

Аннотация

Работа посвящена определению параметров быстродействия трубчатого электромагнита в зависимости от питающего напряжения, подаваемого на его катушку. Для достижения этой цели использовались два метода: первый с применением высокоскоростной видео фиксации непосредственно передвижения якоря после подачи питания на электромагнит, второй метод основан на анализе изменения тока в катушке при перемещении якоря. Комбинация этих методов позволила получить детальную информацию о процессе перемещения якоря и изменения сопутствующих электрических параметров в системе. В результате экспериментов показано значительное влияние величины питающего напряжения, подаваемого на электромагнит, на его характерное время срабатывания, которое составило 53 мс при $U = 12$ В и уменьшается до 19 мс при $U = 36$ В. Полученные данные о быстродействии необходимы для проработки устройства по введению локализованных в пространстве и времени возмущений средней скорости потока на основе электромагнитов.

Ключевые слова: электромагнит, магнитное поле, быстродействие, время срабатывания.

Оглавление

1. Введение	4
2. Теоретическая часть	4
2.1. Устройство трубчатого электромагнита.	4
2.2. Рабочий цикл электромагнита.	6
3. Экспериментальная часть	7
4. Результаты эксперимента	9
5. Заключение	12
6. Список литературы	13

1. Введение

Электромагнит – устройство, создающее магнитное поле при помощи электрического тока, проходящего через него [1]. Его принцип действия и устройство довольно просты, что обуславливает распространенность и надежность механизмов на его базе. Возможность создания электромагнитов с разнообразными характеристиками (тяговое усилие, время срабатывания и быстродействие, мощность и т.д.) позволили им найти широкое применение во многих областях науки и техники. Они используются в бытовых приборах, устройствах связи, промышленности, медицине. Особой областью применения электромагнитов являются электромагнитные механизмы, где электромагниты используются в качестве приводов для осуществления необходимого поступательного перемещения рабочего тела или создания удерживающей силы [2].

В рамках работы, проводимой в институте ИТПМ СО РАН, по исследованию динамики развития нестационарного отрывного течения в условиях полета при малых числах Рейнольдса и сильных возмущениях создаётся устройство для внесения локализованных возмущений в поток. Из возможных вариантов привода устройства был выбран электромагнитный, с использованием трубчатых электромагнитов. Характерные параметры работы устройства завязаны на его быстродействие.

Таким образом, задача данной работы заключается в определении зависимости быстродействия трубчатого электромагнита постоянного тока от параметров питания.

2. Теоретическая часть

2.1. Устройство трубчатого электромагнита.

Несмотря на большое разнообразие трубчатых электромагнитов все они в основе имеют общую принципиальную схему, которая представлена на рис. 1.

Трубчатый электромагнит состоит из катушки (4), ферромагнитного сердечника (1) – неподвижная часть - и якоря (2) – подвижная часть. Якорь частично располагается внутри катушки и представляет собой часть электромагнита, которая воспринимает электромагнитное усилие и передаёт его деталям механизма, приводимого в действие. Якорь движется поступательно.

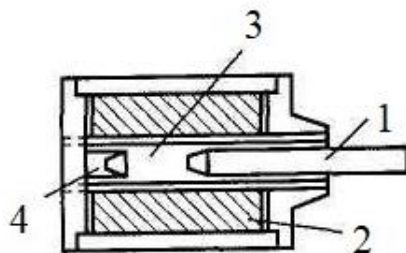


Рис.1. Электромагнит с якорем.

1 – якорь; 2 – катушка; 3 – направляющая трубка; 4 – сердечник.

При протекании тока по катушке в ней формируется магнитное поле (рис.2). Величина магнитного поля определяется параметрами катушки и протекающим током [1]:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{l} = \mu_0 I n,$$

где N – число витков, l – длина соленоида, μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость, n – число витков в единице длины.

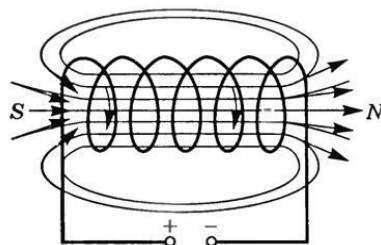


Рис. 2. Магнитное поле в соленоиде.

Магнитное поле внутри соленоида усиливается сердечником из ферромагнетика. Ферромагнетики имеют очень высокую магнитную восприимчивость.

Сила, действующая на якорь электромагнита, зависит от магнитного поля, возникающего при протекании тока по катушке, конструкции электромагнита, материалов сердечника и т.д. подробно методы расчета силы притяжения и преобразование энергии в электромагните можно посмотреть в [2, 3]. Таким образом изменяя параметры источника питания можно управлять динамическими характеристиками электромагнита якоря.

2.2. Рабочий цикл электромагнита.

Работа электромагнита в механизме, как правило, имеет циклический характер и состоит из нескольких стадий. На рис. 3 подробно рассмотрен начальный этап работы электромагнита после подачи питания на его катушку [4]. Этап срабатывания начинается с момента подачи питания на обмотку электромагнита, когда якорь находится в своём начальном положении.

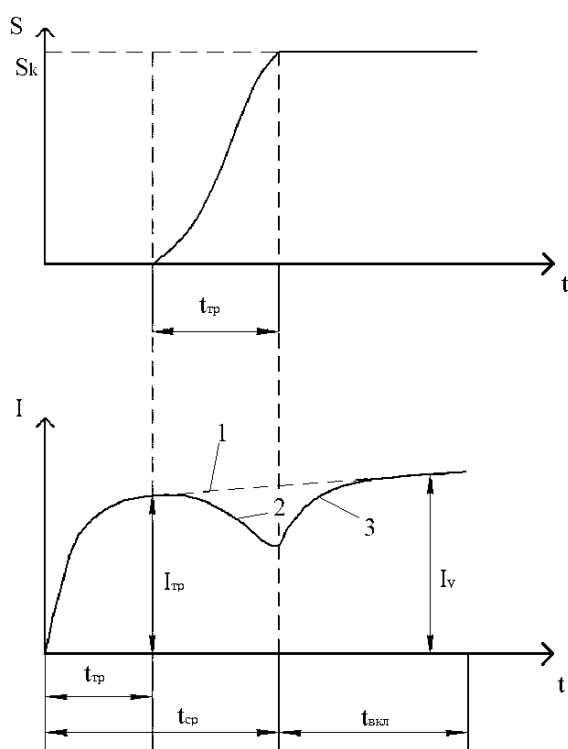


Рис. 3. Рабочий цикл электромагнита.

$t_{тр}$ — время трогания, $t_{ср}$ — время срабатывания, $t_{вкл}$ — время включения, S_k — конечное положение якоря, $I_{тр}$ — ток трогания, I_u — установившийся ток; 1 — нарастание тока в обмотке при неподвижном якоре; 2 — уменьшение тока в обмотке под действием ЭДС; 3 — нарастание тока в обмотке в состоянии покоя системы.

Во время этапа трогания ток в обмотке достигает определенной величины, создающей магнитный поток, необходимый для равенства электромагнитной силы и силы, противодействующей движению. Затем якорь начинает двигаться с некоторым ускорением, вследствие чего появляется противо-ЭДС, поэтому величина тока в катушке уменьшается. Когда якорь находится в конечном положении, система переходит в состояние покоя, а обмотка все ещё остаётся подключенной к питанию, при этом ток возрастает до некоторого установившегося значения. Время срабатывания составляет сумму времен трогания и перемещения якоря.

3. Экспериментальная часть

В работе определялись параметры быстродействия трубчатого электромагнита постоянного тока от параметров питания. Использовался трубчатый электромагнит закрытого типа, модель: ТМ-2551Т («Магнитек»), с номинальным постоянным рабочим напряжением 12 В и способный работать при повышенном напряжении до 38 В, с ограничением по времени включения. Сопротивление катушка электромагнита составляет 14,4 Ом, ход якоря 20 мм. Для определения параметров быстродействия трубчатого электромагнита применялся комбинированный метод с использованием высокоскоростной видео фиксации передвижения якоря после подачи питания и одновременная запись электрических параметров (напряжения, силы тока в обмотке от времени), что позволяло получать детальную информацию о характерных временах трогания, перемещения якоря, величинах тока.

Основными элементами экспериментальной схемы, представленной на рис. 4, являются лабораторный источник питания (2), на котором устанавливалось различное выходное напряжение: 12В, 18В, 24В, 30В и 36В; ключ на мосфете (1), с помощью которого осуществлялось управление электромагнитом; АЦП L-CARD E20-10(V); шунтирующее сопротивление(R) и сам электромагнит (3).

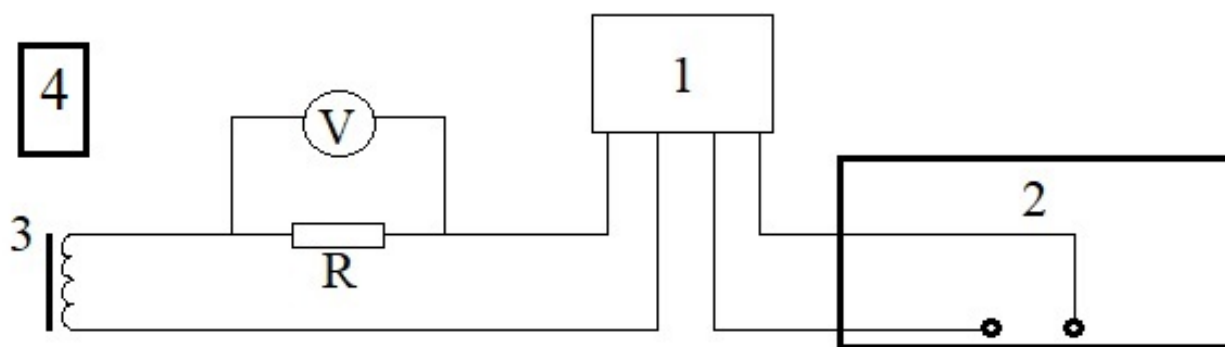


Рис. 4. Схема установки:

1 – ключ на мосфете; 2 –ЛБП; 3 – трубчатый электромагнит; V - АЦП L-CARD E20-10; R – шунтирующий резистор; 4 - камера Phantom VR-310.

Для регистрации зависимости тока в обмотке от времени использовалась схема с шунтирующим резистором, напряжение на котором измерялось и оцифровывалось с использованием АЦП L-CARD E20-10 (14 бит/10 МГц), частота дискретизации сигнала 1 МГц.

Для видео фиксации перемещения якоря электромагнита использована высокоскоростная камера Phantom VR-310, которая в ходе проведения экспериментов работала в режиме записи с частотой 2000 кадров в секунду. Затем полученные видеофайлы обрабатывались в программе Phantom, в результате чего получались зависимость координаты якоря (в пикселях) от времени с шагом в 2 мс. Характерный кадр обрабатываемого видеофайла представлен на рис. 3.

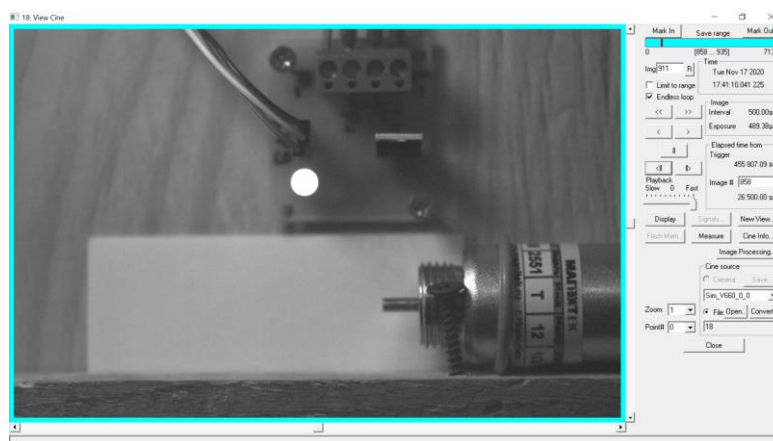


Рис. 3. Характерный видеокادر при регистрации перемещения якоря электромагнита

Для перевода пикселей в размерные величины (миллиметры) использовались тарировочные изображения предмета с известными линейными размерами, с помощью которого определялся масштабный коэффициент. На видеозаписи перемещения якоря индикатором подачи питания на электромагнит являлось включение светодиода, после чего велся отсчет времени.

4. Результаты эксперимента

На рис. 4 представлены полученные в ходе экспериментов зависимости тока, протекающего по катушке электромагнита от времени с якорем, находящимся в конечном положении (т.е. без движения якоря).

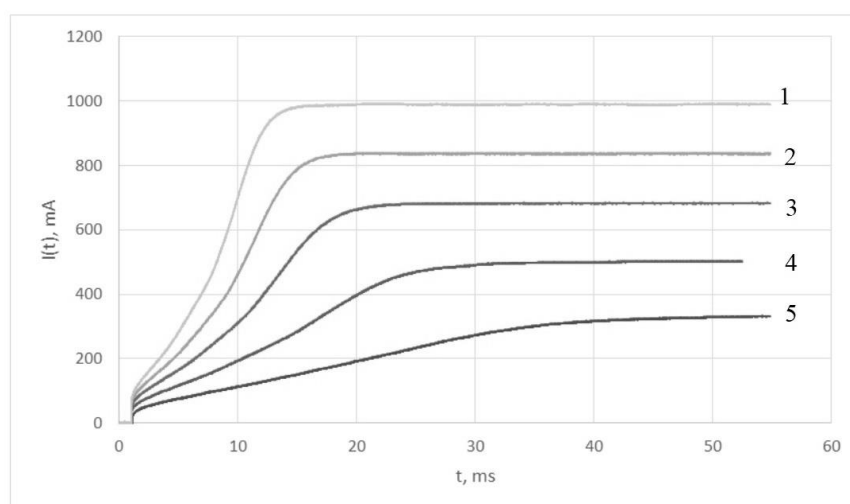


Рис. 4. Графики зависимости тока в обмотке от времени без движения якоря.

1 – 36 В; 2 – 30 В; 3 – 24 В; 4 – 18 В; 5 – 12 В.

Как следует из графика характерные времена нарастания тока составляют от 15 до 40 мс при питающем напряжении 36 и 12 В соответственно. При этом установившееся значение тока составляет от 330 до 1000 мА для различных напряжений.

На графике, представленном на рис. 5, приведены зависимости силы тока в обмотке от времени при движении якоря для различных напряжений питания катушки электромагнита. Вид кривых хорошо согласуется с теоретической зависимостью, рассмотренной в пункте 2.2.

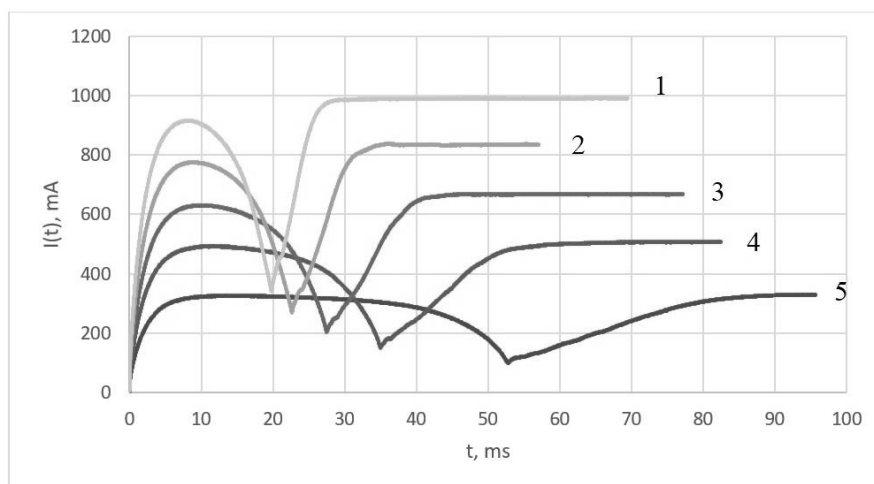


Рис. 5. Сравнительная диаграмма зависимости силы тока от времени для разных напряжений.
1 – 36В; 2 – 30В; 3 – 24В; 4 – 18В; 5 – 12В.

На графике отчетливо определяется момент завершения движения якоря электромагнита. Величина питающего напряжения, подаваемого на электромагнит, оказывает значительное влияние на его характерное время срабатывания, которое составляет 53 мс при $U = 12$ В и уменьшается до 19 мс при $U = 36$ В. В таблице 1 представлены данные времени срабатывания электромагнита, значения тока катушке в этот момент и установившейся конечном итоге ток.

Таблица 1. Характерные значения времени срабатывания и токов.

$U, В$	$t_{ср}, мс$	$I_{ср}, мА$	$I_y, мА$
12	54	116	330
18	35	151	505
24	27	203	666
30	23	270	835
36	19	339	989

На рис. 6 представлены данные о перемещении якоря электромагнита, полученные при обработке видеозаписей с камеры. С увеличением значения питающего напряжения, характерные времена перемещения якоря значительно умень-

шаются. Кроме того, эксперименты с непосредственной видео фиксацией, позволяют определить моменты трогания якоря, которые также уменьшаются с ростом питающего напряжения.

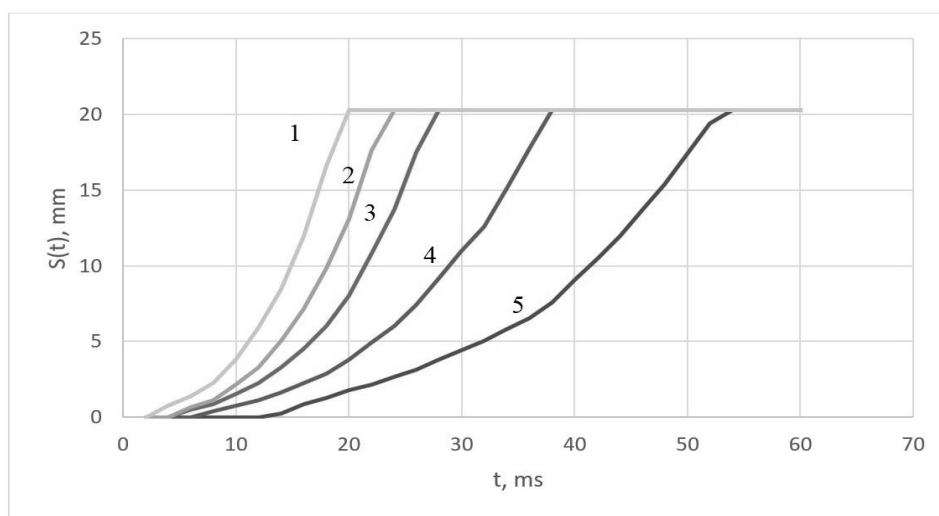


Рис. 6. Сравнительная диаграмма зависимостей координаты от времени для разных напряжений.

1 – 36В; 2 – 30В; 3 – 24В; 4 – 18В; 5 – 12В.

Полученные значения характерных времен трогания, движения и срабатывания для процесса движения якоря электромагнита после подачи питания представлены в таблице 2.

Таблица 2. Характерные времена срабатывания электромагнита.

$U, В$	$t_{тр}, мс$	$t_{дв}, мс$	$t_{ср}, мс$
12	12	42	54
18	6	32	38
24	4	24	28
30	4	20	24
36	2	18	20

Момент подачи питания на электромагнит фиксировался на видеозаписи. Это позволяло получать синхронизованные зависимости изменения тока и перемещения якоря от времени. На рис. 7 представлен объединенный график изменения тока и перемещения якоря от времени при напряжении питания электромагнита $U = 24 В$. Данные графики позволяют получить более детальную информацию о

процессах, происходящих при работе электромагнита. Определить необходимые дополнительные параметры, например, значения величин токов при начале движения якоря и т.д. В нашем случае, сравнив графики силы тока и перемещения для 24 В, можно увидеть, что якорь начинает движение через 4 мс после пуска тока, чему соответствует 547 мА, и заканчивает спустя 28 мс, чему соответствует 204 мА.

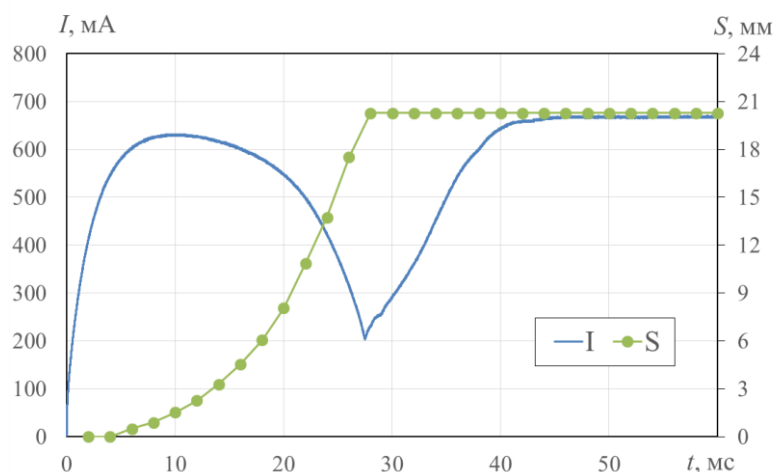


Рис. 7. Объединенный график изменения тока и перемещения якоря от времени, напряжение питания $U = 24\text{В}$.

Так же хорошо видно, что минимум тока соответствует моменту завершения движения якоря электромагнита. Таким образом исходя из поставленных задач и доступного оборудования, может применяться тот или иной метод определения характерных параметров быстродействия электромагнитов и устройств на их основе.

5. Заключение

В результате проведенной работы были определены параметры быстродействия трубчатого электромагнита (модель ТМ-2551Т-12 фирмы «Магнитек») в зависимости от параметров питающего напряжения.

Показано значительное влияние времени срабатывания электромагнита от величины питающего напряжения. Характерные времена срабатывания электромагнита составляли 53 мс при работе на номинальном рабочем напряжении $U = 12\text{ В}$ и уменьшались до 19 мс работе на повышенном напряжении $U = 36\text{ В}$.

Данные эксперименты были необходимы для проработки устройства по введению локализованных в пространстве и времени возмущений средней скорости потока на основе электромагнитов, отработке методики проведения экспериментов и получении данных по быстродействию.

6. Список литературы

1. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. – 1988.
2. А. Г. Сливинская, Электромагниты и постоянные магниты: учебное пособие для студентов вузов., Москва: «Энергия», 1972, pp. 5-11, 99 - 110.
3. Геча В. Я., Мильшин А. Ю., Великорецкий А. А. Определение индуктивности и тягового усилия цилиндрического электромагнита со свободным ходом якоря //Вестник Московского энергетического института. – 2013. – №. 2. – С. 073-077.
4. Г.И. Цопов, В.А. Сергеев, В.Н. Овсянников. Проектирование и расчет электромагнитного устройства низкого напряжения: учебно-методическое пособие// Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – 53 с.: ил.