катушки по результатам этих измерений 23,28 мГн.

2. Тонкий диск из дюралюминия марки Д16.

Его размеры: толщина 4,5 мм. Наружный диаметр 150 мм.

Диаметр центрального отверстия 12 мм.

Масса диска 0,24 кг. Объём 87,792 см³.

Площадь полусечения 3,45 см².

Средняя плотность по объёму 2,733 г/см³.

Электропроводность дюралюминия 1,65e07 См/м («Большая энциклопедия нефти и газа», www.ngpedia.ru/ Сравнительные свойства сплавов Д1 и Д16).

3. Массивный диск из дюралюминия марки Д16.

Его размеры: толщина 18 мм. Наружный диаметр 200 мм.

Диаметр центрального отверстия 12 мм.

Масса диска 1,54 кг. Объём 563,45 см³.

Площадь полусечения $16,92 \text{ см}^2$.

Средняя плотность по объёму $2,733 \text{ г/см}^3$.

Электропроводность дюралю 1,65e07 См/м.

С помощью программы «ELCUT» версий 5.7 и 5.10 моделировались силы электромагнитного взаимодействия с каждым из дисков в отдельности (при отсутствии другого диска). Результаты измерений, полученных с помощью интегрального калькулятора, корректировались по условию равенства противодействующих сил (чтобы сила действия равнялась силе противодействия). Определялось среднее значение силы во времени и размах колебаний силы.

Схема расчётной модели показана на рис. 1-А и рис. 1-Б.

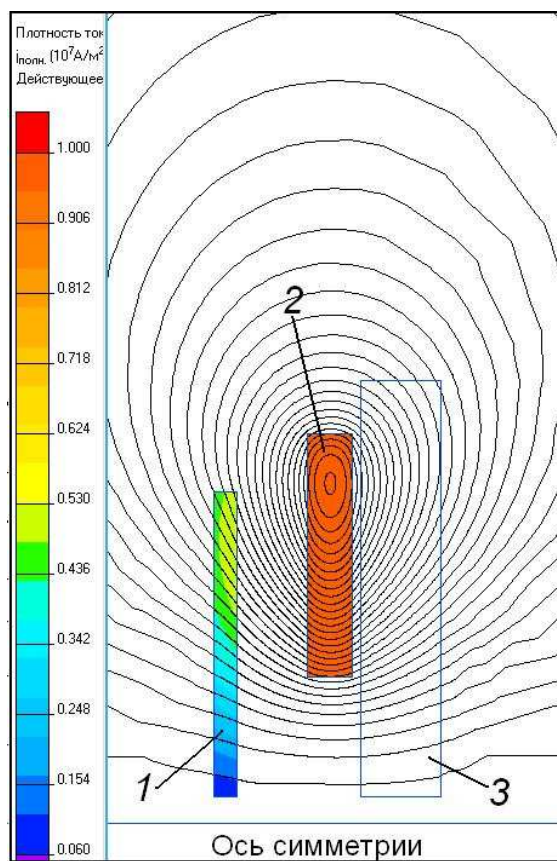


Рис. 1-А. Обозначения: 1 – тонкий диск; 2 – катушка, возбуждающая поле; 3 – массивный диск (в данном случае его проводимость принималась равной нулю)

Рис. 1-А отображает расчётную модель для определения силы взаимодействия между катушкой и тонким диском.

Сетка триангуляции выбиралась в пределах от 25 тысяч узлов до 120 тысяч узлов в зависимости от зазора между катушкой и диском.

При моделировании была задана средняя плотность тока по сечению катушки 10 A/мм^2 . Такая плотность тока может быть достигнута в кратковременных режимах (до 7-8 минут) при питании катушки током 21 A от лабораторного автотрансформатора при напряжении на его выходе 170 Вольт .

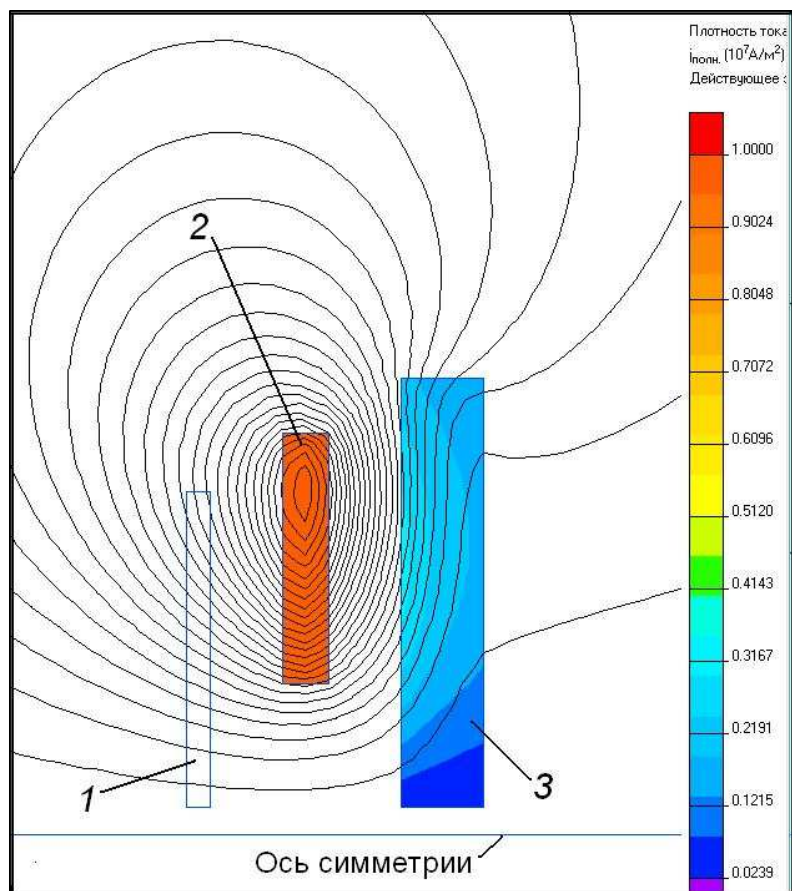


Рис. 1-Б. Обозначения: 1 – тонкий диск (в данном случае его проводимость принималась равной нулю); 2 – катушка, возбуждающая поле; 3 – массивный диск.

Рис. 1-Б отображает расчётную модель для определения силы взаимодействия между катушкой и массивным диском. Результаты моделирования представлены на рис. 2 и 3. Здесь даны зависимости средней силы взаимодействия от величины осевого зазора между диском и катушкой.

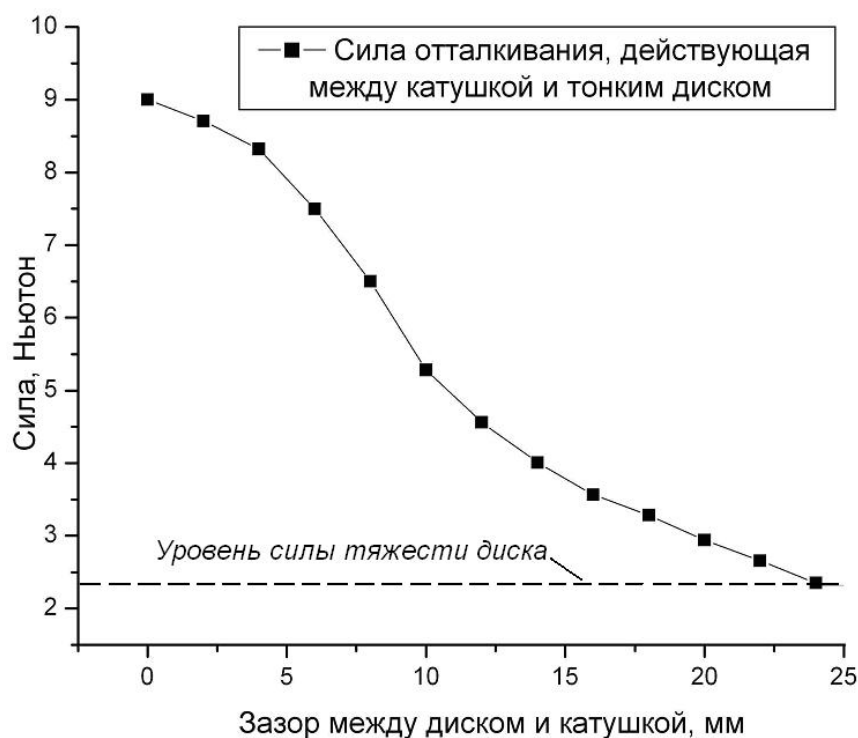


Рис. 2. Зависимость силы отталкивания между катушкой и тонким диском от величины зазора между ними

На графиках рис. 2 и 3 пунктирной линией показана сила тяжести соответствующего диска. При взаимодействии с каждым из дисков в отдельности поле катушки при указанном токе обеспечивает подъем и левитацию тонкого диска меньшей массы на высоту 24 мм (подразумевается, что катушка и диск расположены в горизонтальной плоскости) или же подъем и левитацию массивного диска большей массы на высоту 17,4 мм. Близкие к этим величины наблюдаются в условиях эксперимента.

Точное измерение высоты подвеса диска электромагнитными силами затруднено из-за вибрации диска в связи с тем, что электромагнитная сила пульсирует с двойной частотой питающего тока.

Вибрация меньше проявляется при левитации диска большей массы благодаря демпфирующему действию силы инерции и уменьшается с увеличением зазора между катушкой и диском.

Нагружая диски в состоянии левитации дополнительными грузами, можно получить экспериментальную зависимость высоты подвеса от суммарной массы диска и груза.

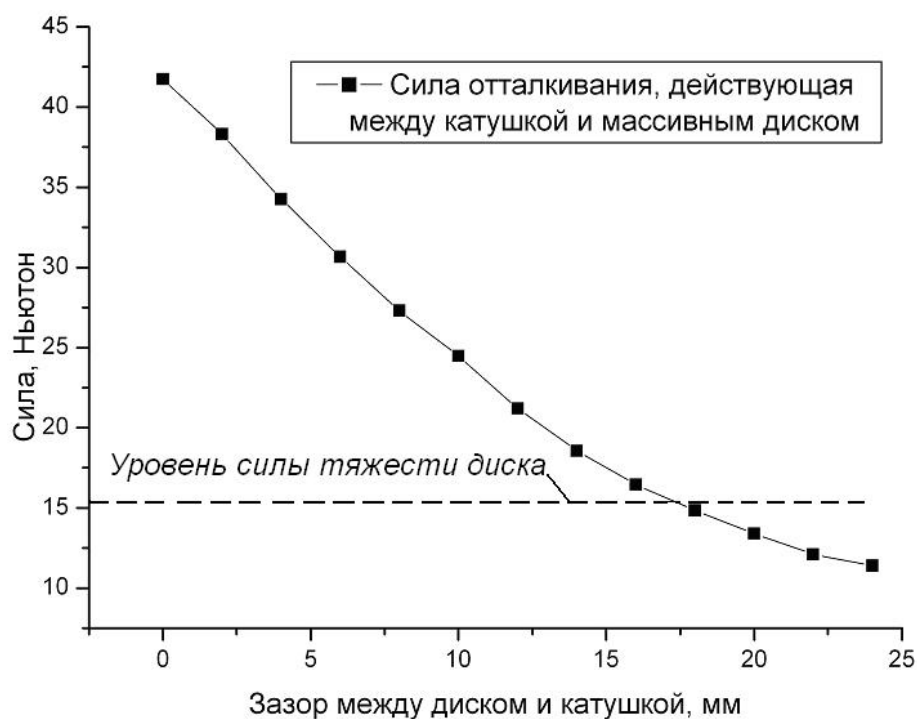


Рис. 3. Зависимость силы отталкивания между катушкой и массивным диском от величины зазора между ними.

Эксперимент позволяет получить зависимость высоты подвеса одного или другого диска от величины тока в катушке.

На установке можно демонстрировать левитацию самой катушки, если расположить её над диском большей массы. Поскольку масса катушки меньше, чем масса диска, высота её подъема в такой конфигурации будет большей, чем высота подъема диска, и составит около 20 мм.

На рис. 4-11 приведены фотографии установки в различных состояниях (исходное состояние, левитация).



Рис. 4. Общий вид установки (катушка обесточена)



Рис. 5. Режим левитации катушка посередине



Рис. 6. Тонкий диск на катушке в исходном состоянии



Рис. 7. Левитация тонкого диска



Рис. 8. Массивный диск на катушке в исходном состоянии



Рис. 9. Левитация массивного диска



Рис. 10. Катушка размещена над массивным диском (исходное положение)



Рис. 11. Левитация катушки над массивным диском

Об авторе

Чемерис Владимир Терентьевич, к. т. н, доцент, Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина