

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

Физический факультет

Кафедра физико-технической информатики

Хубиев Касымхан Юсуфович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**«Изучение амплитудно-частотных характеристик системы
измерения направления магнитного поля»**

Практикум по электричеству и магнетизму, 2 курс, группа №18352

Научный руководитель:

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 2019г.

Преподаватель практикума

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 2019 г.

Куратор практикума:

Итоговая оценка

«_____» _____ 2019г.

Новосибирск, 2019

«Изучение амплитудно-частотных характеристик системы измерения направления магнитного поля».

Хубиев Касымхан Юсуфович.

Физический факультет, практикум по электричеству и магнетизму. 3 семестр.

Группа №8352, 2019.

Научный руководитель: **Бублей А.В.**, к.ф.-м.н., с.н.с. ИЯФ СОРАН.

Научный руководитель: **Петрожитский А.В.**, н.с. лаб. 5-2 ИЯФ СОРАН.

Преподаватель практикума:

Аннотация

В данной работе исследуются амплитудно и фазово-частотные характеристики оптико-механической системы измерения направления магнитного поля в секции охлаждения. Требования на прямолинейность линий магнитного поля возникают из необходимости получения достаточной эффективности электронного охлаждения ионных пучков в накопительном кольце. Как правило, углы наклона силовой линии V_x/V_z и V_y/V_z относительно оси не должны превышать 10^{-5} - 10^{-6} рад. Данная система должна быть способна измерять столь малые углы.

Работа системы основана на принципе магнитной стрелки. На магнитном диполе установлено плоское зеркало перпендикулярно магнитной оси диполя. Эта магнитная стрелка, помещенная вблизи оси соленоида, ориентируется вдоль локального направления магнитного поля. Вдоль оси соленоида проходит слабо сходящийся луч лазера. Луч отражается от зеркала на диполе, возвращается назад и попадет в четырехсекторный фотоприемник. Положение луча на фотоприемнике стабилизируется системой обратной связи по двум координатам путем подачи токов в корректирующие катушки поперечного поля. Магнитные поля коррекции компенсируют поперечные поля соленоида, так что отраженный луч лазера всегда попадает в центр фотоприемника. Таким образом, токи коррекции характеризуют величины поперечных магнитных полей соленоида в месте установки магнитной стрелки.

В данной работе исследовались АЧХ и ФЧХ колебаний магнитной стрелки в поле соленоида на стенде настройки системы. На дополнительную катушку коррекции, установленную внутри тестового соленоида, подавался синусоидальный ток с генератора. Магнитная стрелка начинала совершать качания вблизи положения равновесия под действием вынуждающего поперечного поля. Наблюдение за отклонением стрелки производилось на осциллографе путем вывода координатного сигнала с блока обратной связи. На осциллографе производились измерения амплитуды колебаний магнитной стрелки и фазы относительно возбуждающего тока. Измерения проводились в двух режимах: без обратной связи и с ней. Из полученных измерений строились АЧХ и ФЧХ колебаний. Полученные характеристики качественно совпадают с моделью гармонического осциллятора с затуханием. Был произведен расчет собственной частоты колебаний магнитной стрелки для условий эксперимента. Измеренная собственная частота хорошо совпала с расчетной.

Содержание:

1. Введение.....	3-6
1.1.Понятие охлаждения пучков заряженных частиц.....	3
1.2.Радиационное охлаждение.....	4
1.3.Электронное охлаждение.....	4-6
2. Система измерения направления магнитного поля в секции электронного охлаждения.....	6-7
3. Модель гармонического осциллятора.....	7-12
3.1.Гармонический осцилляторс затуханием.....	7-8
3.2.Оценка собственной частоты колебаний магнитной стрелки.....	8-9
3.3.Оценка параметров осциллятора по кривой АЧХ.....	9-12
4. Описание макета системы измерения направления магнитного поля.....	12-17
4.1.Описание стенда настройки системы измерения направления магнитного поля.....	12-13
4.2.Конструкция тестового соленоида.....	13-14
4.3.Конструкция магнитной стрелки.....	15-16
4.4.Система обратной связи.....	16-17
4.5.Фоточувствительный датчик.....	17
5. Проведение измерений.....	18-19
6. Анализ результатов измерений.....	19-20
7. Вывод.....	20-24
8. Используемая литература.....	24-25

1 Введение.

1.1 Понятие охлаждения пучков заряженных частиц.

В физике частиц с использованием ускорителей скорость набора статистики пропорциональна сечению исследуемого процесса.

$$\dot{N} = \sigma L \quad (1)$$

Где $\dot{N}$ - скорость счета событий, σ – сечение исследуемого процесса, а L - светимость ускорителя. Светимость - это внутренняя характеристика ускорителя показывающая, насколько эффективно происходят столкновения частиц. Для увеличения скорости набора статистики необходимо поднимать светимость. Увеличение светимости является одной из важнейших задач в процессе совершенствования существующих ускорителей и при проектировании новых. В случае встречных пучков формула светимости, согласно[1], имеет вид:

$$L = \frac{KN_1N_2f_0}{S_{eff}} \quad (2)$$

Где N_1, N_2 – число частиц в сталкивающихся сгустках, K – число сгустков на одной орбите, f_0 – частота обращения сгустков, S_{eff} – эффективный поперечный размер сгустка, зависящий от его формы и угла места встречи. Частота обращения и число сгустков на орбите определяются длиной орбиты ускорителя, поэтому эти параметры в процессе работы изменить нельзя. Остается увеличивать число частиц в сгустках и уменьшать поперечные размеры пучков. При этом сокращение поперечных размеров пучка дает двойной выигрыш. Уменьшение поперечных размеров повышает плотность частиц в фазовом пространстве. В результате появляется возможность инжектировать дополнительные частицы внутрь сепаратрисы ускорителя, тем самым увеличить N_1 и N_2 .

Траектории движения частиц в ускорителе в поперечном направлении ограничиваются фокусирующими элементами. Эти элементы являются линейными преобразованиями точек фазового пространства. Поэтому, согласно теореме Лиувилля, фазовый объем частиц остается неизменным. В итоге, для увеличения фазовой плотности необходимо ввести силы диссипативного характера, действующие индивидуально на частицы в пучке. Процесс сокращения поперечного (и продольного) фазового объема пучка и называется охлаждением пучка. Охлаждение позволяет подавлять различные «нагревающие» процессы, например, многократное рассеяние на остаточном газе. В итоге помимо роста светимости увеличивается время жизни пучков в накопительном кольце.

1.2 Радиационное охлаждение.

В электрон-позитронных машинах естественным образом происходит радиационное охлаждение пучков из-за синхротронного излучения. Суть явления следующая: заряженная релятивистская частица, двигаясь по криволинейной траектории, испытывает поперечное ускорение. В собственной системе отсчета под действием этого ускорения частица производит дипольное излучение с торообразной диаграммой направленности. При обратном переходе в лабораторную систему отсчета, излучение из-за релятивистского преобразования углов сжимается в конус с характерным углом $1/\gamma$ и направлением против мгновенного вектора скорости частицы. Потеря продольного импульса восполняется ВЧ системой ускорителя. В поперечном (и продольном) направлении происходит охлаждение пучка. Мощность синхротронного излучения электрона (в СГС), согласно [2], определяется формулой:

$$P_{sr} = \frac{2e^2 c \beta^2 \gamma^4}{3R^2} \quad (3)$$

где γ - релятивистский фактор, R - радиус кривизны траектории, βc - скорость, e - заряд. Если учесть, что $R = \frac{pc}{eB}$, $P = \gamma m V$, $V = \beta c$, $E = \gamma m c^2$, где B - магнитное поле, P - релятивистский импульс, E - энергия, m - масса покоя частицы, то формула (3) приобретает вид:

$$P_{sr} = \frac{2}{3} \frac{e^4 \beta^2 B^2 E^2}{m^4 c^3} \quad (4)$$

Из этой формулы видно, что при заданных значениях энергии частицы E и магнитного поля B , мощность синхротронного излучения падает как:

$$P_{sr} \sim \frac{1}{m^4}$$

Таким образом, для электронов и позитронов радиационное охлаждение эффективно, а для протонов и особенно тяжелых ионов нет.

1.3 Электронное охлаждение.

Метод электронного охлаждения, предложенный Г. И. Будкером в 1966 г [3], в настоящее время является одним из основных способов повышения качества пучков тяжелых заряженных частиц в ускорителях. Охлаждение повышает качество пучков, уменьшая разброс по импульсам, подавляет рассеяние на внутренней мишени и внутривпучковое рассеяние, позволяет обеспечить накопление пучков за счет освобождения апертуры ускорителя для новых порций инжекции.

Суть метода заключается в следующем: на специальном участке накопительного кольца к ионному пучку очень аккуратно подводится ускоренный электронный пучок. Направление и величина скорости электронов совпадает со средней скоростью ионов.

Поперечный и продольный разброс скоростей в электронном пучке очень мал. То есть электронный пучок очень «холодный». Создание и транспортировка такого электронного пучка представляет техническую задачу очень высокой сложности. Из-за малых относительных скоростей ионов и электронов происходит очень интенсивный обмен импульсами через кулоновское взаимодействие. Механизм передачи импульсов напоминает ионизационные потери заряженной частицы в веществе. В системе электронного пучка мы имеем облако покоящихся электронов и движущиеся, в продольном и поперечном направлениях, ионы. В итоге, движущиеся ионы передают часть своего импульса электронам. Так возникает тормозящая сила, которая действует индивидуально на каждый отдельный ион. Далее электронный пучок отводится в сторону, а ионный пучок продолжает движение в накопительном кольце. На следующем обороте все повторяется заново. Электронный пучок, который вступил во взаимодействие с ионами, утилизируется в коллекторе. Но для сокращения электрического потребления и уменьшения радиационной нагрузки электронный пучок перед утилизацией подвергается рекуперативному торможению. Таким образом, на каждом следующем обороте с ионным пучком взаимодействуют «свежие» электроны. В итоге происходит уменьшение продольного и поперечного фазового объема ионного пучка до некоторого равновесного значения. В этом заключается суть метода электронного охлаждения ионных пучков. Для достижения высокой эффективности данного метода необходимо уметь создавать и транспортировать электронный пучок с малым разбросом скоростей.

Для компенсации расхождения электронного пучка под действием собственного пространственного заряда применяется продольное магнитное поле. Электроны в радиальном электрическом поле пространственного заряда и продольном внешнем магнитном поле совершают дрейфовое движение в азимутальном направлении. Это дрейф в скрещенных полях. Азимутальная компонента скорости электронов в продольном магнитном поле порождает радиальную силу, которая компенсирует кулоновское расталкивание. Электронный пучок находится в продольном магнитном поле на всем протяжении своего движения от пушки до коллектора. То есть секция охлаждения тоже является соленоидом. Электрон движется в продольном направлении, вращается вокруг силовой линии магнитного поля, и дрейфует в азимутальном направлении. Длина секции охлаждения, как правило, составляет несколько метров. Поэтому ее приходится делать из отдельных катушек. В результате неточностей выставки отдельных катушек у силовых линий магнитного поля могут появиться отклонения от прямолинейности. Поперечные компоненты магнитного поля в секции охлаждения порождают поперечные компоненты скорости электронов, что в конечном итоге может снизить эффективность электронного

охлаждения. Как правило, углы наклона силовой линии B_x/B_z и B_y/B_z относительно оси не должны превышать 10^{-5} - 10^{-6} рад. Достижение таких параметров представляет очень сложную техническую задачу. Для ее решения в ИЯФ СОРАН применяется специальная методика. Сначала происходит измерение поперечных компонент магнитного поля по длине секции охлаждения. На основании этих измерений вносятся механические корректировки в положения катушек. Процедура измерения полей с последующей корректировкой положений катушек повторяется до достижения требуемой степени прямолинейности силовых линий магнитного поля. Ключевым компонентом в данной процедуре является оптико-механическая система измерения направления магнитного поля в секции охлаждения.

2. Система измерения направления магнитного поля в секции электронного охлаждения.

Работа системы основана на принципе магнитной стрелки. На магнитном диполе установлено плоское зеркало перпендикулярно магнитной оси диполя. Диполь с зеркалом закреплен на подвесе для компенсации силы тяжести. Подвес имеет специальную конструкцию, которая должна создавать минимально возможные механические моменты на магнитный диполь. Центр опоры подвеса должен проходить через центр масс диполя, чтоб не образовывался опрокидывающий момент силы тяжести. Кроме этого, моменты сил трения и упругости должны быть минимально возможными. Паразитные механические моменты порождают неточности измерения магнитных полей. Наилучшим образом, себя зарекомендовала нейлоновая леска диаметром 0,1мм. Магнитный диполь, с зеркалом, на подвесе помещен в корпус из меди. Высокая проводимость меди производит демпфирование свободных колебаний магнитного диполя за счет наведения токов Фуко. Данная конструкция в сборе образует магнитную стрелку.

Эта магнитная стрелка, помещенная вблизи оси соленоида, ориентируется вдоль локального направления магнитного поля. Вдоль оси соленоида проходит слабо сходящийся луч лазера. Излучение лазера вводится на ось секции охлаждения через светоделительный кубик. Луч отражается от зеркала на диполе, возвращается назад и попадет в четырехсекторный фотоприемник. Положение луча на фотоприемнике стабилизируется системой обратной связи по двум координатам путем подачи токов в корректирующие катушки поперечного поля. Корректирующие катушки полей X и Y вставляются на всю длину внутрь секции охлаждения для проведения процедуры настройки и демонтируются по окончании. Поля коррекции компенсируют локальные поперечные поля соленоида в месте установки магнитной стрелки, так что отраженный луч лазера всегда попадает в центр фотоприемника. Таким образом, токи коррекции

характеризуют компоненты X и Y магнитного поля соленоида в месте установки магнитной стрелки. Перемещая стрелку вдоль оси соленоида, производятся измерения поперечных компонент магнитного поля по длине. Каждое перемещение магнитной стрелки порождает ее свободные колебания. Сокращение времени затухания этих колебаний уменьшает общее время измерений. Поэтому демпфирование с помощью медного корпуса очень важно. АЧХ и ФЧХ магнитной стрелки важны для построения правильного алгоритма системы обратной связи.

3. Модель гармонического осциллятора.

3.1. Гармонический осциллятор с затуханием.

Простейшим примером гармонического осциллятора являются колебания груза на пружине. Уравнение движения груза массой m , с координатой x , на пружине жесткости k , без затухания имеет вид:

$$m\ddot{x} = -kx, \text{ или } \ddot{x} + \omega_0^2 x = 0, \text{ где } \omega_0^2 = k/m.$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$x(t) = x_0 \cos(\omega_0 t + \varphi), \quad (1)$$

где x_0 и φ определяются начальными условиями.

Если теперь ввести силу трения $F_{mp} = -\beta v$, где v - скорость груза, то уравнение движения примет вид:

$$m\ddot{x} = -kx - \beta v,$$

или

$$\ddot{x} + 2\delta\dot{x} + \omega_0^2 x = 0,$$

где $\omega_0^2 = k/m$, $2\delta = \beta/m$.

Случай большого затухания $\omega_0^2 - \delta^2 \leq 0$ нас не интересует, так как данное движение не является периодическим.

В случае $\omega_0^2 - \delta^2 \geq 0$ решение (5) имеет вид:

$$x(t) = x_0 e^{-\delta t} \cos(\omega t + \varphi), \quad (6)$$

где $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ и x_0 и φ определяются начальными условиями.

То есть имеет место затухание амплитуды колебаний с характерным $\tau = \frac{1}{\delta}$. Для качественной оценки интенсивности затухания вводится понятие добротности:

$$Q = \frac{\omega}{2\delta} = \frac{\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}}{2\delta} \quad (2)$$

Теперь пусть на осциллятор действует возбуждающая сила:

$$F(t) = F_0 \cos(\Omega t)$$

Тогда уравнение движения примет вид:

$$m\ddot{x} = -kx - \beta v + F(t),$$

или:

$$\ddot{x} + 2\delta\dot{x} + \omega_0^2 x = f_0 \cos(\Omega t), \text{ где } \omega_0^2 = \frac{k}{m}, 2\delta = \frac{\beta}{m}, f_0 = \frac{F_0}{m}.$$

Будем искать стационарное решение этого уравнения в виде:

$$x(t) = A \cos(\Omega t - \psi).$$

Тогда:

$$\dot{x}(t) = -A\Omega \sin(\Omega t - \psi) = A\Omega \cos(\Omega t + \pi/2 - \psi)$$

$$\ddot{x} = -A\Omega^2 \cos(\Omega t - \psi).$$

Подставляем в уравнение и получаем:

$$A(\omega_0^2 - \Omega^2) \cos(\Omega t - \psi) + 2\delta A\Omega \cos(\Omega t - \psi + \pi/2) = f_0 \cos(\Omega t)$$

Пользуясь векторной диаграммой (рис.1) находим A и ψ :

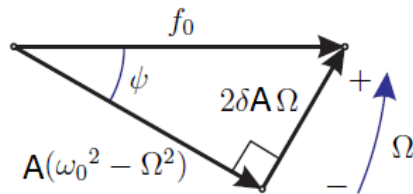


Рис.1 Векторная диаграмма уравнения движения осциллятора.

$$A = \frac{f_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\delta^2 \Omega^2}} \quad (8.1)$$

$$\operatorname{tg}(\psi) = \frac{2\delta\Omega}{\omega_0^2 - \Omega^2} \quad (8.2)$$

3.2. Оценка собственной частоты колебаний магнитной стрелки.

Потенциальная энергия диполя в магнитном поле выражается формулой:

$$E = -\vec{B}\vec{\mu} = -B\mu \cos(\alpha).$$

Возвращающий механический момент, действующий на магнитный диполь μ , повернутый на малый угол α относительно магнитного поля B , рис.2, описывается формулой:

$$M = -\frac{\delta E}{\delta \alpha} = -\mu B \sin(\alpha) \approx -\mu B \alpha.$$

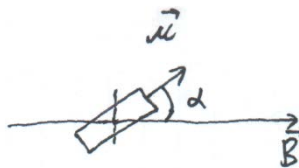


Рис.2 μ – магнитный момент диполя, α – угол относительно магнитного поля B .

Магнитный момент диполя можно оценить согласно формуле:

$$\mu = VM = \frac{VB_r}{4\pi},$$

$$M = \frac{B_r}{4\pi},$$

где $\mathbf{M}$ - намагниченность материала диполя, V - объём магнитного материала, B_r - остаточная намагниченность магнитного материала, рис 3:

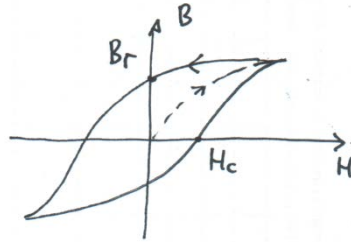


Рис.3 Кривая намагниченности магнито жесткого материала диполя.

Уравнение качаний магнитного диполя имеет вид:

$$J\ddot{\alpha} = M = -B \frac{VB_r}{4\pi} \alpha,$$

где J - момент инерции диполя, α - угол относительно магнитного поля B .

В итоге получаем уравнение осциллятора без затухания:

$$\ddot{\alpha} + \frac{BB_r V}{4\pi J} \alpha = 0$$

$a(t) = a_0 \cos(\omega_0 t + \varphi)$, где a_0 и φ определяются начальными условиями.

$$\omega_0^2 = \frac{BB_r V}{4\pi J} \quad (9)$$

Это и есть собственная частота колебаний магнитной стрелки.

3.3. Оценка параметров осциллятора по кривой АЧХ

Перепишем формулу (8) в виде:

$$A = \frac{f_0}{\omega_0^2} \frac{1}{\sqrt{(1 - \frac{\Omega^2}{\omega_0^2})^2 + 4\delta^2 \frac{\Omega^2}{\omega_0^4}}} \quad (10)$$

Для удобства анализа положим $\frac{f_0}{\omega_0^2} = 1$, а $\frac{\Omega}{\omega_0} = \lambda$.

После этого, формула (10) приобретет вид:

$$A = \frac{1}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + \lambda^2 \frac{4\delta^2}{\omega_0^2}}} \quad (11)$$

Вид безразмерной амплитуды $A(\lambda)$ при $\omega_0=1$ и разных параметрах затухания δ приведен на рис. 4:

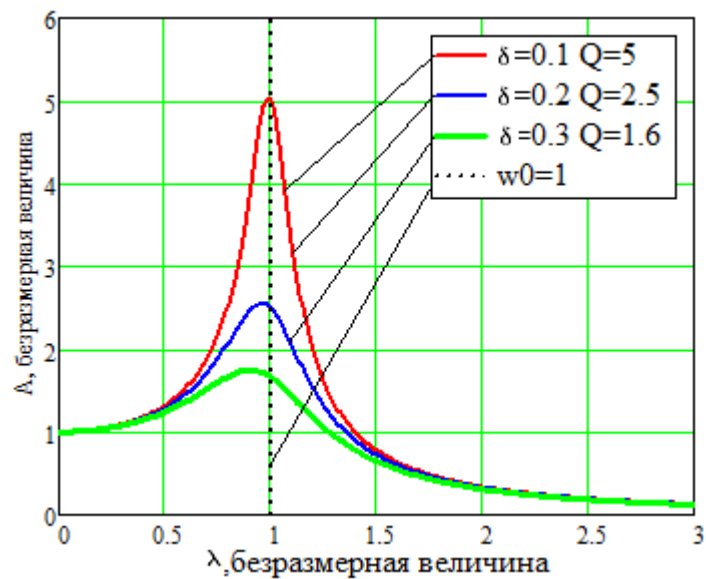


Рис. 4 АЧХ осциллятора с разным затуханием. При малых параметрах затухания δ виден резкий рост амплитуды колебаний вблизи точки $\lambda = 1$, то есть при приближении возбуждающей частоты Ω к собственной частоте осциллятора ω_0 . Изменение параметра δ очень сильно меняет форму кривой АЧХ.

Вид фазы $\psi(\lambda)$ при $\omega_0=1$ и разных параметрах затухания δ приведен на рис. 5:

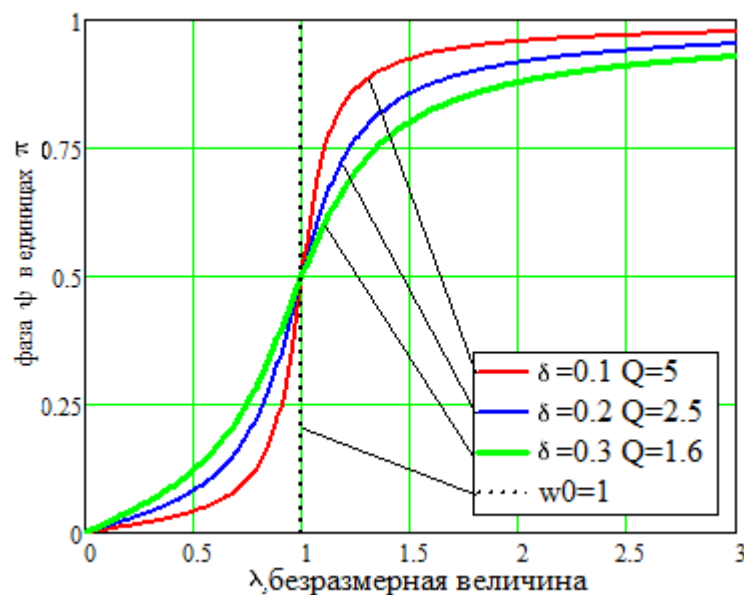


Рис. 5 ФЧХ осциллятора с разным затуханием. При изменении параметра затухания δ форма кривой ФЧХ меняется слабо.

Видно, что производить оценку параметров ω_0 и δ удобнее по экспериментально измеренным кривым АЧХ. Но традиционный метод по оценке добротности:

$$Q \approx \frac{f_{\max}}{\Delta f_{1/\sqrt{2}}}, \quad (12)$$

где $f_{\max}$ – это возбуждающая частота в максимуме амплитуды колебаний, $\Delta f_{1/\sqrt{2}}$ – это полоса частот на уровне $f_{\max}/\sqrt{2}$ в нашем случае может дать большую погрешность, так как мы ожидаем, что δ будет сравнима с ω_0 и пренебрегать ей нельзя.

Найдем возбуждающую частоту, при которой достигается максимальная амплитуда колебаний. Для этого необходимо найти максимум в знаменателе под корнем в формуле (6):

$$((1 - \lambda^2)^2 + \frac{4\delta^2}{\omega_0^2} \lambda^2)'_{\lambda} = 0 \quad (13)$$

В итоге получаем:

$$\lambda^2 = 1 - \frac{2\delta^2}{\omega_0^2} \quad (14)$$

или

$$\Omega_{\max}^2 = \omega_0^2 - 2\delta^2 \quad (15)$$

Найдем амплитуду колебаний в максимуме. Для этого подставим (14) в формулу (11):

$$A_{\max} = \frac{1}{\frac{2\delta}{\omega_0} \sqrt{1 - \frac{\delta^2}{\omega_0^2}}} \quad (16)$$

То есть, как и следовало ожидать, амплитуда колебаний в максимуме зависит только от δ/ω_0 .

$$\text{Положим } \varepsilon = \frac{\delta^2}{\omega_0^2}. \quad (17)$$

$$\text{Тогда из (16) получаем: } 2\sqrt{\varepsilon}\sqrt{1 - \varepsilon} = \frac{1}{A_{\max}},$$

или, возводя в квадрат обе части, получим:

$$\varepsilon^2 - \varepsilon + \frac{1}{4A_{\max}^2} = 0. \quad (18)$$

Решая квадратное уравнение (18) относительно ε получаем:

$$\varepsilon = \frac{1 \pm \sqrt{1 - \frac{1}{A_{\max}^2}}}{2}$$

Выбираем решение с «-», так как при $A_{\max} \rightarrow \infty$ должно выполняться $\varepsilon \rightarrow 0$.

$$\varepsilon = \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{1}{A_{\max}^2}}}{2} \quad (19)$$

Перепишем формулу добротности в виде

$$Q = \frac{\omega}{2\delta} = \frac{\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}}{2\delta} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\omega_0^2}{\delta^2} - 1}$$

В итоге и учетом (17) получаем:

$$Q = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{\varepsilon} - 1} \quad (20)$$

Видно, что при $\varepsilon \rightarrow 0$ то есть малом затухании, $Q \rightarrow \infty$, как и должно быть.

Теперь находим $A_{\max}$ из экспериментально померенной АЧХ. После этого находим из (19), а затем Q из (20). Найдя ε , мы можем решить систему уравнений (15) и (17) относительно δ и ω_0 :

$$\omega_0^2 = \frac{\Omega_{\max}^2}{1-2\varepsilon} \quad (21)$$

Видно, что при $\varepsilon \rightarrow 0$ мы имеем $\Omega_{\max} = \omega_0$, как и должно быть.

$$\delta^2 = \varepsilon \frac{\Omega_{\max}^2}{1-2\varepsilon} \quad (22)$$

Видно, что при $\varepsilon \rightarrow 0$ мы имеем $\delta \rightarrow 0$, как и должно быть.

Таким способом, по измеренной АЧХ мы находим $A_{\max}$ и $\Omega_{\max}$. Из этих значений мы находим аналитически ω_0 , δ и Q . В конце необходимо сравнить значение Q с оценкой по формуле (12). А также сравнить значение ω_0 с оценкой по формуле (9). К сожалению, простой оценки δ у нас нет.

4. Описание макета системы измерения направления магнитного поля.

4.1. Описание стенда настройки системы измерения направления магнитного поля.

Для проведения экспериментов будет использоваться специальный стенд настройки системы измерения направления магнитного поля, так как настоящая секция электронного охлаждения в данный момент отсутствует. Стенд настройки состоит из нескольких основных частей, рис 6.

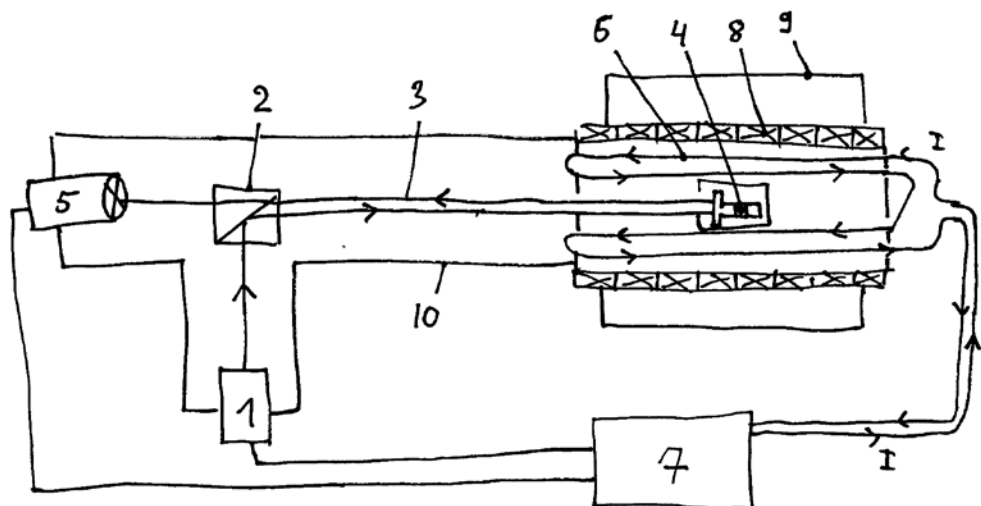


Рис. 6 Схема стенда настройки системы измерения направления магнитного поля. 1 – лазер, 2 – светоделительный элемент, 3 – ход лучей, 4 – магнитная стрелка, 5 – четырехсекторный фотоприемник, 6 – катушки коррекции, 7 – блок обратной связи, 8 – катушки коррекции, 9 – катушки коррекции, 10 – катушки коррекции.

обмотка соленоида, 9 – экран соленоида, 10 – оптическая скамья с элементами механической юстировки.

Стенд настройки является упрощенной версией реальной системы. Так магнитная стрелка закреплена неподвижно в середине соленоида и не может перемещаться по длине. Сам соленоид имеет существенно меньшие размеры по сравнению с реальной секцией охлаждения. Максимальное магнитное поле соленоида составляет 100 Гс, вместо 2000 кГс, в реальной секции охлаждения. Работа на пониженном магнитном поле позволяет чувствовать меньшие паразитные моменты от дисбаланса магнитной стрелки и механического подвеса. Эта повышенная чувствительность необходима для тонкой настройки магнитной стрелки, которая заключается в максимально возможной минимизации всех паразитных механических моментов. В этом заключается основное назначение данного стенда. Соленоид имеет магнитное экранирование от внешнего поля земли. Внутри соленоида установлена система катушек коррекции. Соленоид с магнитной стрелкой и катушки коррекции, светоделительный элемент, лазер и фотоприемник смонтированы на оптической скамье на элементах тонкой механической регулировки. Все вместе они образуют единую оптико-механическую систему.

4.2. Конструкция тестового соленоида

Схематическая конструкция тестового соленоида показана на рис. 7:

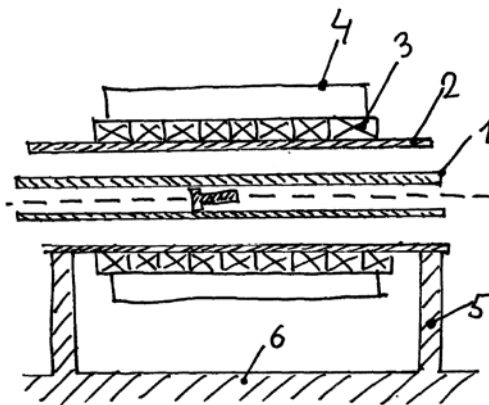


Рис. 7 Схематическая конструкция тестового соленоида. 1 – трубка крепления катушек коррекции и магнитной стрелки, 2- опорная труба основной обмотки соленоида, 3 – обмотка соленоида, 4 – экран соленоида из пермаллоя, 5- поворотная и юстированная опора, 6 – оптическая скамья.

Витки соленоида - это медная шина сечения 6x1 мм в стеклянной изоляции. Охлаждение воздушное. Максимальный ток 8А. Ток питания подается от источника ТЭС-5010. Контроль тока производится вольтметром В7-38 по напряжению на шунте 10А, 60mV, класс точности 0,5%. Калибровка продольного поля произведена тесломером Ш1-8. В результате продольное максимальное магнитное поле составляет 100 Гс на токе 8А. Этот ток соответствует 50mV напряжению на шунте. Основная обмотка соленоида

намотана на опорную трубу 2 неразборным образом. На этой же трубе смонтирован магнитный экран из пермаллоя. За эту же трубу происходит крепление соленоида к опорам 5. Пара основных обмоток коррекции, и пара дополнительных, смонтированы на съемной трубе 1. Внутри этой трубы 1 устанавливается магнитная стрелка. Схематическая конструкция обмоток коррекции в разрезе показана на рис 8.

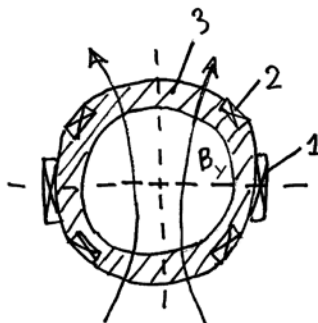


Рис. 8 Конструкция катушек коррекции в разрезе. Показаны только катушки для Y направления. 1 – основная обмотка коррекции, 2 – дополнительная обмотка коррекции, 3 – опорная труба.

Основные обмотки 1 выполнены в виде одного витка из полосы для ХиY направлений. Дополнительные обмотки коррекции 2 для ХиY направлений намотаны тонким лакированным проводом диаметром около 0,1мм. Каждая состоит из двух обмоток для достижения большей равномерности поля в области магнитной стрелки (принцип, сходный с катушками Гемгольца).

4.3. Конструкция магнитной стрелки

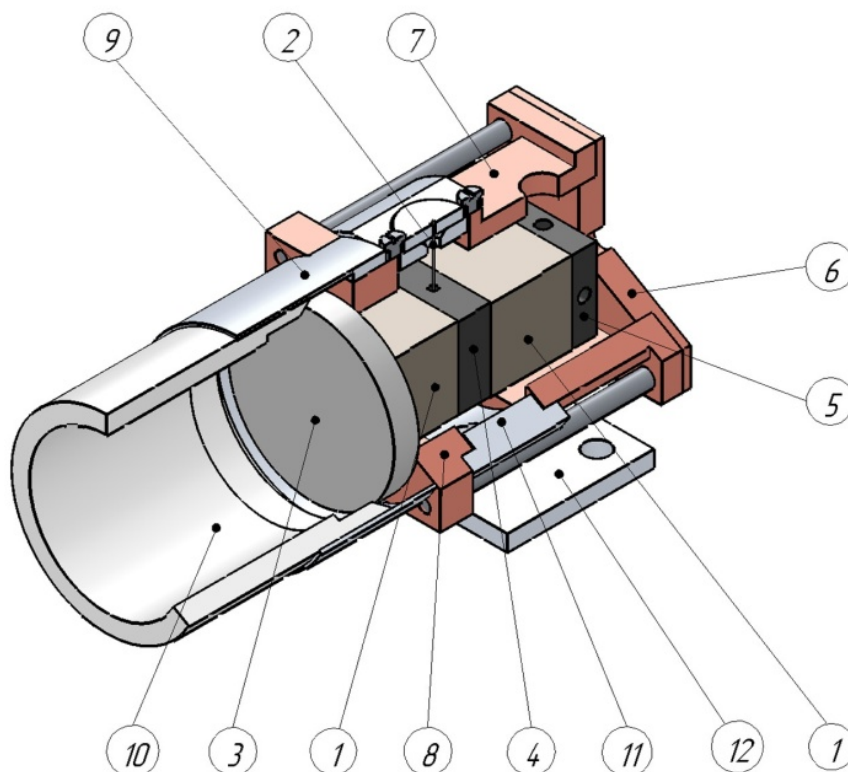


Рис. 9 Конструкция магнитной стрелки. 1 – постоянный магнит размерами 10х10х10мм – 2 шт., 2 – нейлоновый подвес, 3 – плоское зеркало, 4 – система крепления подвеса, 5 – система балансировки, 6 – демпфирующая крышка, 7 – демпфирующий задний экран, 8 – демпфирующий передний экран, 9 – держатель втулки, 10 – втулка фторопластовая, 11 – корпус, 12 – основание.

Плоское зеркало имеет апертуру 20 мм и толщину 3 мм. Зеркало приклеено к поверхности постоянного магнита. Магнитный диполь изготовлен из редкоземельного материала NdFeB. Остаточное поле B_r составляет от 6 до 12 кГс, в зависимости от степени намагниченности. Для оценки положим $B_r=10\text{ кГс}$. Размер магнитов 10х10х10мм. Плотность NdFeB составляет 8 г/см^3 . Число магнитов в диполе 2 штуки. То есть общий объем 2 см^3 , а вес 16г. В пространстве между магнитами находится механизм подвеса. Он сделан из магнито-мягкой стали и имеет размеры 10х10х5 мм. Его вес 4г. В данной магнитной стрелке использован подвес на основе нейлоновой моно-нити диаметром 0,1мм. На нижнем конце нити сформирован шарик методом оплавления, который используется для фиксации в креплении 4, рис.9. Противоположный конец нити закреплен на корпусе 11, рис 8. На другом конце диполя закреплена система балансировки на основе подвижных винтов. Эта система также сделана из магнито-мягкой стали и имеет размеры 10х10х5 мм и вес 4г. Оценка веса магнитной стрелки: $m=8+8+4+4=24\text{ г}$. Взвешивание на весах дало $m=23.6\text{ г}$. Таким образом, оценка момента инерции составляет $J = 24\text{ г} \cdot 1\text{ см}^2 = 24\text{ г} \cdot \text{см}^2$. Более точные измерения на основе 3D модели дают результат

$J=19.6 \text{ г см}^2$. В итоге оценка собственной частоты колебаний магнитной стрелки по формуле (4) дает:

$$\omega_0^2 = \frac{2 \text{ см}^2 \cdot 10^4 \text{ Гс} \cdot 10^2 \text{ Гс}}{4 \cdot 3,14 \cdot 20 \text{ г} \cdot \text{см}^2} = 0,8 \cdot 10^2$$

$$\omega_0 = 90 \frac{\text{рад}}{\text{с}},$$

$$\nu_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{90}{6,3} = 14,3 \text{ Гц}.$$

Снаружи диполя находится магнитный экран из меди, который создает демпфирование качательных колебаний диполя. Для оценки степени затухания δ необходимо производить моделирование полей. К сожалению, простой оценки δ у нас нет

4.4. Система обратной связи.

Устройство системы обратной связи показано на рис. 10:

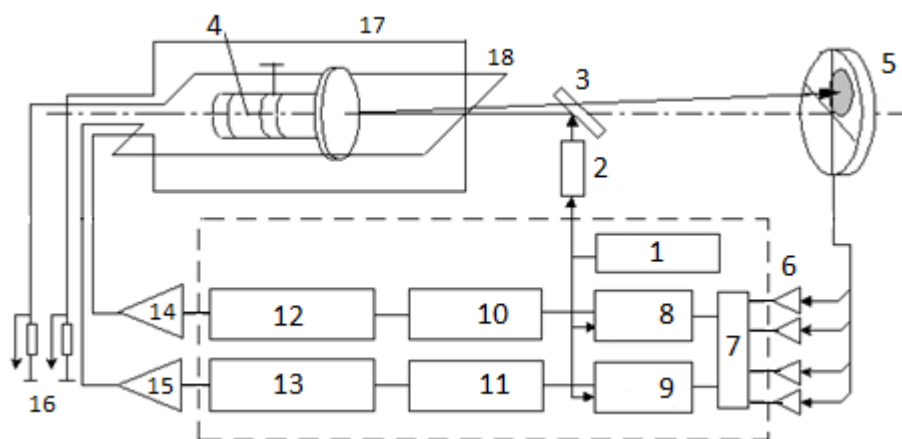


Рис. 10 Устройство системы обратной связи. 1 – модулятор лазерного диода, 2– лазерный диод, 3– светоделительный элемент, 4– магнитная стрелка, 5– четырехсекторный фотоприемник, 6 – усилители сигналов фотоприемника, 7 – матрица координатных сигналов X и Y, 8, 9 – синхронные детекторы для каналов X и Y соответственно, 10, 11- ПИД регуляторы, 12, 13 - предусилители, 14, 15- выходные усилители тока для каналов X и Y соответственно, 16 - внешние нагрузочные резисторы, 17 - корректирующая обмотка X, 18 - корректирующая обмотка Y.

Ток лазерного диода модулируется блоком 1. С помощью светоделителя 3 лазерный луч вводится на ось тестового соленоида. Далее луч отражается от магнитной стрелки 4 и попадает на четырехсекторный фотоприемник 5. Схематический вид фотоприемника показан на рис 11. Сигналы с каждого сектора усиливаются предусилителями 6. Усиленные сигналы секторов суммируются и вычитаются соответствующим образом для получения координатных сигналов X и Y в матрице 7. Далее происходит демодулирование координатных сигналов в блоках 8 и 9. Затем демодулированные сигналы подаются на вход ПИД регуляторов 10 и 11. ПИД регуляторы формируют

сигналы коррекции, которые подаются в предусилители 12 и 13, а затем в токовые усилители 14 и 15. С выхода усилителей токи коррекции поступают в обмотки 17 и 18 через нагрузочные сопротивления 16. Магнитные поля коррекции меняют положение магнитной стрелки. Положение пятна на поверхности четырехсекторного фотоприемника меняется, и новые сигналы X и Y поступают на вход ПИД-регулятора, замыкая, таким образом, контур обратной связи.

4.5. Фоточувствительный датчик.

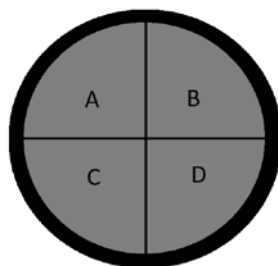


Рис. 11 Фоточувствительный датчик, типа ФД-141К, разделенный на 4 области.

Схема получения координатных сигналов имеет вид: $X=A+C-B-D$, $Y=A+B-C-D$. Модулирование излучения лазера необходимо для подавления паразитной засветки от внешних источников. Частота модулирования составляет 8 кГц. Этот метод позволяет подавить интенсивность внешней засветки примерно в 200 раз.

Предусилители 6 смонтированы в корпусе фотоприемника для уменьшения влияния внешних наводок. Токовые усилители 12 и 13 также смонтированы в отдельном корпусе.

Элементы 1, 7-13 конструктивно оформлены в едином корпусе и образуют блок обратной связи. Внешний вид его передней панели показан на рис 12.

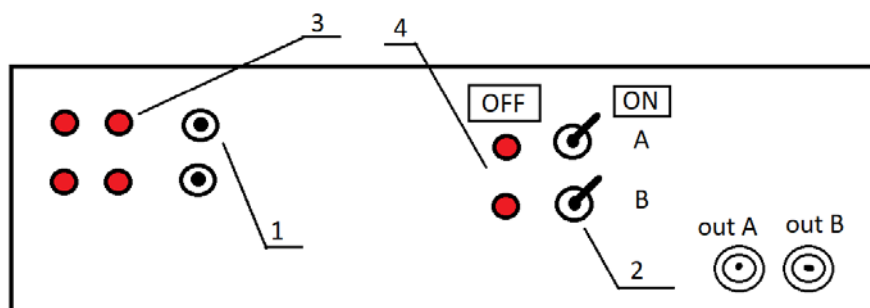


Рис. 12 Лицевая панель блока обратной связи. 1 – потенциометры для ручного смещения светового пятна, 2 – тумблеры включения и выключения обратной связи. 3 – световые индикаторы положения пятна лазера на поверхности фотоприемника. 4 – индикаторы состояния обратной связи. Диоды горят, когда обратная связь включена.

5. Проведение измерений.

Необходимо получить АЧХ магнитной стрелки с выключенной и включенной системой обратной связи.

Сначала необходимо запустить модуль СЕАС-208, который устанавливает корректный режим работы блока обратной связи. Затем, временно отключаем систему обратной связи, тумблеры (2) В и А в положении «off» (рис.12). Используя джостики (1) вручную устанавливаем положение светового пятна на светодиоде так, чтобы распределение интенсивности во всех секторах было одинаковое, т.е. нужно попасть в «крестик».

Теперь к контактам плоской катушки, красная пара, подключаем низкочастотный генератор ГЗ-112. Пропуская синусоидальный ток по виткам соленоидов, создадим поперечное переменное поле, под действием которого начнет колебаться магнитная стрелка, а вместе с ней и световое пятно на фоточувствительной поверхности.

Электронный осциллограф LeCroywaveJet 314 используется для вывода графика переменного напряжения, выдаваемого фотодиодом. Важно отметить, что сигнал, выходящий из фотодиода, поступает в осциллограф через блок обратной связи и при этом демодулированный. Демодуляция добавляет дополнительную синусоидальную зависимость в исходный сигнал. По этой причине, на частотах выше 50 Гц, внешние шумы дают сигнал с диода, и осциллограмма получается совершенно размытая и не имеющая смысла. Поэтому измерения проводим в диапазоне частот от 10 до 50 Гц. Нижняя граница диапазона определена характеристиками генератора ГЗ-112 – минимальная амплитуда 10Гц.

Проведя измерения с выключенной обратной связью, мы заметили, что сдвиг фазы на почти нулевой частоте не сходится к нулю, а нормированное напряжение стремится к бесконечности. Более того резонанс получился очень слабо выраженный. По этой причине мы решили использовать генератор, позволяющий изучить явление на более низких частотах, т.к. было предположение наличия другого резонанса в промежутке от 0 до 10 Гц.

Для этого был использован волновой синтезатор Agilent 33500B Series, способный генерировать сигналы частотой от долей герца до десятков тысяч герц. Генератор регламентирует сопротивление на входе примерно 50 Ом. Для этого была собрана схема с включенным в цепь сопротивлением номиналом 27 Ом, т.к. собственное сопротивление красной пары плоских катушек 23,1 Ом.

Измерения проводим от 0,5 до 50 Гц. АЧХ такой цепи была схожа с предыдущим результатом: уходящая на бесконечность амплитуда вблизи нуля (рис.14), и слабо

выраженный резонанс(рис.15). При этом, наблюдалась очень сомнительная динамика показаний осциллографа. С увеличением частоты, амплитуда напряжения, снимаемого с цепи осциллографом, уменьшалась, но синтезатор выдавал постоянную по модулю величину напряжения. В связи с этим схема была переделана (рис.13).

В этом случае на осциллограф подается сигнал с генератора и с нагрузки. Но и в этом случае получается схожая картина (рис.16 и рис.17). Сложилось впечатление, что катушки могли выйти из строя. Чтобы проверить такое предположение, синтезатор волн был переведен в режим «offset» - добавление постоянного смещения. Плавно меняя выходное напряжение, мы снимали показания напряжения на нагрузке и по величине тока рассчитывали значение напряжения на катушке. Построили зависимость изменения амплитуды сигнала от изменения постоянной величины. Наблюдали линейную зависимость, как и предполагалось.

Вернувшись к последней измерительной схеме и разобравшись в установленных параметрах осциллографа, мы переключили фильтр с АС на DC. В этом и заключалась причина появления экспериментальных данных, не совпадающих с теоретическим предположением. На низких частотах фильтр переменного тока «отрезал» подаваемый сигнал, принимая его за постоянный ток. Подавая переменное напряжение частотой в диапазоне от 0,1 до 50 Гц, была получена АЧХ(рис.18). Повторив все действия с уже включенной системой обратной связи, мы получили АЧХ (рис.19) и ФЧХ (рис..20) осциллятора.

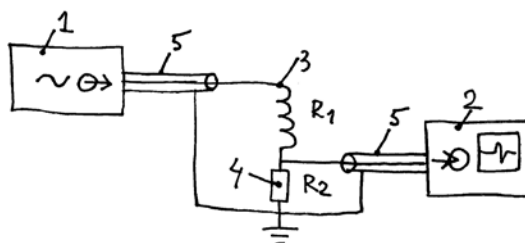


Рис. 13. Схема 1 – осциллограф получает сигнал с генератора и с цепи последовательного подключения нагрузки и индуктивности.

6. Анализ результатов и измерений.

Теперь проведем анализ результатов. Сначала произведем оценку абсолютной величины ω_0 по формуле (9). Максимальное продольное магнитное поле составляет 100 Гс на токе 8А, а величина остаточной намагниченности материала порядка 10 кГс. Объем тела 2 см³, момент инерции диполя порядка 20 г·см², подставив значения величин в уравнение (9) получим:

$$\omega_0 \approx 90 \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right) \quad (23)$$

Величина (23) это расчетное значение собственной частоты колебаний осциллятора.

Теперь перейдем к экспериментальным данным. Сначала рассмотрим случай с выключенной обратной связью. Максимальная амплитуда в этом режиме $A_{\max} = 1,9$, подставляем в уравнение (19) и получаем, $\delta/\omega_0 = 0,274$. Зная это соотношение, можем рассчитать значение ω_0 из уравнения (15), подставив $\Omega_{\max} = 15 \cdot 2\pi$, получим

$$\omega_0 \approx 102,2 \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right), \quad (24)$$

что сравнимо с аналитическим значением (23).

Теперь по формуле (20) рассчитаем добротность колебаний осциллятора, $Q \approx 1,756$. Но это добротность оценочная, сравним с добротностью, рассчитываемой по формуле (12) опираясь на экспериментальную кривую, получаем $Q \approx 1,765$, что примерно равно нашей оценке.

Аналогичные действия проделаем для случая с включенной обратной связью. Выражение (23) все так же верно. $A_{\max} = 8,32$. Подставим значение в формулу (19) и получим, $\delta/\omega_0 = 0,06$.

$\Omega_{\max} = 22,5 \cdot 2\pi$, и подставляя значения в уравнение (15) получим:

$$\omega_0 \approx 141,9 \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right), \quad (25)$$

что отличается от (23) на 36,75%.

Теперь по формуле (20) рассчитаем добротность $Q \approx 8,318$, но формула (12) дает $Q \approx 4,245$, т.е. значения добротностей различаются в 2 раза.

Все необходимые расчетные данные для построения оценочных АЧХ и ФЧХ по формулам (8.1) и (8.2) известны. Наложив два графика, теоретический и экспериментальный, друг на друга, можем заметить, что проделанный нами аналитический расчет с хорошей точностью описывает наблюдаемый физический процесс.

7. Выводы.

Видим, что при выключенной обратной связи экспериментальные и аналитические данные совпадают с ошибкой не более 1% для значения добротности и не более 10% для частоты собственных колебаний, стоит отметить, что последняя была грубо оценена аналитически. Графики ФЧХ (рис.17) и АЧХ (рис.16) вполне хорошо совпадают, описывают физический процесс.

Не все так хорошо в случае с включенной обратной связью. Мы видим сильное расхождение в значениях собственной частоты в 2 раза, однако добротности различаются

в 2 раза. Видим, что подключение обратной связи, согласно экспериментальным данным увеличивает добротность системы в 4 раза. В уравнении (5) мы ввели число $\omega_0 = \sqrt{k/m}$. Получив экспериментальные данные, мы можем сравнить значения «жесткости» системы в случае включенной и выключенной обратной связи, согласно (24) и (25) видим, что при включении обратной связи жесткость системы увеличивается, т.к. масса постоянна. Теперь вспомним определение добротности, как отношение запасенной энергии к теряемой энергии за один период колебания. Таким образом, сравнивая значения добротностей в первом и втором случаях, можно сказать, что обратная связь увеличивает время затухания колебаний магнитной стрелки, что негативно влияет на качество измерений, так как увеличивается общее время расчета и анализа сигналов.

Это может говорить о том, что системы обратной связи в момент переключения вносит добавку во вращательный момент магнитной стрелки, тем самым увеличивает время жизни энергии колебаний.

Сущность данной работы состояла в изучении и анализе эффектов, возникающих как следствие включения в систему обратной связи.

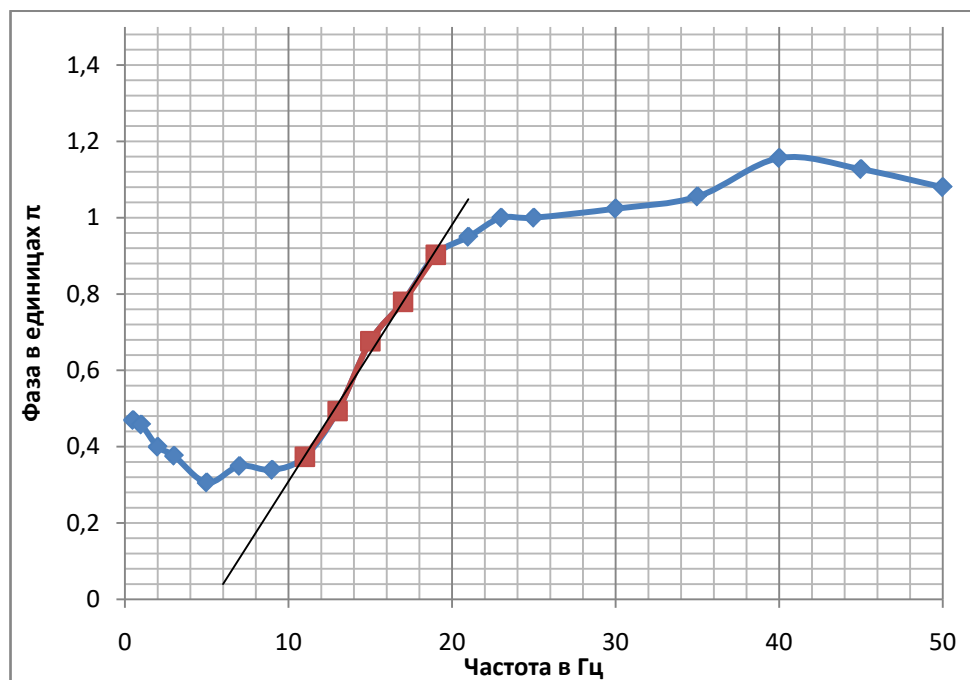


Рис.14 – Зависимость сдвига фазы от частоты, схема подключения.

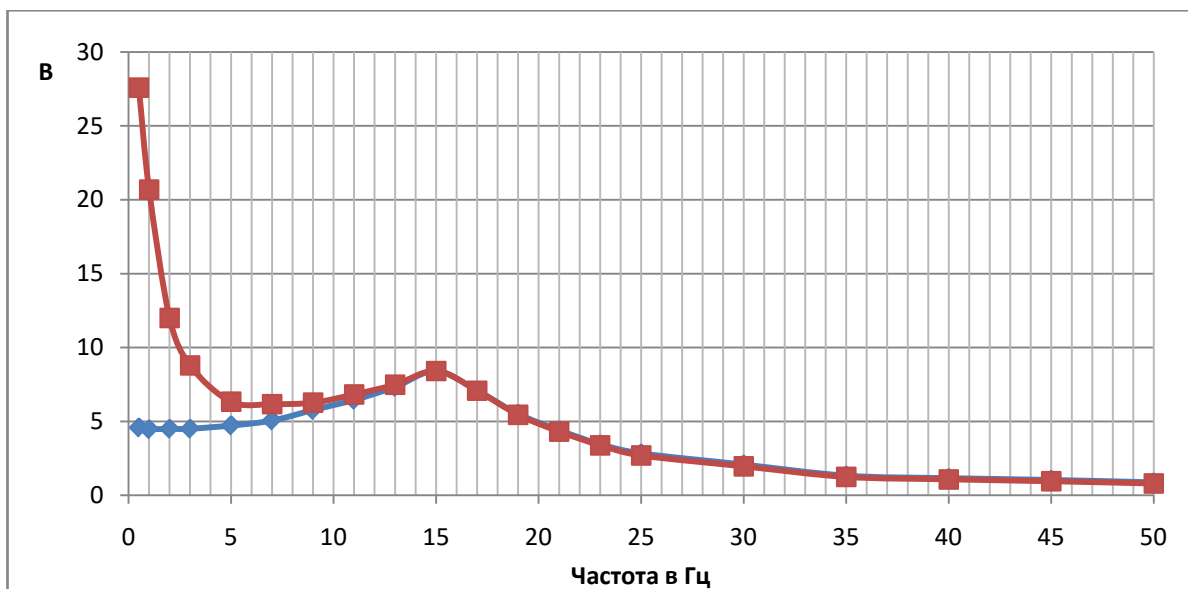


Рис.15 На осциллографе включен фильтр АС, красные квадратики – график нормированной амплитуды, синие ромбики – амплитуда без нормировки.

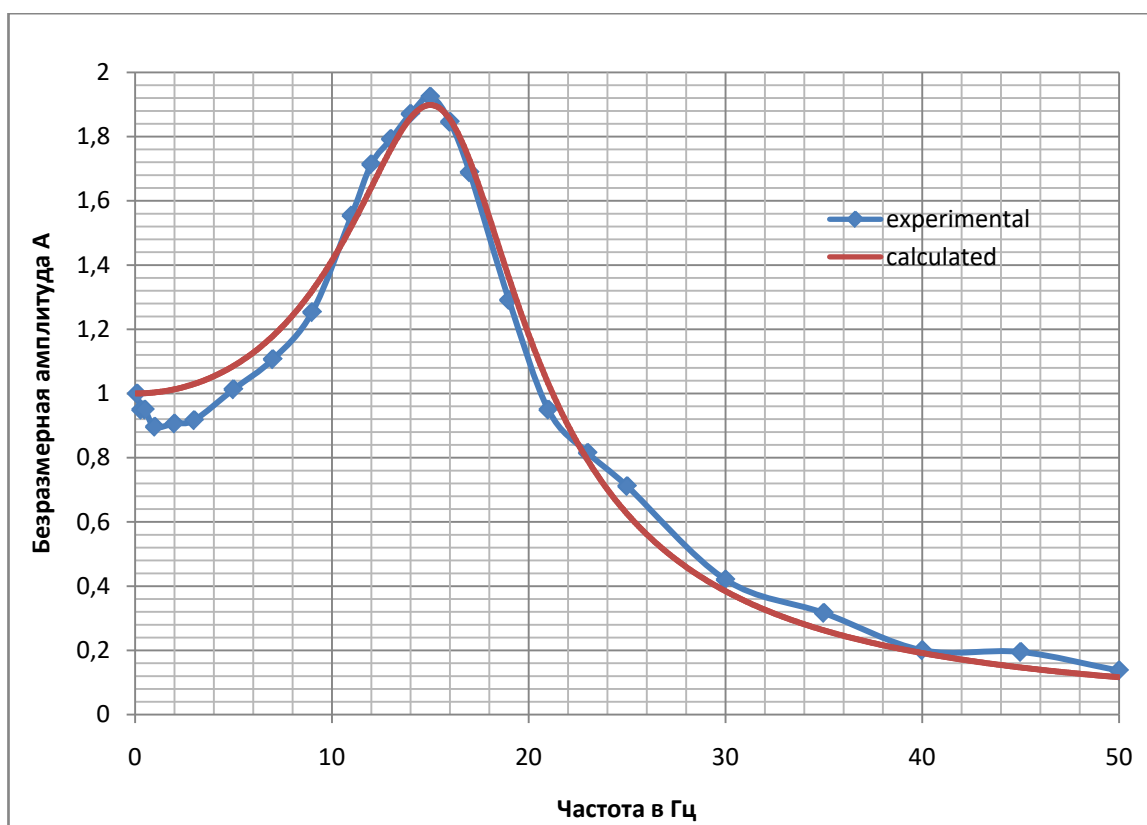


Рис. 16 – АЧХ колебательного контура без обратной связи. Синие ромбики – экспериментальная кривая, красная кривая – аналитическая кривая.

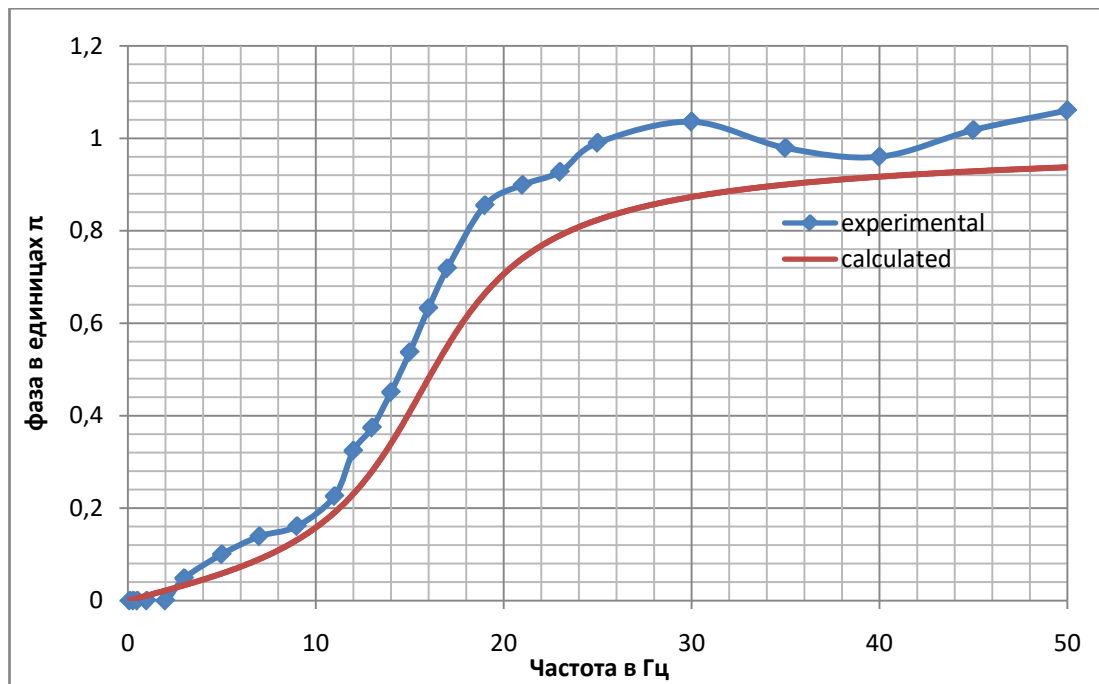


Рис. 17 ФЧХ без обратной связи. Синие ромбики – экспериментальная кривая, красная кривая – аналитическая кривая.

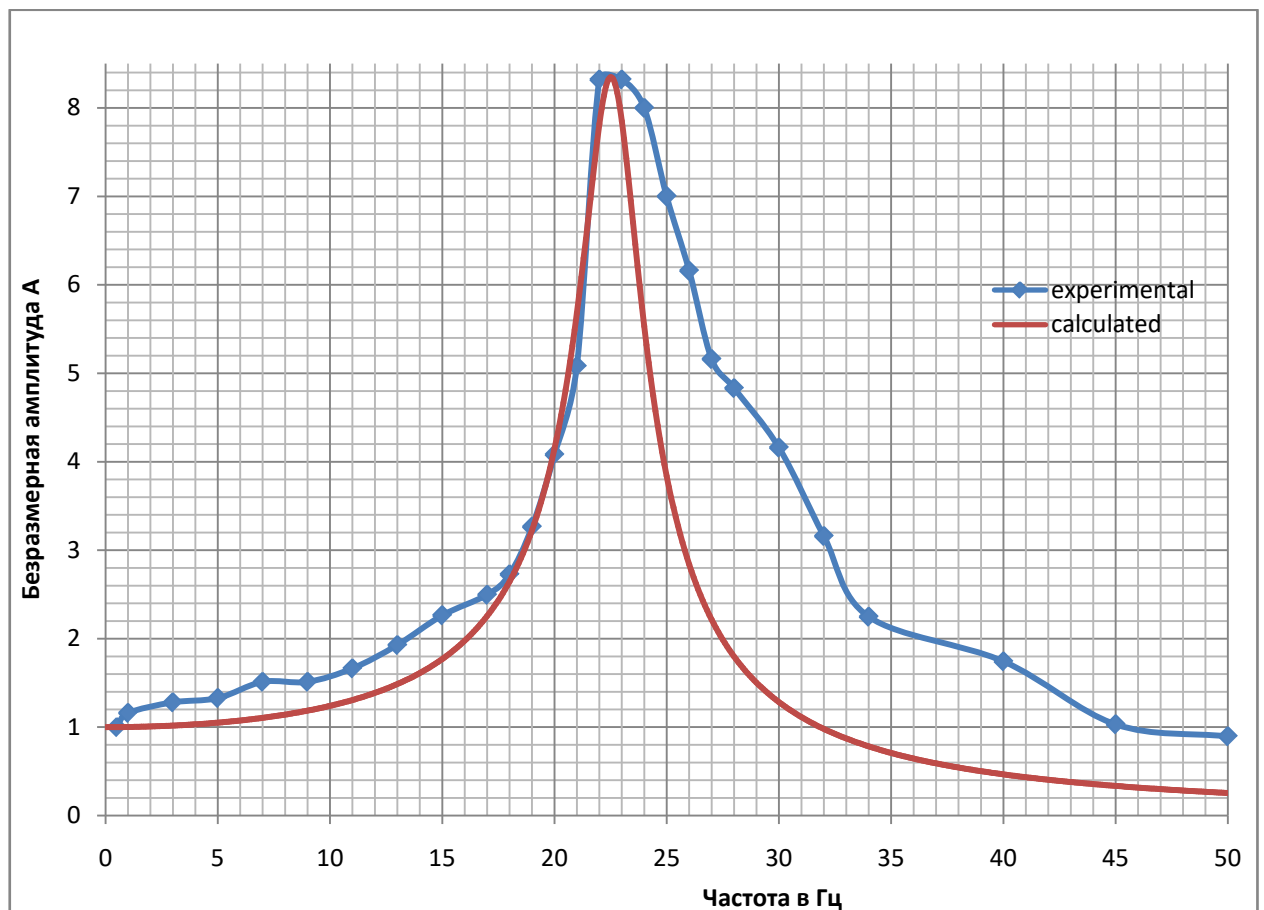


Рис. 18 – АЧХ с включенной обратной связью. Синие ромбики – экспериментальная кривая, красная кривая – аналитическая кривая.

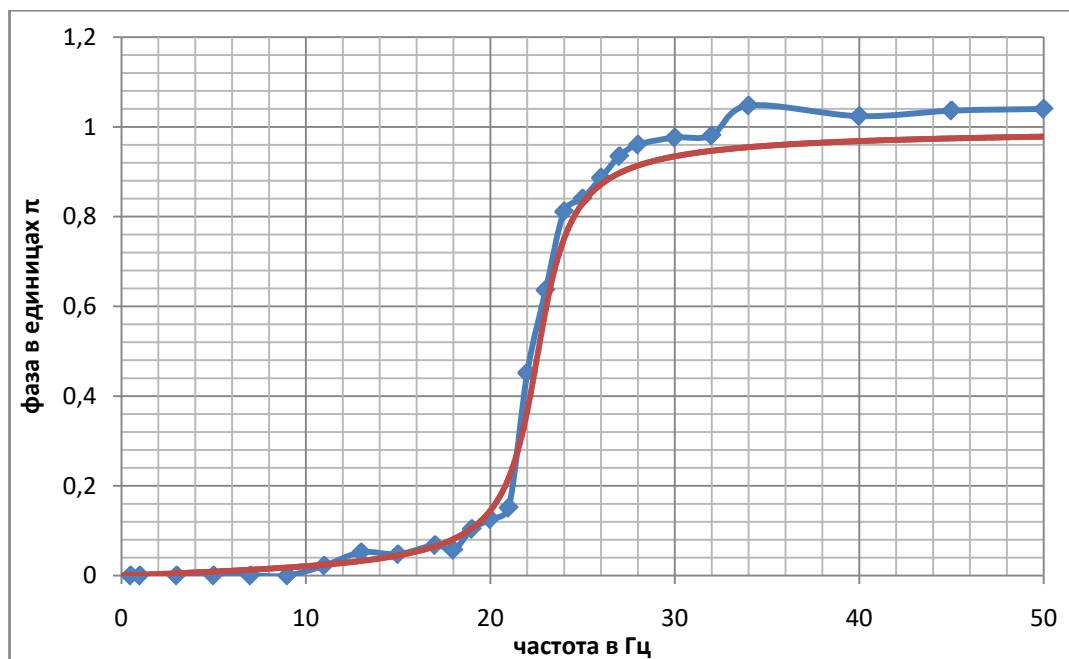


Рис. 19 – график зависимости сдвига фазы от частоты, включена обратная связь, схема 1 (рис.13). Синие ромбики – экспериментальная кривая, красные треугольники – аналитическая кривая.

8. Используемая литература.

1. К. Группен., Детекторы элементарных частиц, Справочное издание, 1999, стр. 277.
2. Золотарев К.В., Теория синхротронного излучения, Методическое пособие, ИЯФ СОРАН.
3. Пархомчук В. В., Скринский А. Н., Электронное охлаждение 35 лет развития // УФН, 2000, Т. 180, No. 5., С. 473-493.
4. Сивухин Д.В., Общий курс физики, т.3, М – «Наука», 1977
5. V.N. Bocharov, A.V. Bublei, S.G. Konstantinov, V.M. Panasyuk, V.V. Parchomchuk, Precision Measurements and Compensation for the Transverse Components of the Solenoid's Magnetic Field., General Experimental Techniques, 25 February, 2005.
6. Bocharov V., Bublei A., Boimelstein Yu., et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A, 2004.
7. Л.Н. Арапов, Н.С. Диканский, В.И. Кокоулин, В.И. Куделайнен, В.А. Лебедев, В.В. Пархомчук, Б.М. Смирнов, Б.Н. Сухина, Институт ядерной физики СО РАН, 13 международная конференция по ускорителям частиц высоких энергий, 1987.
8. V.N. Bocharov, M.I. Bryzgunov, A.V. Bublei, V.G. Cheskidov, M.G. Fedotov, V.V. Parkhomchuk, V.B. Reva, System for measurement of magnetic field line straightness in solenoid of electron cooling for COSY, Budker INP, Novosibirsk, Russia, Proceedings of COOL'11, Aluchta, Ukraine.

9. M. Bryzgunov, A. Bublei, V. Cheskidov, M. Fedotov, V. Gosteev, O. Meshkov, V. Panasyuk, V. Parchamchuk, V. Reva, BINP, Novosibirsk, Russia; V. Kamerdzhev, G. Langenberg, FZJ, Julich, Germany.
7. <http://ate-m.by/wiki/term/koltsa-gelmgoltsa/>.