

Исследование индукционного метания цилиндрических проводников импульсным магнитным полем

Ильин Иван Евгеньевич

Физический факультет. Электромагнитный практикум. Курсовая работа.

Группа № 17345, 3 семестр, 2018 год

Научный руководитель:

к. ф.-м. н. Александр Георгиевич Анисимов

Аннотация

Целью работы было изучение метода индукционного метания проводников с помощью создания сильных магнитных полей. Источником энергии служил конденсатор, а поля создавались кольцевым индуктором. В качестве метаемого тела было рассмотрено цилиндрическое колечко. Причина разгона якоря - отталкивание разнонаправленных токов якоря и индуктора.

В данной работе определена скорость якоря при заданных параметрах цепи. В простом случае, когда сопротивление якоря равно нулю, а взаимоиנדукция якоря и индуктора не меняется во время разгона якоря, можно получить аналитическое решение для RLC цепи. Из этого решения сразу определяются ток в якоре и индукторе, а значит и распределение магнитного поля. Экспериментально измеренная скорость оказалась на 18% меньше полученной из аналитического решения.

Для более полного описания системы было получено дифференциальное уравнение, численным решением которого получился более точный результат скорости. Различие между экспериментом и практикой удалось сократить до 3%, что входит в пределы погрешности измерения скорости.

Ключевые слова: индуктор, индуктивный разгон, взаимоиנדукция.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Ильин Иван Евгеньевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Исследование индукционного метания цилиндрических проводников
импульсным магнитным полем**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №17345

Научный руководитель:

А. Г. Анисимов

Оценка научного руководителя

« _____ » _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Оценка преподавателя практикума

« _____ » _____ 20__ г.

Куратор практикума:

Итоговая оценка

« _____ » _____ 20__ г.

Рекомендуется к публикации в сборнике избранных курсовых работ
Научный руководитель
Преподаватель практикума
Куратор практикума

Аннотация

Целью работы было изучение метода индукционного метания проводников с помощью создания сильных магнитных полей. Источником энергии служил конденсатор, а поля создавались кольцевым индуктором. В качестве метаемого тела было рассмотрено цилиндрическое колечко. Причина разгона якоря - отталкивание разнонаправленных токов якоря и индуктора.

В данной работе определена скорость якоря при заданных параметрах цепи. В простом случае, когда сопротивление якоря равно нулю, а взаимоиנדукция якоря и индуктора не меняется во время разгона якоря, можно получить аналитическое решение для RLC цепи. Из этого решения сразу определяются ток в якоре и индукторе, а значит и распределение магнитного поля. Экспериментально измеренная скорость оказалась на 18% меньше полученной из аналитического решения.

Для более полного описания системы было получено дифференциальное уравнение, численным решением которого получился более точный результат скорости. Различие между экспериментом и практикой удалось сократить до 3%, что входит в пределы погрешности измерения скорости.

Ключевые слова: индуктор, индуктивный разгон, взаимоиנדукция.

Содержание

1	Схема установки	3
2	Теоретическая часть	4
3	Эксперимент	12
4	Численное моделирование	14
5	Заключение	20
	Список используемой литературы	21

Введение

Технология индукционного метания проводников с помощью сильных магнитных полей используется для разгона металлических объектов до больших скоростей. Устройства, работающие по принципу индукционно-динамического ускорителя (ИДУ), хорошо изучены и применяются, например, в оборонной промышленности или для сварки разных металлов.

Любой ИДУ состоит из индуктора, импульсного источника, который будет разряжаться на индукторе и якоря (разгоняемый проводник). В некоторых случаях для обеспечения начальной скорости используется взрывчатка или пружина [1] и [2]. В таких установках эффективность ИДУ может быть сильно улучшена.

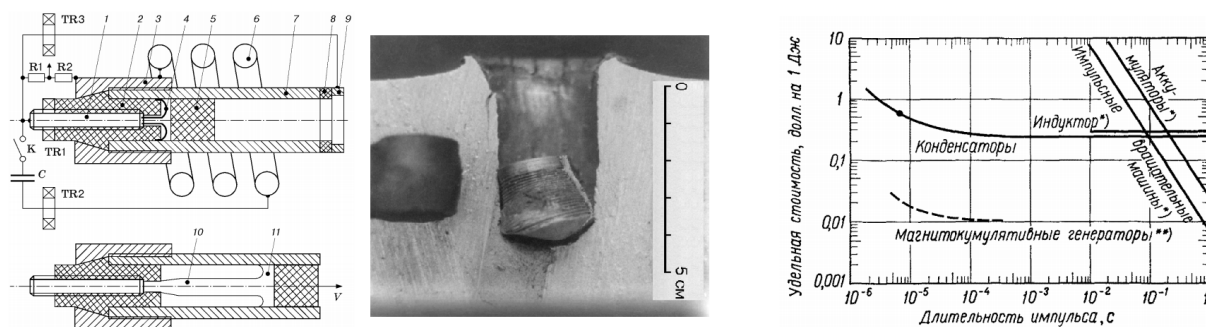


Рис. 1: Первая картинка — пробивание 5 сантиметрового слоя металла. Вторая — приближенная зависимость удельной стоимости (в долларах) энергии (в джоулях), передаваемой в оптимальную катушку, от времени нарастания [2]

В работе [3] выявлены оптимальные параметры первичной цепи, обеспечивающие наилучший разгон и минимальные потери.

В данной работе исследован ИДУ с одновитковым индуктором и цилиндрическим якорем. Одновитковый индуктор, по сравнению с многовитковым соленоидом, обладая меньшей индуктивностью позволяет пропускать большие импульсные токи, создающие достаточно мощный поток магнитного поля

через якорь.

Для генерации сильных магнитных полей требуется источник, который смог бы запастись необходимым объёмом энергии и преобразовать её за доли микросекунды. В данной работе используется батарея конденсаторов. Аналогами конденсаторов являются механические генераторы, основанные на явлении кумуляции магнитного поля, и химические батареи. Выбор конденсатора обоснован долговечностью и относительно низкой стоимостью (рис. 1).

1 Схема установки

Схема установки представлена на (рис. 2). Во избежание взрыва индуктора из-за его расширения он расположен в корпусе из плотного материала. Якорь, представляющий из себя медное кольцо, в покое располагается на поверхности индуктора. Направляющий цилиндр обеспечивает ускорение по заданной траектории. На некотором расстоянии от индуктора находится датчик положения, который срабатывает, когда кольцо, врезаясь в верхнюю часть датчика, замыкает его контакты. Для обеспечения сильного магнитного поля нужен источник, который смог бы на небольшом промежутке времени обеспечить большой ток. Самым доступным таким источником является конденсатор.

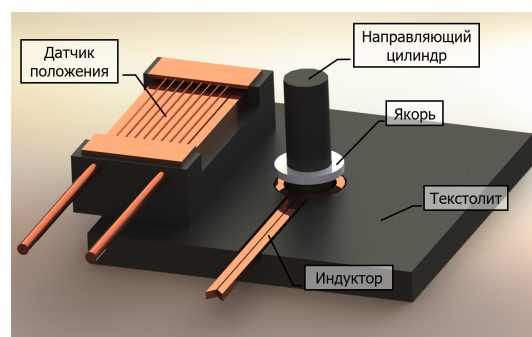


Рис. 2: Схема нашей установки

2 Теоретическая часть

Принцип работы ИДУ основан на явлении электромагнитной индукции.

Рассмотрим, что происходит, когда по индуктору течет ток. Понятно, что тогда во всём пространстве появляется магнитное поле, которое можно посчитать, используя закон Био-Савара-Лапласа. Вычислим магнитное поле, создаваемое кольцом с током I радиуса R . Будем считать, что толщина провода много меньше радиуса R . (рис. 3).

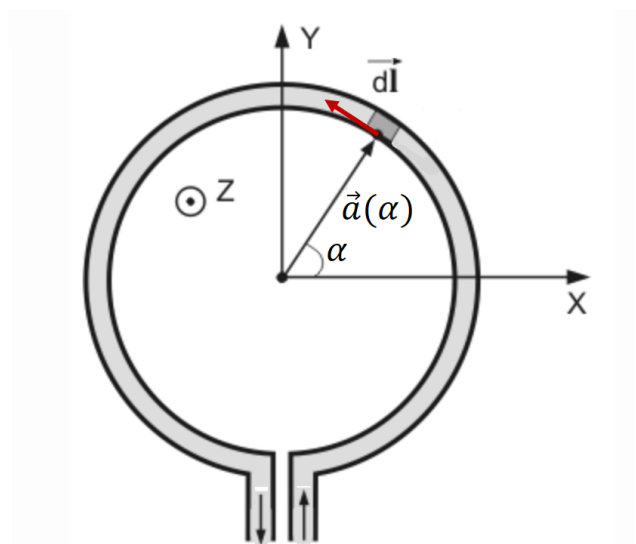


Рис. 3: Схематичное изображение кольца с током

Согласно закону Био-Савара-Лапласа:

$$d\mathbf{H} = \beta \frac{[d\mathbf{l} \times \mathbf{r}]}{r^3}, \quad (1)$$

где $\mathbf{r}$ - вектор, соединяющий элемент проводника с точкой наблюдения. $\beta = \frac{\mu_0 I}{4\pi}$.

Начало координат находится в центре кольца. Кольцо при этом лежит в плоскости XY . Ясно, что задача симметрична относительно оси Z , проходящей через центр кольца. Для простоты решения найдем поле в плоскости XZ ($y = 0$). То есть вычислим поле в точке $A(x, 0, z)$ (рис. 4).

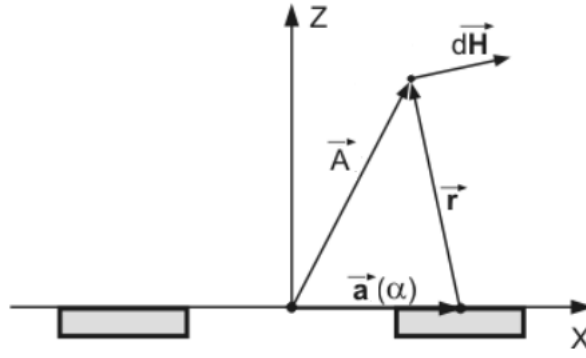


Рис. 4: Схематичное изображение кольца с током

Радиус вектор $\mathbf{r}$ от точки A до элементарного элемента длины кольца $d\mathbf{l}$:

$$\mathbf{r} = \mathbf{A} - \mathbf{R}(\alpha) = \begin{bmatrix} x - a \cos \alpha \\ y - a \sin \alpha \\ z \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Вектор $d\mathbf{l}$ записывается следующим образом:

$$d\mathbf{l} = \begin{bmatrix} -a \sin \alpha \\ a \cos \alpha \\ 0 \end{bmatrix} d\alpha. \quad (3)$$

Подставляя (2) и (3) в (1) получим:

$$d\mathbf{H} = \frac{\beta}{r^3} \begin{bmatrix} za \cos \alpha \\ za \sin \alpha \\ a^2 - R x \cos \alpha \end{bmatrix} d\alpha,$$

где $r^3 = (z^2 + x^2 + a^2 - 2xa \cos \alpha)^{3/2}$

Для получения суммарного поля в точке $(x, 0, z)$, нужно проинтегрировать

$d\mathbf{H}$ по углу в пределах $(0, 2\pi)$:

$$H_x = \frac{\beta z a}{(z^2 + x^2 + a^2)^{3/2}} \int_0^{2\pi} \frac{\cos \alpha}{(1 - k \cos \alpha)^{3/2}} d\alpha,$$

$$H_y = 0,$$

$$H_z = \beta a \int_0^{2\pi} \frac{a - x \cos \alpha}{(z^2 + x^2 + a^2 - 2xa \cos \alpha)^{3/2}} d\alpha,$$

где

$$k = \frac{2xa}{z^2 + x^2 + a^2}.$$

Численным интегрированием получаем распределение поля (рис. 5).

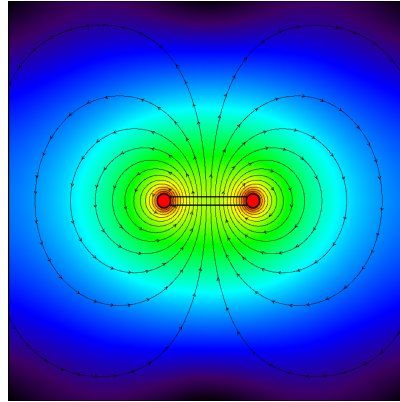


Рис. 5: Результат расчета магнитного поля для кольца с током

Из-за того, что ток в индукторе постоянно изменяется во время разрядки конденсатора, меняется и поле во всем пространстве. Это приводит к тому, что меняется поток через поверхность, краем которой является контур якоря. Согласно закону Фарадея, в якоре наводится ЭДС:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$$

которое индуцирует в нем ток. При возрастании потока, ток будет течь противоположно току в индукторе. Когда поток начнет уменьшаться, ток в якоре постепенно начнет менять своё направление.

Посмотрим, что происходит близи якоря и индуктора в момент роста тока в индукторе (рис. 6).

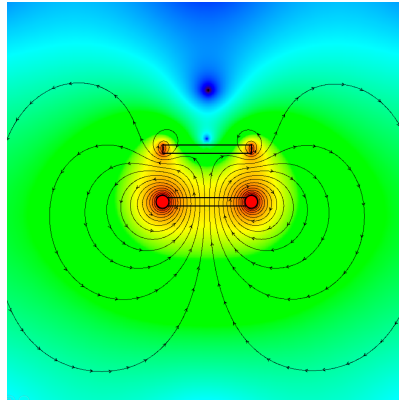


Рис. 6: Результат расчета магнитного поля для двух колец с противоположно направленными токами

Видно, что взаимодействие маленьких участков локально происходит так же, как взаимодействие разнонаправленных токов. Мы знаем, что провода с разнонаправленными токами отталкиваются. Взаимодействие индуктора с якорем приводит к разгону снаряда. Нужно заметить, что взаимодействие токов будет так же приводить к появлению радиальных сил, влияние которых мы рассмотрим позже.

Нашей задачей будет посчитать конечную скорость якоря и сравнить полученные результаты с экспериментом.

Для расчета силы нужно иметь распределение магнитного поля, а значит и токи I_1 и I_2 в индукторе и якорю соответственно. Для рассмотрения процессов, происходящих во время разрядки, рассмотрим эквивалентную цепь установки (рис. 7):

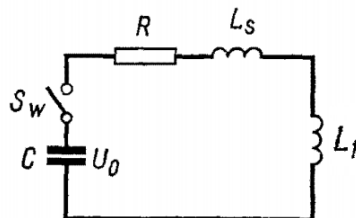


Рис. 7: LCR-цепь с постоянными параметрами. Ёмкость нашего конденсатора $C = 200\mu\text{Ф}$

Первым, грубым приближением будет рассмотрение задачи с постоянными ёмкостью C , индуктивностью индуктора L_1 , индуктивностью цепи и подводящих линий L_s и общим омическим сопротивлением всей цепи R .

Из закона Кирхгофа получаем дифференциальное уравнение для тока I , протекающего в индукторе:

$$L \frac{d^2 I}{dt^2} + R \frac{dI}{dt} + \frac{1}{C} I = 0, \quad (4)$$

где $L = L_s + L_1$

При $R < 2\sqrt{L/C}$ затухание цепи меньше критического и решение уравнения (4) имеет вид:

$$I(t) = \frac{U_0}{\omega L} \exp\left(-\frac{R}{2L}t\right) \sin \omega t, \quad (5)$$

где U_0 — начальное напряжение на конденсаторе, а ω — угловая частота.

$$\omega = \left(\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}\right)^{1/2} = \omega_0 \sqrt{1 - \gamma^2},$$

где

$$\gamma = \frac{1}{2} R \sqrt{\frac{C}{L}}$$

безразмерный параметр, а $\omega_0 = \sqrt{1/LC}$.

При $R > 2\sqrt{L/C}$ затухание цепи больше критического и решение имеет вид:

$$I(t) = \frac{U_0}{\omega^* L} \exp\left(-\frac{R}{2L}t\right) sh(\omega^* t). \quad (6)$$

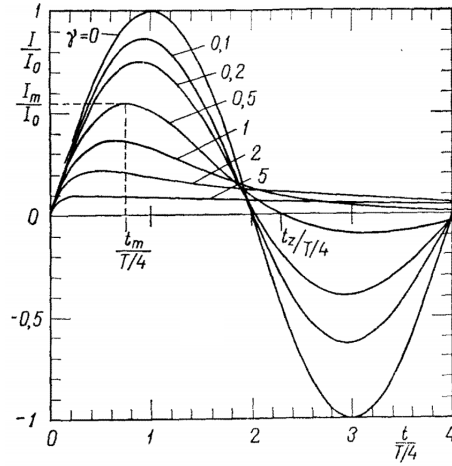


Рис. 8: Ток разряда для различных значений $\gamma = 1/2 R\sqrt{C/L}$

При затухании цепи, равному критическому значению ($R = 2\sqrt{L/C}$):

$$I(t) = \frac{U_0}{L} t \exp\left(-\frac{R}{2L}t\right). \quad (7)$$

Некоторые случаи решений (5), (6) и (7) изображены на (рис. 8) [4].

В случае, когда нет потерь ($R = 0$, $\gamma = 0$) решение (5) упрощается:

$$I = I_0 \sin \omega t,$$

где

$$I_0 = U_0 \sqrt{C/L},$$

А период колебаний в такой цепи:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Посмотрим, что изменится, если добавить в схему (рис. 7) якорь (L_2):

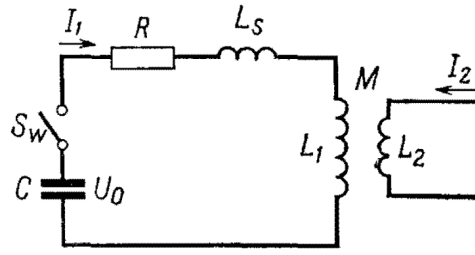


Рис. 9: Система конденсаторной батареи с трансформатором

Грубым приближением якоря является индуктивность без омического сопротивления. Будем считать, что коэффициент взаимной индукции M не меняется по мере разрядки конденсатора и движения якоря:

$$M = K\sqrt{L_1 L_2},$$

где $K = \text{const}$ - коэффициент связи.

Возможность использования всех вышеперечисленных предположений и допущений будет доказана далее.

Уравнения для двух цепей (рис. 9) записываются в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{1}{C} \int_0^t I_1 dt + RI_1 + (L_s + L_1) \frac{dI_1}{dt} + M \frac{dI_2}{dt} &= 0, \\ L_2 \frac{dI_2}{dt} + M \frac{dI_1}{dt} &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Преобразуем первое уравнение, исключая из него I_2 :

$$L_E \frac{d^2 I_1}{dt^2} + R \frac{dI_1}{dt} + \frac{1}{C} I_1 = 0, \quad (9)$$

где

$$L_E = L_s + L_1(1 - K^2).$$

Видно, что уравнение (9) эквивалентно (4) (С заменой L_1 на $L_1(1 - K^2)$),

решение которого уже получено.

Выражение для тока в якоре получается интегрированием второго уравнения из (8):

$$I_2 = -\frac{M}{L_2} I_1. \quad (10)$$

Из (10) следует, что ток в якоре всегда течет противоположно току в индукторе. Это значит, что якорь всегда отталкивается от индуктора.

Теперь, когда у нас есть ток $I_1(t)$, можно получить зависимость $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$ поля от времени. Для подсчёта разгоняющей силы нам потребуется проекция $\mathbf{H}$ на ось XU .

В каждой точке якоря поле одинаково, а значит вертикальная сила будет записываться следующим образом:

$$F_z = 2\pi b I_2 H_x(b, 0, z),$$

где b - радиус якоря.

Используя (1) получаем:

$$F_z = \left(\frac{U_0}{\omega L}\right)^2 \frac{Mabz\mu_0}{2L_2} \exp\left(-\frac{R}{L}t\right) \sin^2 \omega t \int_0^{2\pi} \frac{\cos \alpha}{r^3} d\alpha.$$

Считая, что разгон в основном происходит во время первого колебания тока в конденсаторе, изменение импульса якоря:

$$\Delta P_z = \int_0^T F_z dt,$$

где $T = 2\pi/\omega$.

3 Эксперимент

Наша экспериментальная установка состоит из индуктора, метаемого якоря и конденсаторной батареи.

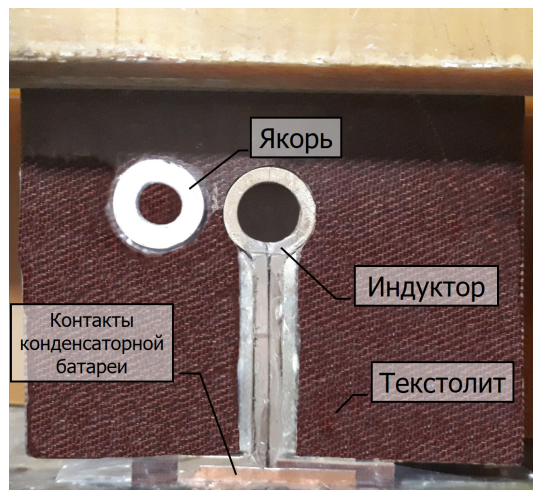


Рис. 10: Экспериментальная установка, состоящая из индуктора и метаемого якоря

Для изучения процессов, происходящих во время разрядки, на осциллограф записывалась зависимость силы тока от времени. Во избежание взрыва индуктора из-за его расширения он расположен в корпусе из плотного материала. Якорь, представляющий из себя медное кольцо, в покое располагается на поверхности индуктора (рис. 10).

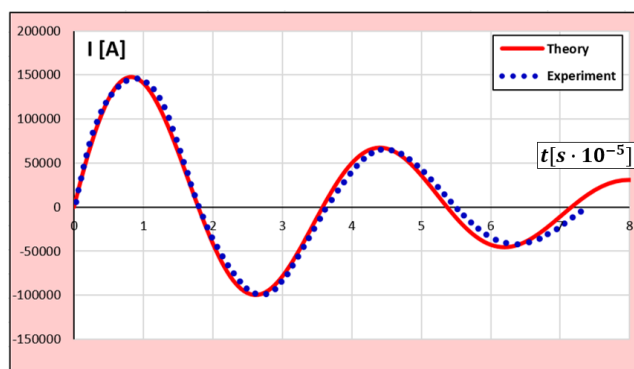


Рис. 11: Зависимость силы тока от времени

Мы запустили установку и получили зависимость силы тока от времени, которую сравнили с решением (5) (рис. 11).

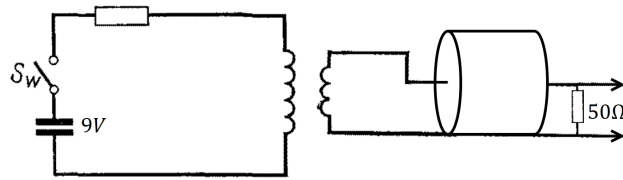


Рис. 12: Принципиальная схема контактного датчика

Видно, что различия между экспериментом и теорией не существенны, а значит мы можем использовать решение (5) для получения распределения магнитного поля и расчёта силы взаимодействия индуктора и метаемого якоря.

Для получения средней скорости якоря мы использовали контактный датчик (рис. 12). Когда якорь налетает на контактный датчик, он замыкает цепь. После замыкания конденсатор, заряженный на $9V$, начинает разряжаться, а сигнал по коаксиальному кабелю передаётся на осциллограф. По первому большому всплеску сигнала мы определяли время полёта якоря (рис. 13).

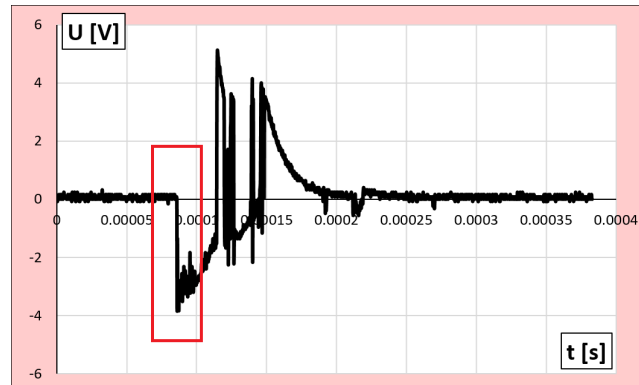


Рис. 13: Зависимость напряжения от времени контактного датчика

При напряжении на конденсаторе $U_0 = 5 \text{ kV}$ и расстоянии между точкой запуска и контактным датчиком $l = 20 \text{ mm}$ время полёта получилось $\tau \approx 86 \text{ }\mu\text{s}$. Тогда средняя скорость якоря $V_{exp} = 230 \pm 10 \text{ m/s}$.

Теоретические расчёты дают среднюю скорость $V_{th} = 273 \text{ m/s}$. Видно, что есть отличие на 18%, причину которого мы рассмотрим далее.

Как было отмечено ранее, помимо вертикальной силы, разгоняющей снаряд, существуют радиальные силы. Причиной их появления является взаимодействие индуктора с якорем и отдельных частей индуктора между собой. Эти взаимодействия при больших токах приводят к растяжению индуктора, а в некоторых случаях даже к разрыву (рис. 14).

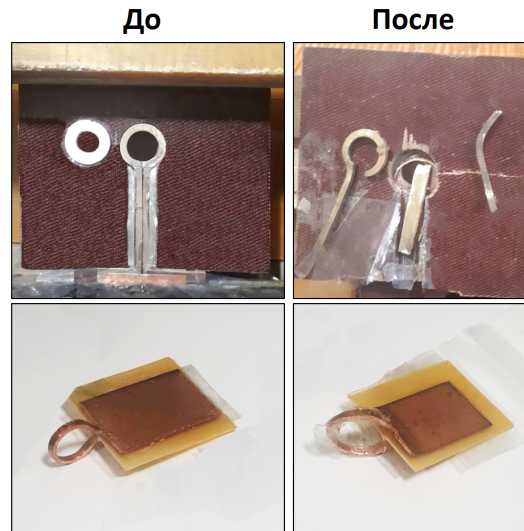


Рис. 14: Расширение и разрыв индуктора

4 Численное моделирование

Для более детального анализа нашей установки и доказательства корректности всех вышеперечисленных предположений нужно сделать точное описание системы, учитывая тот факт, что якорь имеет некоторое сопротивление R_2 , а коэффициент взаимной индукции якоря и индуктора меняется по мере движения первого относительно второго.

Запишем (8) с учетом всех поправок:

$$\begin{aligned} \frac{1}{C} \int_0^t I_1 dt + R_1 I_1 + (L_s + L_1) \frac{dI_1}{dt} + M \frac{dI_2}{dt} + I_2 \frac{dM}{dt} &= 0, \\ L_2 \frac{dI_2}{dt} + R_2 I_2 + M \frac{dI_1}{dt} + I_1 \frac{dM}{dt} &= 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Коэффициент взаимной индукции для случая линейных токов может быть вычислен следующим образом [5]:

$$M = \mu \oint \oint \frac{d\mathbf{l}_1 d\mathbf{l}_2}{r_{12}}. \quad (12)$$

Индуктор и якорь представляют из себя два кольца с токами:

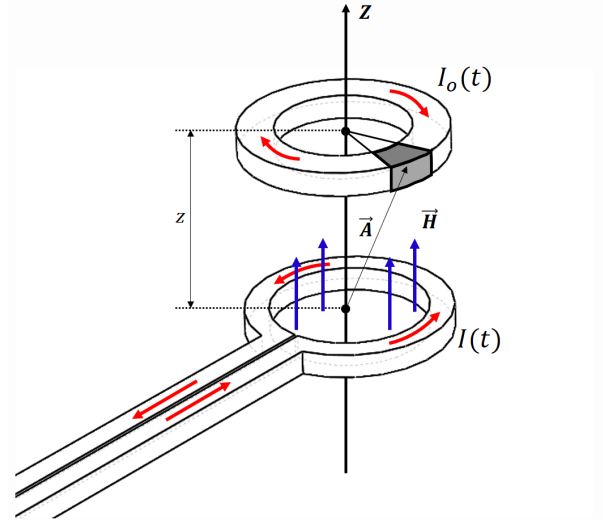


Рис. 15: Якорь и индуктор

Из (12) получим:

$$M = 4\pi\sqrt{ab} \left[\left(\frac{2}{k} - k \right) K(k) - \frac{2}{k} E(k) \right], \quad (13)$$

где

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\psi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \psi}},$$

$$E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \psi} d\psi,$$

$$k^2 = \frac{4ab}{(a+b)^2 + z^2}.$$

Для проверки (13) мы использовали магнитный датчик (рис. 16).

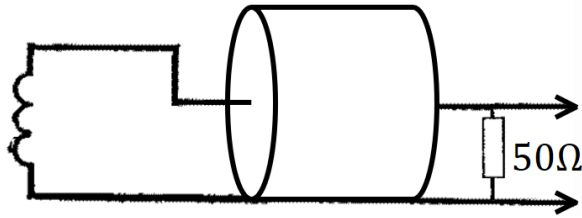


Рис. 16: Принципиальная схема магнитного датчика

Через индуктивность магнитного датчика создаётся поток поля, который меняется во времени. В соответствии с законом Фарадея это приводит к появлению ЭДС индукции:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt},$$

$$L_{12}I_1 + L_2I_2 = \Phi = -\int_0^t \varepsilon dt.$$

В цепи магнитного датчика присутствует относительно большое сопротивление $\approx 50 \Omega$, а значит $I_2 \ll I_1$:

$$L_{12} = -\frac{1}{I_1} \int_0^t \varepsilon dt.$$

Типичный сигнал с датчика показан на (рис. 17).

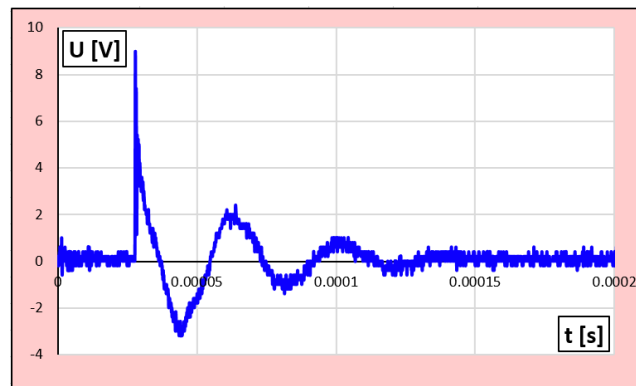


Рис. 17: Зависимость ЭДС от времени для магнитного датчика

После интегрирования правой части получаем поток:

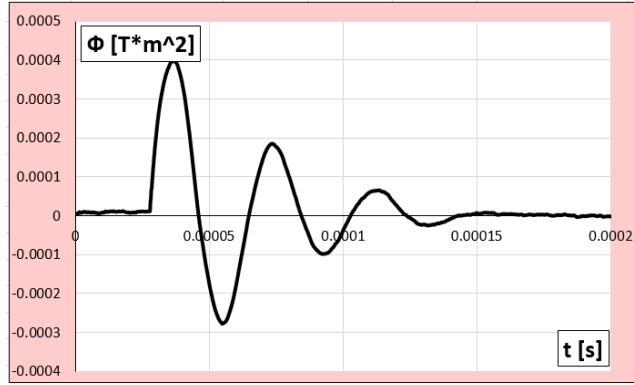


Рис. 18: Зависимость потока от времени для магнитного датчика

Мы провели измерение индуктивности для нескольких расстояний от индуктора до магнитного датчика (рис. 19). Видно, что формула (13) хорошо описывает эксперимент, а значит можно пользоваться этим результатом для численного моделирования.

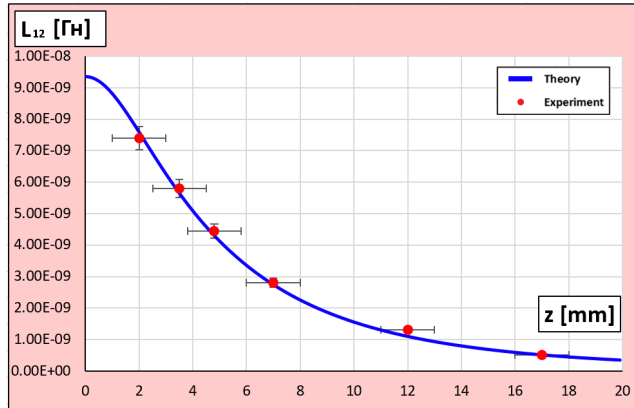


Рис. 19: Зависимость взаимной индуктивности от расстояния

Производную по времени $\dot{M}$ по цепному правилу переводим в производную по расстоянию, после чего считаем ее методом конечных приращений.

$$\frac{dM(t)}{dt} = \frac{dM(z)}{dz} \frac{dz(t)}{dt}$$

Для численного моделирования нужно выразить производную тока через ток:

$$\frac{dI_1}{dt} = \frac{I_1 [\gamma \dot{M} - R_1] - I_2 [\gamma R_2 + \dot{M}] - U(t)}{L_s + L_1 - \gamma M},$$

где

$$U(t) = \frac{1}{C} \int_0^t I_1 dt,$$

$$\gamma = \frac{M}{L_2}.$$

Производную $\dot{I}_2$ находим, подставляя $\dot{I}_1$ во второе уравнение в (11). Для лучшего понимания работы алгоритма численного интегрирования мы сделали блок-схему (рис. 20).

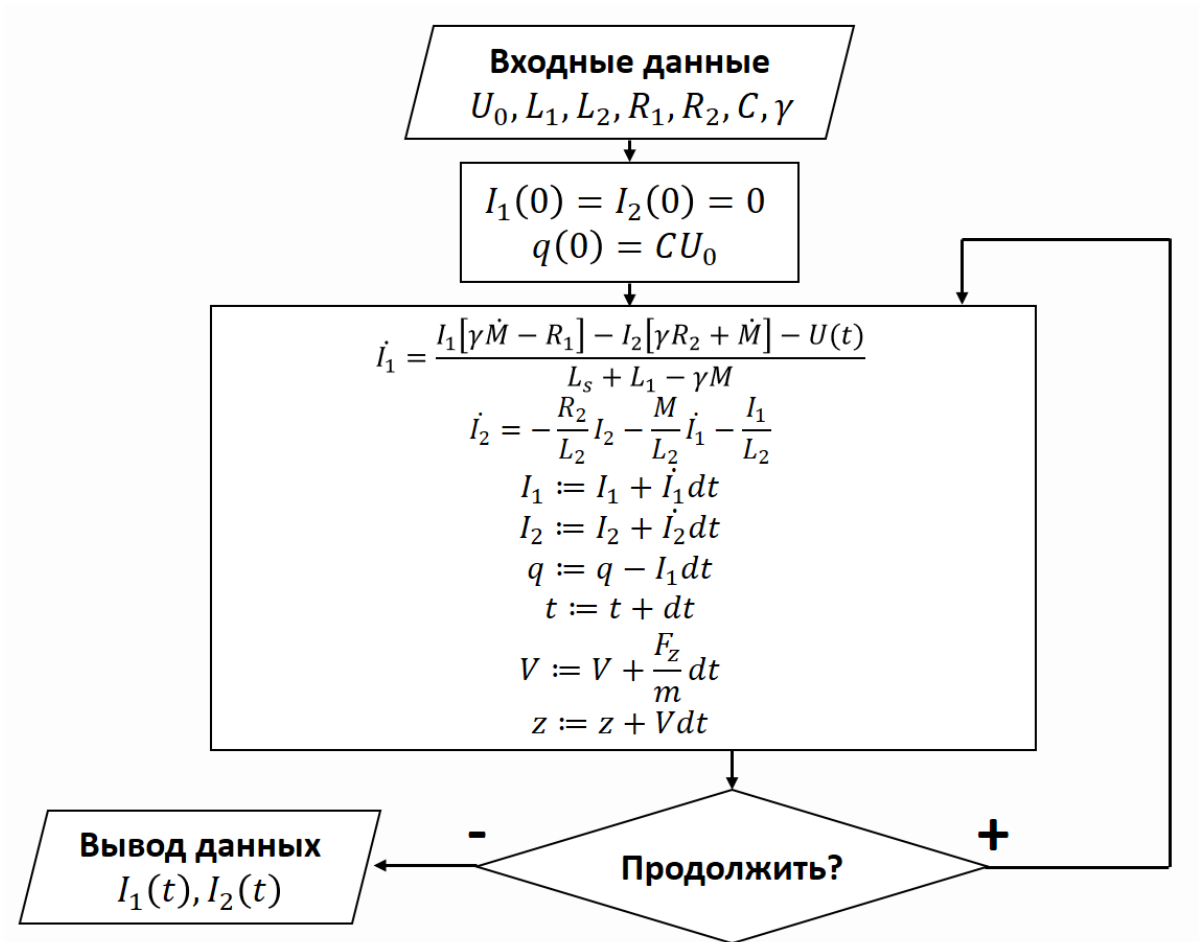


Рис. 20: Алгоритм численного моделирования

Правильность численного моделирования проверялась непосредственным сравнением с аналитическим решением (5), полученным ранее (рис. 21). Видно, что учет сопротивления и изменения индуктивности немного уменьшает частоту колебания тока.

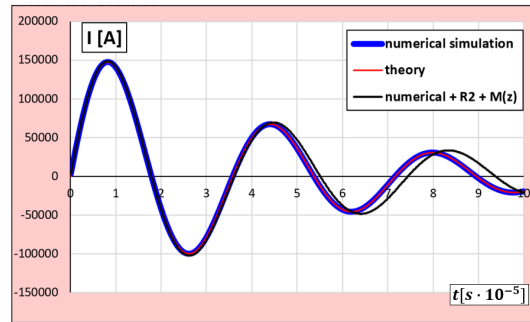


Рис. 21: Сравнение численного моделирования с аналитическим решением

Красная линия — аналитическое решение, синяя — численное моделирование при нулевом сопротивлении якоря и постоянной взаимоиндукции, чёрная — численное моделирование с учётом сопротивления якоря и изменении взаимоиндукции.

Сравним силу, действующую на якорь, в случае численного моделирования и аналитического решения (рис. 22).

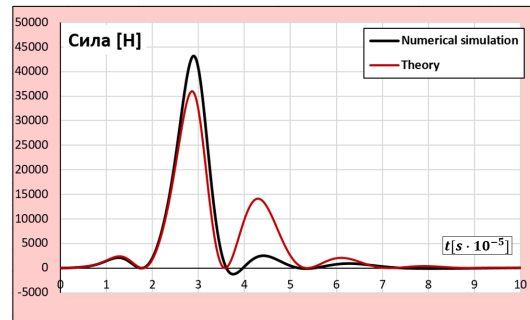


Рис. 22: Сравнение силы, действующей на якорь, в случае численного моделирования с аналитическим решением

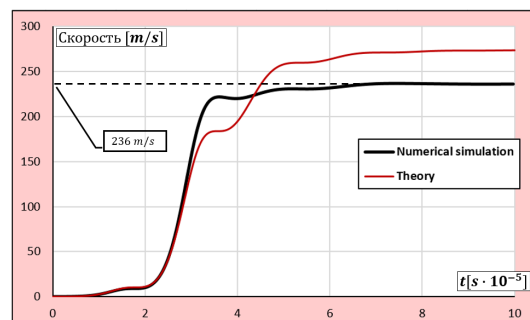


Рис. 23: Зависимость скорости якоря от времени

Видно, что разгон якоря происходит за первый период колебания тока. После этого якорь выходит на постоянную скорость так как расстояние до

индуктора становится большим и взаимодействие с ним становится незначительным (рис. 22).

Численное моделирование дало более близкий к эксперименту результат скорости $V_n = 236 \text{ m/s}$ (Эксперимент показал $V_{exp} = 230 \pm 10 \text{ m/s}$). Различие между экспериментом и практикой удалось сократить до 3%, что входит в пределы погрешности измерения скорости.

В случае, когда хватает точности в 18% (нужно лишь протестировать и оптимизировать параметры системы), можно использовать аналитическое решение.

5 Заключение

Технология индукционного метания проводников с помощью сильных магнитных полей используется для разгона металлических объектов до больших скоростей. Причина разгона якоря - отталкивание разнонаправленных токов якоря и индуктора. В данной работе мы научились определять скорость якоря при заданных параметрах цепи.

Для определения скорости нам понадобилось рассчитать силу, действующую на якорь. В простом случае, когда сопротивление якоря равно нулю, а взаимоиנדукция якоря и индуктора не меняется во время разгона якоря, можно получить аналитическое решение для RLC цепи. Из этого решения сразу определяются токи в якоре и индукторе, а значит и распределение магнитного поля. Экспериментально измеренная скорость $V_{exp} = 230 \pm 10 \text{ m/s}$ оказалась на 18% меньше полученной из аналитического решения.

Для более полного описания системы было получено дифференциальное уравнение, численным решением которого достигнут более точный результат скорости $V_n = 236 \text{ m/s}$. Различие между экспериментом и практикой удалось

сократить до 3%, что входит в пределы погрешности измерения скорости. Выражение для взаимоиנדукции было найдено с помощью интеграла Неймана и выражено через эллиптические интегралы второго рода. Экспериментально полученная зависимость взаимоиנדукции от расстояния совпала с теоретическим предсказанием в пределах погрешностей.

Список литературы

- [1] В.Ф. Болюх, К.В. Корытченко, А.Г. Кочерга. Индукционно-динамическое ускорение массивных объектов, обладающих начальной скоростью. НТУ "ХПИ 2010г.
- [2] А. А. Сивков Гибридная электромагнитная система метания твёрдых тел. Федеральное государственное унитарное предприятие Издательство Сибирского отделения Российской академии наук, 2001г.
- [3] В. Т. Чемерис, В. В. Машталир, А. Е. Маринченко. Определение эквивалентного сопротивления первичной цепи индукционного ускорителя для метания макротел. Вісн. Приазов. держ. техн. ун-ту, 2009 г.
- [4] Г. Кнопфель Сверхсильные импульсные магнитные поля. Москва: Издательство «Мир», 1972г.
- [5] В. В. Батыгин, И. Н. Топтыгин. Сборник задач по электродинамике. Зри-мо* Москва, 2002г.