

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Прокопьев Константин Эдуардович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Определение кинематических и динамических характеристик якоря
трубчатого электромагнита**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19304

Научный руководитель:

к. ф.-м. н. В. Н. Зиновьев

Оценка научного руководителя

« _____ » _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

С. В. Туманов

Оценка преподавателя практикума

« _____ » _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

« _____ » _____ 20__ г.

Новосибирск 2020

Определение кинематических и динамических характеристик якоря трубчатого электромагнита

Прокопьев Константин Эдуардович

Физический факультет. Электромагнитный практикум. Курсовая работа.

Группа № 19304, 3 семестр, 2020 год.

Научный руководитель:

к. ф.-м. н. **Зиновьев Виталий Николаевич**

Аннотация

Работа посвящена определению кинематических характеристик якоря трубчатого электромагнита, используемого в генераторе возмущений потока в аэродинамической трубе. Для этой цели с помощью высокоскоростной камеры в реальных условиях аэрофизического эксперимента фиксировалось перемещение якоря при различных напряжениях питания, подаваемых на катушку электромагнита. На основании полученных данных определены детальные временные характеристики устройства, т.е. его быстродействие. Путем обработки зависимостей перемещения якоря от времени, рассчитаны динамические параметры. Показано значительное влияние на время срабатывания устройства величины питающего напряжения электромагнитов, а также внешних параметров – давления газа в рабочей части аэродинамической трубы. Характерные времена срабатывания составили от 39 до 103 мс в зависимости от величины питающего напряжения (U варьировалось от 24 до 38 В) и внешних условий в рабочей части аэродинамической трубы. Максимальное развиваемое электромагнитом усилие составило от ~ 1000 до 3000 грамм силы при изменении питающего напряжения от 24 до 38 В.

Ключевые слова: трубчатый электромагнит, время срабатывания, генератор возмущений.

Оглавление

1. Введение.	4
2. Теоретическая часть.	5
2.1. Устройство трубчатого электромагнита.....	5
2.2. Генератор возмущений.....	7
3. Экспериментальная часть.	8
3.1. Описание установки.	8
3.2. Методика проведения эксперимента	9
3.3. Результаты измерений.....	9
4. Заключение.....	13
5. Список литературы.....	14
Приложение 1. Формулы аппроксимации.....	15
Приложение 2. Графики производителя	17

1. Введение.

В рамках работы проводимой в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича (ИТПМ СО РАН) по исследованию динамики развития нестационарного отрывного течения в условиях полета при малых числах Рейнольдса в условиях сильных возмущений требовалось создать устройство для внесения локализованных возмущений в поток для аэродинамической трубы Т-325М.

Возмущение в потоке может создаваться различными способами: путем акустического воздействия; локального вдува-отсоса газа; механического, когда физическое тело вносится в поток; электрическим способом – при создании локального разряда и т.д. В рамках текущей работы наиболее подходящим вариантом было использование механического устройства, которое бы позволяло локально вносить в поток газа физическое тело определенной формы, генерирующее возмущение. Временные параметры генерируемого возмущения связаны с быстротой действия устройства, временем ввода-вывода препятствия в поток. Из возможных вариантов привода устройства был выбран электромагнитный, с использованием трубчатых электромагнитов. Данный выбор обусловлен особенностями работы электромагнитных систем.

Электромагниты (ЭМ) представляют собой обширный класс устройств автоматики, осуществляющих преобразование электрической энергии источника питания в механическую энергию (движения, удара, нажатия, удержания) якоря. Простота конструкции ЭМ, их высокая надежность в работе, возможность получения разнообразных динамических характеристик, от согласования которых с параметрами исполнительного механизма зависит работоспособность устройства в целом, предопределили широкое их применение на практике [1]. Основными характеристиками ЭМ, подлежащему определению, являются зависимости от времени: электромагнитной силы (тягового усилия); тока; перемещения; скорости якоря и т.д.

Таким образом целью данной работы было определение кинематических и динамических характеристик генератора возмущений на основе трубчатых электромагнитов в зависимости от параметров питающего напряжения.

2. Теоретическая часть.

2.1. Устройство трубчатого электромагнита

Трубчатый электромагнит представляет собой соленоид (Рис. 1) и якорь из ферромагнетика. При подаче напряжения на катушку, в ней начинает протекать электрический ток, который приводит к возникновению магнитного поля. Величина магнитного поля определяется параметрами катушки (количество витков и длина) и протекающим током. Выражение для магнитного поля внутри соленоида имеет следующий вид

$$B = \frac{\mu\mu_0IN}{l},$$

где I – ток в соленоиде, N – количество витков на катушке, l – длина соленоида, μ – магнитная проницаемость среды, μ_0 – магнитная постоянная [2].

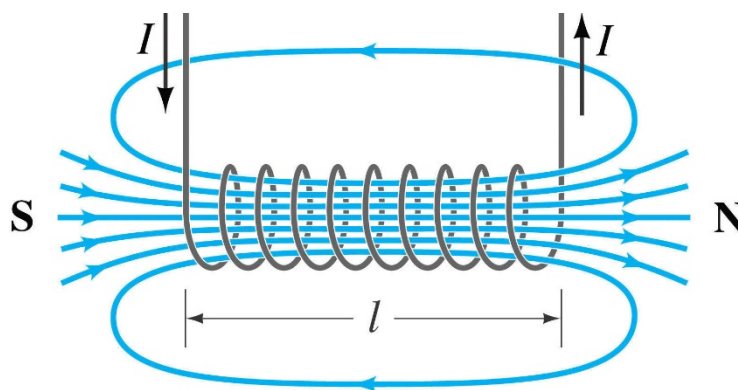


Рис. 1. Схема устройства соленоида.

Сила, действующая на якорь электромагнита, зависит от магнитного поля [2]. Таким образом, изменяя параметры источника питания можно управлять динамическими характеристиками электромагнита якоря.

Далее рассмотрим рабочий режим работы трубчатого электромагнита с якорем (Рис. 2). После подачи питания, ток в катушке нарастает постепенно из-за явления самоиндукции, препятствующего изменению магнитного потока в соленоиде. Ток в катушке описывается дифференциальным уравнением

$$I(t)R = U_0 - L \frac{dI(t)}{dt},$$

где $I(t)$ – выражение для тока в катушке индуктивности; U_0 – напряжение, подаваемое на катушку; R и L – сопротивление и индуктивность катушки соответственно [3]. Решение данного уравнения с учетом начального условия $I(0) = 0$ имеет вид

$$I(t) = \frac{U_0}{R} \left(1 - \exp\left(-\frac{L}{R}t\right) \right).$$

На *Рис. 2* (б) линия 1 соответствует данному решению.

По мере возрастания тока в обмотке, увеличивается магнитное поле и электромагнитная сила, действующая на якорь. В следствии чего, сила, необходимая для противодействия силам трения, действующим на якорь, возникает только через некоторое время ($t_{тр}$ на *Рис. 2*). Время трогания $t_{тр}$ определяется как параметрами электропитания, так характеристиками самого электромагнита и противодействующих движению силах.

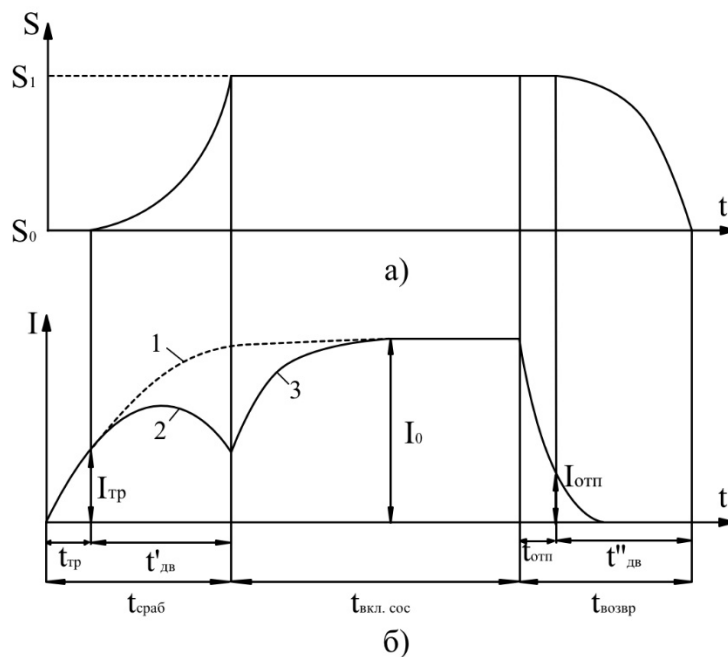


Рис. 2. Графики перемещения якоря и тока в катушке соленоида

Во время движения якоря, ток в обмотке электромагнита изменяется (*Рис. 2* (б) линия 2) и отличается от теоретической зависимости представленной линией 1 на графике. Это связано с возникновением противо э.д.с при движении якоря. После прекращения движения якоря, ток в обмотке соленоида нарастает

до установившегося значения (*Рис. 2 (б)* линия 3). Время срабатывания составляет сумму времен трогания и перемещения [1].

2.2. Генератор возмущений

Для введения локализованных в пространстве и времени возмущений средней скорости потока было разработано и изготовлено специальное устройство на основе двух электромагнитов - толкающего и втягивающего типа, с помощью которых можно было вводить в поток на некоторый контролируемый промежуток времени препятствия различной формы (генератор).

Использовались трубчатые электромагниты фирмы «Магнитек», модели ТМ-2551В-12 и ТМ-2551Т-12, с номинальным постоянным рабочим напряжением 12 В и способные работать при повышенном напряжении до 38 В, с ограничением по времени включения. Сопротивление катушек в данных магнитах равняется 14,4 Ом. Принципиальная схема устройства представлена на *рис. 3*. Один из электромагнитов является втягивающим (1б), другой толкающий (1а), что позволяет реализовывать перемещение якоря (3) в двух направлениях и режим удержания. Электромагниты соединены с помощью специальной соединительной муфты (2) и имеют общий составной якорь. На якорь крепится рабочее тело определенной формы - генератор (4), которое вносится в поток и генерирует возмущение при его обтекании потоком газа. В качестве генератора локализованной неоднородности среднего течения в экспериментах использовался круговой цилиндр диаметром 6 мм. Масса якоря со всеми соединительными элементами и генератором составляет 81,3 грамма.

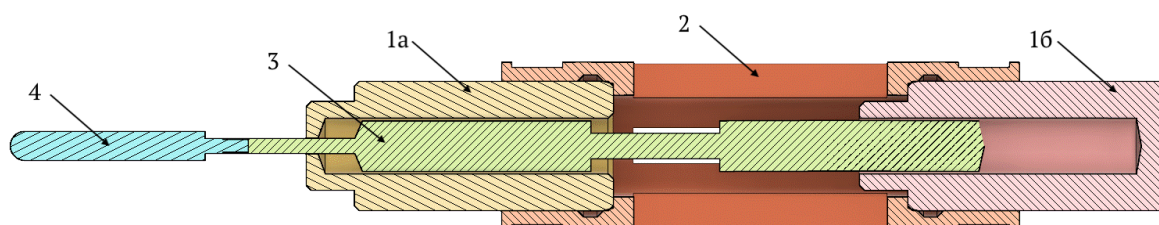


Рис. 3. Устройство генератора возмущений на основе трубчатого электромагнита
1 – электромагниты (а – толкающий, б – втягивающий), 2 – соединительная муфта, 3 – якорь, 4 – генератор.

Электромагниты подключались к источнику питания через релейный модуль, управляемый с компьютера, что позволяло реализовывать различные алгоритмы управления устройством. Для питания втягивающего ЭМ использовался 12В блок питания. Толкающий ЭМ подключался к лабораторному блоку питания с регулируемым выходным напряжением.

3. Экспериментальная часть.

3.1. Описание установки.

Эксперименты по определению кинематических и динамических характеристик генератора возмущений на основе трубчатых электромагнитов проводились в реальных рабочих условиях на аэродинамической трубе Т-325М. Устройство для внесения локализованных возмущений в поток устанавливалось на рабочую часть аэродинамической трубы Т-325М, схема приведена на *Рис. 4*. Общий вид установки и расположение основных элементов представлен на фотографии *Рис. 5*.

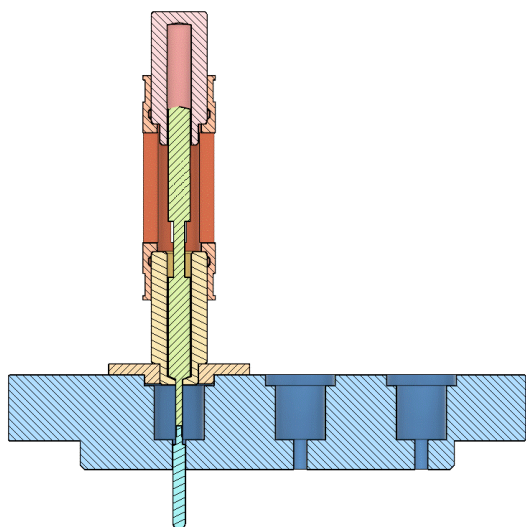


Рис. 4. Генератор возмущений



Рис. 5. Рабочая установка

Для возможности визуального наблюдения за перемещением генератора, устанавливалась прозрачная вставка в одну из стенок рабочей части. Видео фиксация перемещения рабочего тела генератора возмущений производилась с помощью высокоскоростной камеры Phantom v310m (до 50 000 кадров в секунду). При

этом в кадре видеокамеры также находился релейный модуль, управляющий подачей питания на электромагниты, оснащенный индикаторными светодиодами. Таким образом, изменение состояния индикаторного светодиода на видеозаписи сигнализировало о подаче питания на устройство и являлось триггерной точкой по времени.

3.2. Методика проведения эксперимента

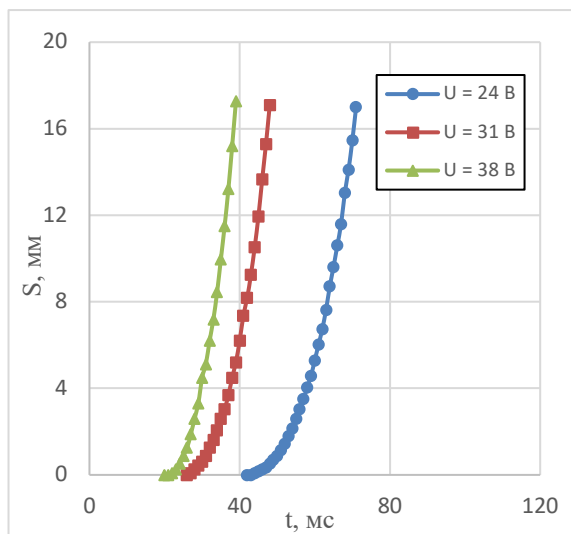
Эксперименты по определению характеристик генератора возмущений на основе трубчатых электромагнитов проводились на четырех различных режимах работы аэродинамической трубы Т-325М. Число Маха в этих режимах поддерживалось равным $M_\infty = 0,13$ (что соответствует скорости набегающего невозмущенного потока $U_\infty = 45$ м/сек), варьировалось число Рейнольдса путем изменения полного давления в рабочей части, которое составляло $P = 1,1; 1,5; 2; 2,5$ атм.

Генератор возмущений в экспериментах работал следующим образом: на толкающий электромагнит подавалось питание в течении 100 мс (достаточного для полного выдвижения якоря), при этом втягивающий электромагнит отключался. Сразу после отключения толкающего электромагнита, включался втягивающий, который возвращал якорь в начальное положение. Таким образом осуществлялось введение генератора в поток, которое фиксировалось высокоскоростной камерой Phantom v310m с частотой 3000 кадров в секунду, что достаточно для дальнейшей обработки и построения графиков перемещения. Эксперименты проводились для трех различных напряжений питания толкающего электромагнита: 24, 31 и 38 вольт.

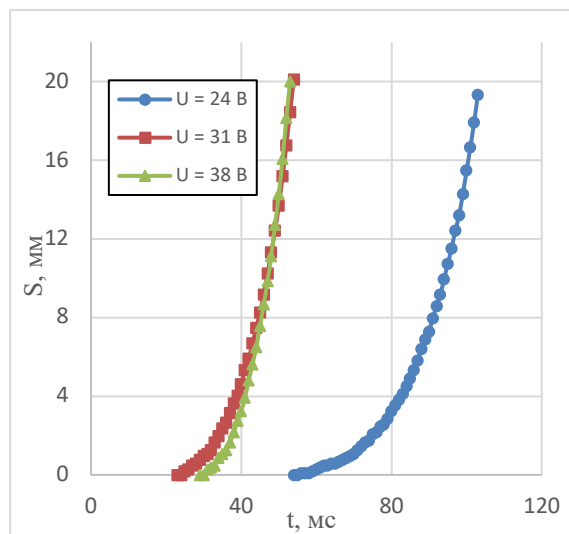
3.3. Результаты измерений

В результате обработки видеозаписей перемещения якоря в рабочей части аэродинамической трубы были получены зависимости перемещения якоря от времени $S(t)$. Полученные зависимости для всех проведенных экспериментов приведены на *рис. 6*. Нулевое значение времени на графиках соответствует моменту подачи питания на устройство, далее, по мере роста тока в обмотке соленоида, происходит увеличение электромагнитной силы, действующей на якорь.

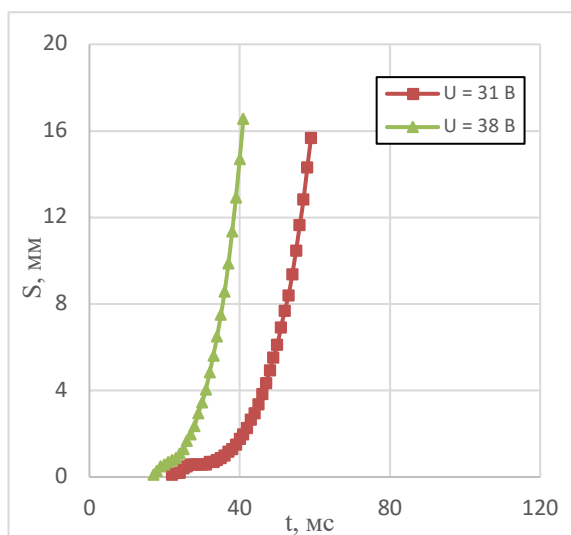
Когда электромагнитная сила становится больше всех сил, противодействующих движению, якорь приходит в движение.



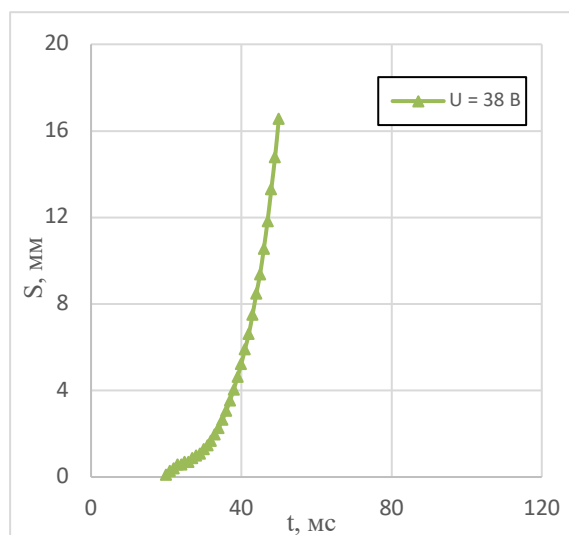
(а) $P = 1,1$ атм



(б) $P = 1,5$ атм



(в) $P = 2$ атм



(г) $P = 2,5$ атм

Рис. 6. Зависимость перемещения от времени на разных давлениях

На графиках видно, что с повышением напряжения увеличивается скорость перемещения якоря и, соответственно, уменьшается время, необходимое для его полного выдвигания. Так же заметно, что напряжение, подаваемое на катушку электромагнита, влияет не только на скорость перемещения якоря, но и на время, прошедшее с момента подачи напряжения и до начала движения якоря, что согласуется с теоретическими предположениями. При повышении давления в ра-

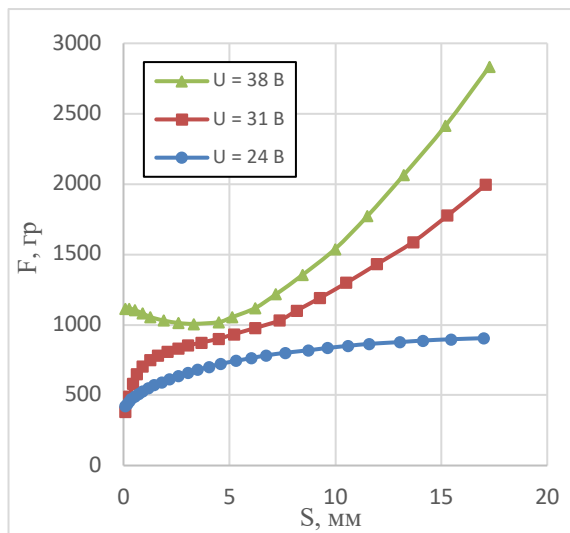
бочей части аэродинамической трубы скорость перемещения якоря также уменьшается. Это связано с дополнительной выталкивающей силой, создаваемой давлением в рабочей части и препятствующей внесению генератора в поток. Так, при давлении 2 атм в рабочей части усилия развиваемое электромагнитом при питании 24 В становится недостаточным, чтобы привести в движение якорь, а при давлении 2,5 атм аналогичная ситуация наблюдается и при напряжении питания 31 В.

Характерные времена срабатывания для эксперимента с давлением в рабочей части $P = 1,1$ атм, составили 39 мс при $U = 38$ В, 48 мс при $U = 31$ В, 71 мс при $U = 24$ В. В случае экспериментов при давлении в рабочей части $P = 1,5$ атм, задержка во времени трогания для $U = 38$ В может быть вызвана некоторым заклиниванием якоря в устройстве, после страгивания – движение происходит быстрее, чем для $U = 31$ В, как и должно быть по теории. Времена срабатывания в данных экспериментах составили 53 мс при $U = 38$ В, 54 мс при $U = 31$ В, 103 мс при $U = 24$ В. Особенно заметно отставание якоря при напряжении 24 В, что говорит о недостатке усилия, создаваемого магнитом.

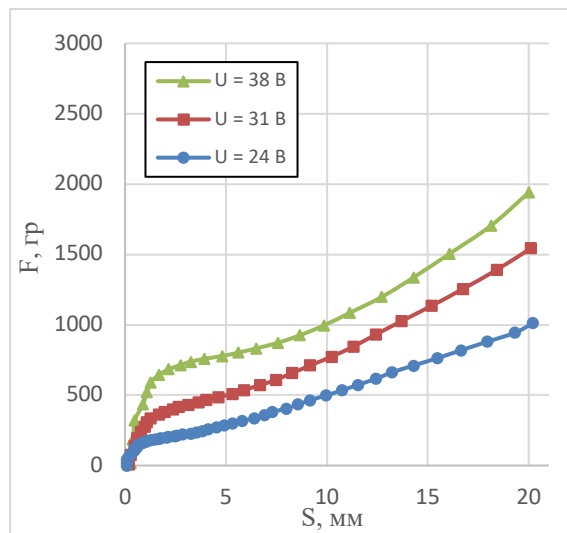
Стоит отметить, что время между подачей напряжения и началом движения якоря также зависит и от электрической схемы соединения электромагнита с источником питания. В данном эксперименте для замыкания контактов использовалось электромеханическое реле, что приводило к дополнительной задержке подачи питания порядка 3 - 6 мс за счет «замыкания/дребезга» контактов. В дальнейшем на устройстве уже использовался управляющий модуль на основе МОП-транзистора, что позволило устранить эту дополнительную задержку.

На основании данных графиков, путем аппроксимации, были получены уравнения полиномов 5-ой степени, описывающие перемещение якоря (Приложение 1). Дифференцирование этих выражений дает уравнения для скорости $V(t)$ и ускорения $a(t)$ якоря. На основании полученного ускорения были построены графики зависимости усилия электромагнита от смещения якоря относительно начального положения, представленные на Рис. 7. На этих графиках видно, что максимальное усилие развивается при полном задвижении якоря в соленоид и

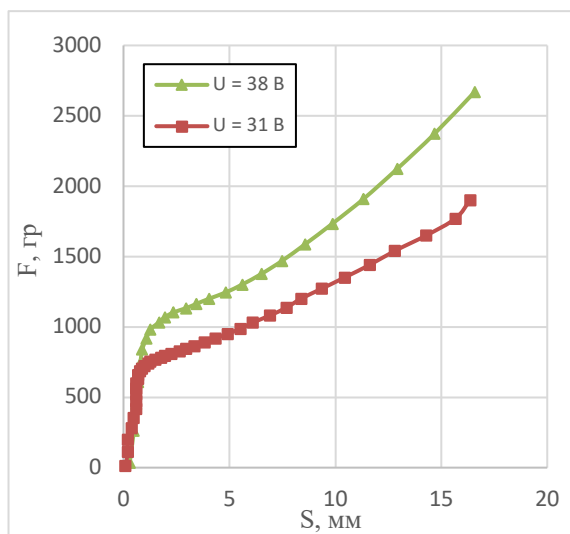
значительно зависит от параметров питания и составляет примерно 1000 грамм силы при напряжении питания 24 В, ~ 2000 при 31 В и достигает ~ 2700 грамм силы при 38 В. Также заметно, что в начале движения имеется резкий изгиб, что говорит о наличии дополнительных сил трения в начале движения.



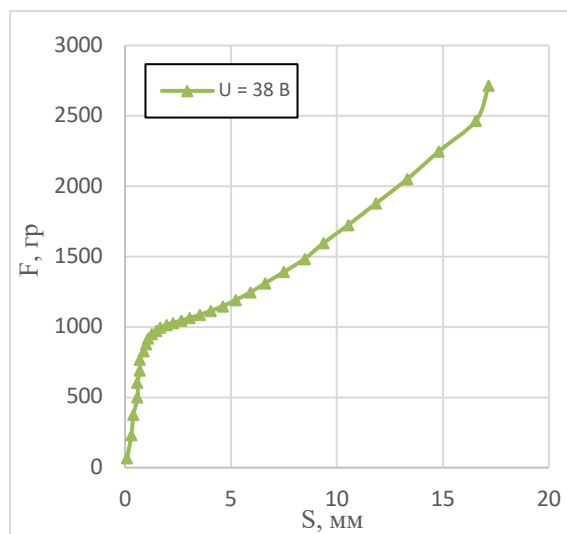
$P = 1,1 \text{ атм}$



$P = 1,5 \text{ атм}$



$P = 2 \text{ атм}$



$P = 2,5 \text{ атм}$

Рис. 7. Зависимость усилия от перемещения якоря

Полученные графики схожи с графиками зависимости усилия от смещения якоря, предоставляемыми производителем (Приложение 2). Однако магниты не развивают заявленного производителем усилия. Это может быть объяснено не точной установкой магнита и наличием силы трения, действующей на якорь.

Также общий якорь в данном устройстве имеет в 2 раза большую массу и большие линейные размеры в сравнении с оригинальными электромагнитами, что также увеличивает силу трения.

4. Заключение

В результате проведенной работы были определены кинематические и динамические характеристики генератора возмущений на основе трубчатых электромагнитов в реальных условиях аэрофизического эксперимента в зависимости от параметров питающего напряжения и рабочих условий аэродинамической трубы.

Показано значительное влияние времени срабатывания устройства как от величины питающего напряжения электромагнитов, так и от внешних параметров – давления газа в рабочей части аэродинамической трубы. Характерные времена срабатывания при давлении 1,1 атм в рабочей части составили 39, 48, 71 мс при питающем напряжении $U = 38, 31$ и 24 В соответственно. В случае работы при давлении 2,5 атм, перемещение якоря устройства обеспечивалось только при напряжении $U = 38$ В, при этом время срабатывания составило 50 мс.

Максимальное развиваемое электромагнитом усилие составило от ~ 1000 до 3000 грамм силы при изменении питающего напряжения от 24 до 38 В.

Определенные в ходе выполнения работы характеристики устройства генератора возмущений позволяют обеспечивать корректное управление устройством, синхронизировать генератор возмущений с другими измерительными системами. Также выполненные эксперименты показывают возможные дальнейшие направления по усовершенствованию устройства по вводу локальных возмущений в поток и его конструкции.

5. Список литературы

1. А. Г. Сливинская, Электромагниты и постоянные магниты: учебное пособие для студентов вузов., Москва: «Энергия», 1972, pp. 5-11, 99 - 110.
2. В. И. Яковлев, Классическая электродинамика: Часть 1. Электричество и магнетизм, Москва - Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2016, pp. 180-197.
3. О. В. Беликов, В. Ф. Веремеенко и А. Г. Чупыра, Основы радиоэлектроники, Новосибирск: Новосиб. Гос. Ун-т, 2010, pp. 66-70.

Приложение 1. Формулы аппроксимации

P = 1,1 атм U = 24 В	$S(t)$	$y = -0,000000116621675080864x^5 + 0,0000320335230292873x^4 - 0,00308886730743327x^3 + 0,145362208057597x^2 - 3,51242826937253x + 35,4923378430163$
	$V(t)$	$y = -0,000000116621675080864*5x^4 + 0,0000320335230292873*4x^3 - 0,00308886730743327*3x^2 + 0,145362208057597*2x - 3,51242826937253$
	$a(t)$	$y = -0,000000116621675080864*5*4x^3 + 0,0000320335230292873*4*3x^2 - 0,00308886730743327*3*2x + 0,145362208057597*2$
P = 1,1 атм U = 31 В	$S(t)$	$y = 0,00000271039918642302x^5 - 0,000481370428452088x^4 + 0,0346049401775979x^3 - 1,22293591790514x^2 + 21,1907751439447x - 144,714611746913$
	$V(t)$	$y = 0,00000271039918642302*5x^4 - 0,000481370428452088*4x^3 + 0,0346049401775979*3x^2 - 1,22293591790514*2x + 21,1907751439447$
	$a(t)$	$y = 0,00000271039918642302*5*4x^3 - 0,000481370428452088*4*3x^2 + 0,0346049401775979*3*2x - 1,22293591790514*2$
P = 1,1 атм U = 38 В	$S(t)$	$y = 0,00000539811325006578x^5 - 0,000695209840061661x^4 + 0,0352907690660764x^3 - 0,833887576332401x^2 + 8,85967144491698x - 31,9841419669932$
	$V(t)$	$y = 0,00000539811325006578*5x^4 - 0,000695209840061661*4x^3 + 0,0352907690660764*3x^2 - 0,833887576332401*2x + 8,85967144491698$
	$a(t)$	$y = 0,00000539811325006578*5*4x^3 - 0,000695209840061661*4*3x^2 + 0,0352907690660764*3*2x - 0,833887576332401*2$
P = 1,5 атм U = 24 В	$S(t)$	$y = 0,000000136434428909919x^5 - 0,0000497284072302293x^4 + 0,00734239899023797x^3 - 0,541432110904939x^2 + 19,850154437711x - 289,122390410154$
	$V(t)$	$y = 0,000000136434428909919*5x^4 - 0,0000497284072302293*4x^3 + 0,00734239899023797*3x^2 - 0,541432110904939*2x + 19,850154437711$
	$a(t)$	$y = 0,000000136434428909919*5*4x^3 - 0,0000497284072302293*4*3x^2 + 0,00734239899023797*3*2x - 0,541432110904939*2$
P = 1,5 атм U = 31 В	$S(t)$	$y = 0,000000935973773368015x^5 - 0,000170544659265082x^4 + 0,0127516738673021x^3 - 0,466750998651783x^2 + 8,39906733045549x - 59,8506015888945$

	$V(t)$	$y = 0,000000935973773368015 \cdot 5x^4 - 0,000170544659265082 \cdot 4x^3 + 0,0127516738673021 \cdot 3x^2 - 0,466750998651783 \cdot 2x + 8,39906733045549$
	$a(t)$	$y = 0,000000935973773368015 \cdot 5 \cdot 4x^3 - 0,000170544659265082 \cdot 4 \cdot 3x^2 + 0,0127516738673021 \cdot 3 \cdot 2x - 0,466750998651783 \cdot 2$
$P = 1,5 \text{ атМ}$ $U = 38 \text{ В}$	$S(t)$	$y = 0,000003284912874129690x^5 - 0,000673023005714868x^4 + 0,05555365182956853 - 2,26736170697054x^2 + 45,6160456498096x - 362,433440160264$
	$V(t)$	$y = 0,000003284912874129690 \cdot 5x^4 - 0,000673023005714868 \cdot 4x^3 + 0,0555536518295685 \cdot 3x^2 - 2,26736170697054 \cdot 2x + 45,6160456498096$
	$a(t)$	$y = 0,000003284912874129690 \cdot 5 \cdot 4x^3 - 0,000673023005714868 \cdot 4 \cdot 3x^2 + 0,0555536518295685 \cdot 3 \cdot 2x - 2,26736170697054 \cdot 2$
$P = 2 \text{ атМ}$ $U = 31 \text{ В}$	$S(t)$	$y = 0,000000595190796507869x^5 - 0,000117486722799851x^4 + 0,00954545459667448x^3 - 0,38238248677545x^2 + 7,47446076261726x - 56,5198229470345$
	$V(t)$	$y = 0,000000595190796507869 \cdot 5x^4 - 0,000117486722799851 \cdot 4x^3 + 0,00954545459667448 \cdot 3x^2 - 0,38238248677545 \cdot 2x + 7,47446076261726$
	$a(t)$	$y = 0,000000595190796507869 \cdot 5 \cdot 4x^3 - 0,000117486722799851 \cdot 4 \cdot 3x^2 + 0,00954545459667448 \cdot 3 \cdot 2x - 0,38238248677545 \cdot 2$
$P = 2 \text{ атМ}$ $U = 38 \text{ В}$	$S(t)$	$y = 0,00000380482835493634x^5 - 0,000545648795627574x^4 + 0,0318962077514013x^3 - 0,912312923509223x^2 + 12,7388264448976x - 69,3245662096759$
	$V(t)$	$y = 0,00000380482835493634 \cdot 5x^4 - 0,000545648795627574 \cdot 4x^3 + 0,0318962077514013 \cdot 3x^2 - 0,912312923509223 \cdot 2x + 12,7388264448976$
	$a(t)$	$y = 0,00000380482835493634 \cdot 5 \cdot 4x^3 - 0,000545648795627574 \cdot 4 \cdot 3x^2 + 0,0318962077514013 \cdot 3 \cdot 2x - 0,912312923509223 \cdot 2$
$P = 2,5 \text{ атМ}$ $U = 38 \text{ В}$	$S(t)$	$y = 0,0000016809079525712x^5 - 0,000284259259046488x^4 + 0,0195517468954909x^3 - 0,661295980248123x^2 + 10,9627313857233x - 70,9460562907328$
	$V(t)$	$y = 0,0000016809079525712 \cdot 5x^4 - 0,000284259259046488 \cdot 4x^3 + 0,0195517468954909 \cdot 3x^2 - 0,661295980248123 \cdot 2x + 10,9627313857233$
	$a(t)$	$y = 0,0000016809079525712 \cdot 5 \cdot 4x^3 - 0,000284259259046488 \cdot 4 \cdot 3x^2 + 0,0195517468954909 \cdot 3 \cdot 2x - 0,661295980248123 \cdot 2$

Приложение 2. Графики производителя

