

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Дмитриев Максим Сергеевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

Измерение характеристик поля магнитной линзы

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18309

Научный руководитель:

Крылов А. А.

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Костюрина А. Г.

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к. т. н. Астрелин В. Т.

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск 2019г.

Аннотация

Целью работы являлись расчёт и изготовление эффективного источника питания для магнитных линз, разработка и создание устройства для измерения напряжённости магнитного поля, проведение практических измерений, и сравнение их с расчётными величинами.

В ходе работы был рассчитан и собран источник питания для магнитной линзы, работающий по принципу ёмкостного накопителя, обеспечивающий максимальное значение напряженности магнитного поля в центре линзы 2 кГс. Разработаны и созданы датчик для измерения напряженности магнитного поля линзы и усилитель для датчика, обеспечивающие точность измерений не хуже $\pm 5\%$. С помощью этих приборов были проверены расчётные зависимости пиковой напряжённости магнитного поля от начального напряжения на ёмкостях источника питания.

Ключевые слова: магнитная линза, источник питания магнитной линзы, датчик напряжённости магнитного поля, измерительный усилитель, операционные усилители, колебательный контур, соленоид.

Оглавление

Введение.....	3
Теоретическое описание и расчёт параметров источника питания магнитной линзы	4
Теоретическое описание измерительного датчика.....	7
Теоретическое описание и расчет измерительного усилителя	8
Экспериментальная часть.....	11
Результаты работы	16
Приложение	17
Список литературы	18

Введение

Магнитная линза — это устройство, использующее магнитное поле для воздействия на пучок заряженных частиц (фокусировка, дефокусировка, отклонение, и прочее).

Целью работы являлось расчёт и создание эффективного источника питания для магнитных линз, разработка и создание устройства для измерения напряжённости магнитного поля, проведение практических измерений, и сравнение их с расчётными величинами. В данной работе рассматривается соленоидальная линза, представляющая собой, цилиндрическую катушку, которая создаёт сильное магнитное поле, взаимодействующее с летящими через катушку частицами (из-за краевых эффектов, магнитная составляющая силы Лоренца не равна нулю на концах соленоида). Регулировка силы воздействия на электронный пучок осуществляется настройкой тока в катушке. В мощных линзах величина электрического тока может достигать больших значений. В целях экономии электроэнергии, ток на катушку нужно подавать только в моменты пролёта пучка частиц. Для решений этой проблемы применяются импульсные источники питания, синхронизированные с пролётом пучка. В ходе выполнения этой работы был рассчитан и изготовлен источник питания, работающий по принципу ёмкостного накопителя.

Для проверки теоретических расчетов источника питания линзы требуется проводить практические измерения напряженности магнитного поля. Для этих целей был собран датчик, работающий по принципу электромагнитной индукции. Сигнал с датчика имеет низкое амплитудное значение напряжения и высокий уровень шумов. Для устранения этих проблем, был разработан и изготовлен усилитель, с изменяемым коэффициентом усиления, эффективно подавляющий синфазные, и высокочастотные помехи.

Теоретическое описание и расчёт параметров источника питания магнитной линзы

Источник питания, собранный в процессе выполнения работы, работает по принципу ёмкостного накопителя. Схема силовой части источника представлена на рисунке 1.

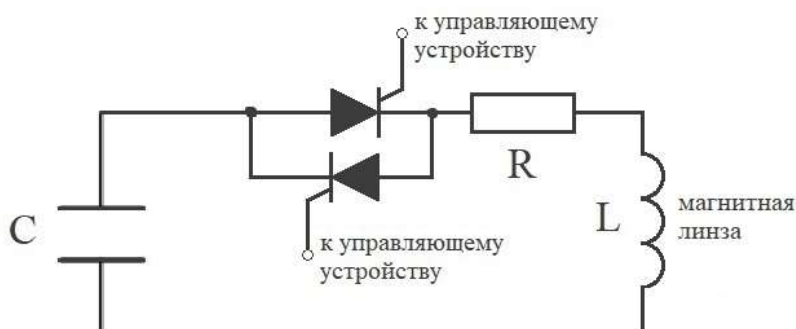


Рис. 1.

Силовая часть состоит из батареи конденсаторов и двух тиристоров. В ждущем режиме, внешнее зарядное устройство с высокой точностью поддерживает заданное напряжение на батарее ёмкостей. Батарея конденсаторов, вместе с линзой образует колебательный контур, и ток в линзе изменяется по косинусоидальному закону. Управляющая часть открывает тиристор раньше, чем момент пролёта пучка на время, равное четверти периода (так как ток максимален именно в момент $T/4$). Как только тиристор открывается, ёмкости разряжаются на линзу. Когда ток через тиристор становится равным нулю, тиристор автоматически закрывается. В этот момент пучок частиц уже пролетел через линзу. После такого рабочего хода, напряжение на емкости становится отрицательным, и для перезарядки обратно в положительную сторону управляющая часть открывает второй тиристор, происходит ещё один цикл, и напряжение становится положительным (из-за потерь оно будет ниже чем изначальное напряжение). После этих двух срабатываний, управляющая часть дозаряжает ёмкость до нужного напряжения, и установка переходит в ждущий режим, до следующего пролёта пучка.

Расчет параметров источника питания

Как было указано ранее, силовая часть представляет собой колебательный контур, колебания в котором описываются интегро-дифференциальным уравнением:

$$L \frac{\partial I}{\partial t} + RI + \frac{1}{C} \int I dt = 0, \quad (1)$$

где $q = \int I dt$, $\dot{q} = I$, $\ddot{q} = \frac{\partial I}{\partial t}$. В начальный момент заряд на конденсаторе равен CU , а ток нулю. Учитывая начальные условия, получаем задачу Коши:

$$\begin{cases} \frac{q}{LC} + \dot{q} \frac{R}{L} + \ddot{q} = 0 \\ q(0) = CU \\ \dot{q}(0) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Характеристическое уравнение:

$$\lambda^2 + 2\beta\lambda + \omega_0^2 = 0,$$

где $\beta = \frac{R}{2L}$ – коэффициент затухания, $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ – собственная частота колебаний. Решение характеристического уравнения:

$$\lambda = -\beta \pm i\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2},$$

где $\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} = \omega_1$ – реальная частота колебаний, измеренная осциллографом. Решение задачи (2) будем искать в виде:

$$q(t) = q_0 \exp\left(-\frac{R}{2L}t\right) \sin(\omega_1 t + \varphi),$$

$$I = \dot{q}(t) = q_0 \exp\left(-\frac{R}{2L}t\right) \left(-\frac{R}{2L} \sin(\omega_1 t + \varphi) + \omega_1 \cos(\omega_1 t + \varphi)\right).$$

Из начальных условий вычисляются φ и q_0 :

$$\varphi = \arctg\left(\frac{2\omega_1 L}{R}\right), \quad q_0 = CU \sin\left(\arctg\left(\frac{2\omega_1 L}{R}\right)\right).$$

Зависимость тока от времени:

$$I(t) = CU \sin \left(\arctg \left(\frac{2\omega_1 L}{R} \right) \right) e^{-\frac{R}{2L} t} \left[-\frac{R}{2L} \sin \left(\omega_1 t + \arctg \left(\frac{2\omega_1 L}{R} \right) \right) + \right. \quad (3)$$

$$\left. \omega_1 \cos \left(\omega_1 t + \arctg \left(\frac{2\omega_1 L}{R} \right) \right) \right].$$

Из ёмкости, измеренных реальной частоты колебаний и активного сопротивления выражается индуктивность линзы:

$$L = \frac{-\frac{R^2}{2}}{-\frac{1}{C} - \sqrt{\frac{1}{C^2} - 4R^2\pi^2 f^2}}.$$

Максимальное значение тока в индуктивности будет в момент времени, когда напряжение на конденсаторе обратится в ноль. Это произойдет в $T/4$ (четверть периода). Вычислив период контура с выбранной ёмкостью и подставляя $T/4$, индуктивность, сопротивление потерь и значение ёмкости в выражение (3) получим линейную зависимость пикового тока от начального напряжения:

$$I_{max} = K_1 * U, \quad (4)$$

$$\text{где } K_1 = C \sin \left(\arctg \left(\frac{2\omega_1 L}{R} \right) \right) e^{-\frac{R}{2L} \left(\frac{\pi}{2} \right)} \left[-\frac{R}{2L} \sin \left(\frac{\pi}{2} + \arctg \left(\frac{2\omega_1 L}{R} \right) \right) + \omega_1 \cos \left(\frac{\pi}{2} + \arctg \left(\frac{2\omega_1 L}{R} \right) \right) \right].$$

Далее проводятся расчёты для напряженности магнитного поля.

Поле на оси катушки конечного размера получается суммированием вклада в поле от каждого кругового витка. Чтобы получить выражение для индукции магнитного поля в любой точке на оси конечного соленоида необходимо воспользоваться законом Био-Савара-Лапласа, который при интегрировании по углам (см. рис. 2.) приводит к выражению:

$$B = \frac{1}{2} \mu_0 I n (\cos(\alpha_1) - \cos(\alpha_2)). \quad (5)$$

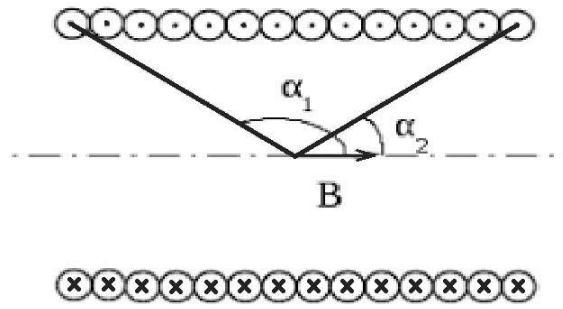


Рис. 2.

Подставив в (5) углы для точки в центре, получим выражение напряженности магнитного поля в центре соленоида конечных размеров:

$$B = \frac{\mu\mu_0 n I l}{\sqrt{4r^2 + l^2}} = \frac{\mu\mu_0 N I}{\sqrt{4r^2 + l^2}}. \quad (6)$$

Из выражений (4) и (6) определяется нужное напряжение на ёмкостях:

$$U = \frac{B\sqrt{4r^2 + l^2}}{\mu\mu_0 N K_1}. \quad (7)$$

Теоретическое описание измерительного датчика

Собранный в данной работе датчик напряженности магнитного поля представляет собой короткий соленоид, малого диаметра. Из-за малых линейных размеров датчика, поле внутри него практически однородно, и датчик можно считать точечным. По закону Фарадея, при изменении потока магнитного поля через контур, в нём наведётся ЭДС. Для соленоида с N витками:

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt} = -NS \frac{dB}{dt}.$$

Получаем, что измеренное напряжение пропорционально производной поля по времени. Тогда напряженность магнитного поля определяется:

$$B = -\frac{1}{NS} \int_{t_1}^{t_2} \varepsilon(t) dt.$$

Для оценки необходимого количества витков в датчике можно пренебречь затуханиями и считать поток как $\phi = NSB_{max} \sin(\omega_1 t)$. Тогда максимальное значение наведённой ЭДС: $\varepsilon_{max} = NBS\omega_1$. Диаметр измерительной

катушки равен 14,65мм, тогда для получения амплитуды напряжения на датчике в 1 вольт при поле 0,2 Тесла необходимо около 24 витков. Для итогового количества витков полученное чисто округленно с запасом до 30 витков.

Теоретическое описание и расчет измерительного усилителя

Сигнал с датчика имеет высокий уровень помех, которые нужно отфильтровать. Как было указано выше, напряжённость магнитного поля является интегралом от сигнала датчика, поэтому для удобства измерения, сигнал необходимо проинтегрировать. Для этих целей был разработан и изготовлен измерительный усилитель на операционных усилителях (ОУ), схема которого представлена на рисунке 3 (более крупно в приложении).

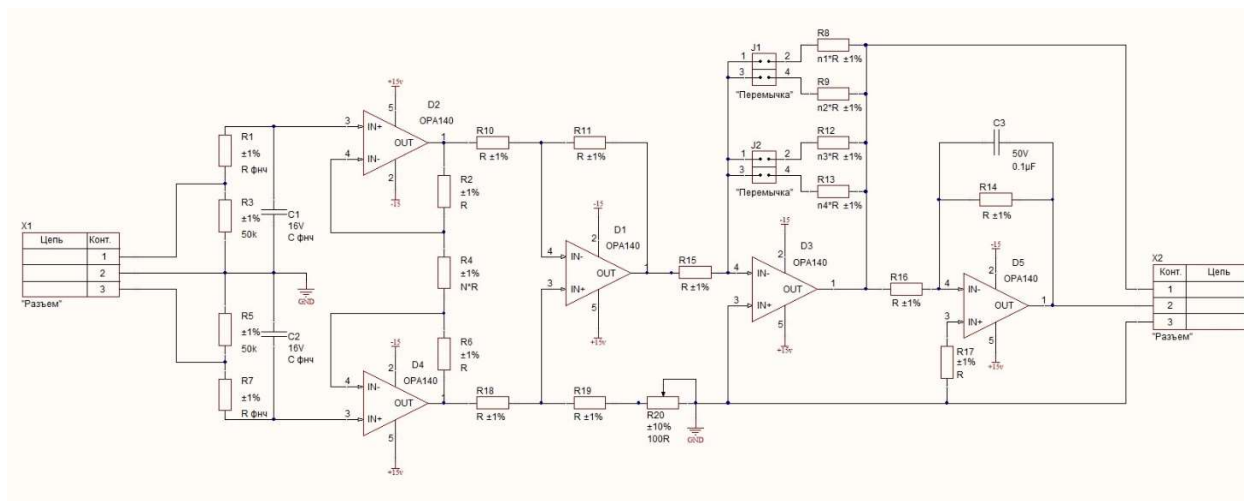


Рис. 3. Схема измерительного усилителя

Дифференциальный сигнал с измерительной катушки подаётся на входной разъём X1. Первыми на пути сигнала стоят RC фильтры, образованные R1C1 и R7C2, которые нужны для фильтрации высокочастотных помех. Далее сигнал попадает на буферный каскад, собранный на D2 и D4, необходимый для обеспечения одинакового высокого входного сопротивления для обоих входов, и выбора коэффициента усиления всего одним резистором R4.

Вычисление коэффициента усиления первого каскада (D2, D4)

Пусть к неинвертирующему входу D2 приложено напряжение U_1 , а к неинвертирующему входу D4 приложено напряжение U_2 . Для идеальных ОУ

(для расчета усилителя ОУ можно считать идеальными) разности напряжений на инвертирующем и неинвертирующем входах равна нулю, значит через резистор R4 протекает ток $I = \frac{U_1 - U_2}{R_4}$. Этот же ток протекает через одинаковые резисторы R2 и R6, значит выходное напряжение: $U_{\text{вых}} = (2R_2 + R_4)I = \frac{U_1 - U_2}{R_4} (2R_2 + R_4)$. Если сопротивление резистора R4 в N раз больше сопротивления каждого из резисторов R2 и R6, то коэффициент усиления этого каскада определяется как: $K_{\text{ус}} = \left(1 + \frac{2}{N}\right)$.

После прохождения буферного каскада сигнал попадает на дифференциальный усилитель, выполненный на ОУ D1. Этот каскад необходим для подавления синфазной помехи, которая неизбежно наводится на длинные провода, соединяющие датчик с усилителем.

Описание дифференциального каскада (D1)

Предположим, что на выходе D2 напряжение равно U_1 , а на выходе D4 равно нулю. Тогда каскад D1 является инвертирующим усилителем с коэффициентом усиления 1 (т.к. $R_{10} = R_{11}$). Пусть теперь напряжение на выходе D2 равно нулю, а на выходе D4 равно U_2 . Тогда это напряжение попадает на делитель, образованный R18 и R19+R20. Так, как $R_{18} = R_{19} + R_{20}$ на выходе делителя получается половина напряжения U_2 . Для этого напряжения каскад D1 является неинвертирующим усилителем, с коэффициентом усиления 1+1 (т.к. $R_{10} = R_{11}$). Получается, что если на выходах D2 и D4 напряжения равны U_1 и U_2 , то на выходе D1 напряжение будет равно $U_1 - U_2$. Переменный резистор R20 необходим для точной настройки подавления синфазного сигнала.

Третий каскад, выполненный на D3 является инвертирующим усилителем на ОУ и служит для удобной регулировки усиления сигнала (перемычкой можно выбирать различные значения резистора обратной связи). Необходимость настройки коэффициента усиления обуславливается тем, что в зависимости от величины напряженности измеряемого поля, амплитуда сигнала с

датчика может сильно варьироваться. Коэффициент усиления этого каскада равен отношению сопротивления выбранного резистора (R8, R9, R12, R13) к сопротивлению резистора R15.

Так как измеряемое магнитное поле пропорционально интегралу от напряжения на датчике, то в последнем каскаде реализован интегратор сигнала на ОУ D5. В процессе выполнения работы было принято решение реализовать интегрирующее устройство на ОУ. Такие интеграторы лишены основных недостатков RC интеграторов, а именно:

- сильное ослабление сигнала,
- высокое выходное сопротивление.

Описание каскада интегратора (D5)

Пусть на выходе D3 напряжение равняется $U_{\text{вх}}$, так как потенциалы на обоих входах ОУ всегда одинаковы, то через резистор R16 протекает ток $I_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{R_{15}}$. Такой же ток протекает через цепь обратной связи (конденсатор C3 с резистором R14). Тогда напряжение на выходе определяется следующим образом (в данном случае влиянием резистора R14 можно пренебречь):

$$\frac{U_{\text{вх}}}{R_{15}} = C_3 \frac{dU}{dt}, \quad U_{\text{вых}} = \frac{1}{R_{15}C_3} \int U_{\text{вх}} dt + \text{const.}$$

Параллельно конденсатору подключен резистор R14, сопротивление которого выбирается довольно большим, он служит для сброса со временем интегратора на нулевое значение. Стоит учесть неидеальность ОУ. Из-за ненулевого входного тока смещения на резисторе R15 будет падать дополнительное напряжение, что эквивалентно появлению дополнительного входного напряжения на интеграторе, что в свою очередь внесёт искажения (сдвиг) в итоговое выходное напряжение. Для решения этой проблемы на неинвертирующий вход ОУ подключают резистор R17, сопротивление которого выбирают рав-

ным $R_{17} = \left(\frac{1}{R_{14}} + \frac{1}{R_{15}} \right)^{-1}$. Исходя из предположения, что входные токи смещения обоих входов ОУ равны, это полностью компенсирует разность потенциалов между входами, а, следовательно, устраняет ошибку интегрирования, вызванную неидеальностью ОУ, но на практике из-за погрешности сопротивления резисторов, полностью устранить ошибку не удаётся, возможно только максимально ослабить влияние входных токов.

Экспериментальная часть

Для численных расчётов напряжения на батарее ёмкостей источника питания, требуемого для получения поля 0,2 Тл, необходимо измерить индуктивность магнитной линзы. Для этого был собран тестовый источник питания с ёмкостью 320 мкф. Измеренная осциллографом, частота колебаний составила:

$$\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} = 2\pi * 182.48 \text{ Гц.}$$

Из ёмкости, измеренных реальной частоты колебаний и активного сопротивления выражается индуктивность используемой линзы:

$$L = 2,372 * 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Дальнейшие расчёты приведены для вариантов установки с ёмкостями:

а) 1860 мкф и б) 3720 мкф. Периоды для таких контуров:

$$\text{а) } T = 0,013250 \text{ сек,} \quad (8)$$

$$\text{б) } T = 0,018812 \text{ сек.}$$

Подставляя $T/4$, индуктивность, сопротивление потерь и выбранное значение ёмкости в выражение (3) получим численные зависимости пикового тока от начального напряжения:

$$\text{а) } I_{max}(A) = 0,767 * U(B), \quad (9)$$

$$\text{б) } I_{max}(A) = 1,018 * U(B).$$

Параметры исследуемой линзы: радиус $r = 0,1325$ м, длина $l = 0,623$ м, количество витков $N = 196$. Подставляя эти данные в (6) получаем зависимость напряженности поля в центре линзы от тока:

$$B(\text{Тл}) = 3,63791 \cdot 10^{-4} \cdot I(\text{А}). \quad (10)$$

Из выражений (4) и (6) определяются зависимости напряженности магнитного поля в центре линзы, от напряжения на ёмкостях:

$$\text{а) } U(\text{В}) = 3583,48 \cdot B(\text{Тл}), \quad (11)$$

$$\text{б) } U(\text{В}) = 2697,59 \cdot B(\text{Тл}).$$

По техническому заданию требуется получить в линзе поле 0,2 Тл. На практике такое значение удаётся получить только при ёмкости 3720 мкф (вариант б). Для получения поля 0,2 Тл расчётное напряжение в случае б составляет 539,5 вольт.

Для изготовления датчика, в качестве каркаса, выбран длинный деревянный стержень, на конец которого была намотана измерительная катушка. Катушка имеет 30 витков эмалированного провода диаметром 0.67мм и намотана виток к витку.

Прототип усилителя был изготовлен на операционных усилителях tl072cp. Этот выбор обусловлен:

- высоким показателем скорости нарастания сигнала 13 В/мксек,
- входным каскадом, реализованным на jfet транзисторах, обеспечивающих высокое входное сопротивление,
- широкой доступностью.

При использовании этих ОУ величина R (резисторы с сопротивлением R на схеме) составляет 10кОм.

Входные RC фильтры, ограничивающие полосу пропускания, были изготовлены с частотой среза равной $f = \frac{1}{2\pi RC} = 8$ кГц.

Постоянный коэффициент усиления буферного каскада был выбран равным 5 ($N=0.5$; $R_4 = N * R = 5 \text{ кОм}$).

Ёмкость в цепи обратной связи ОУ интегратора была рассчитана, исходя из условия ненасыщения интегратора (амплитуда выходного сигнала меньше напряжения питания).

Для проверки пригодности использования собранного усилителя, для проведения измерений была измерена его амплитудно-частотная характеристика. Измерения производились при коэффициенте усиления каскада D3 равным 1. Результаты измерений представлены на рисунках 4 и 5.

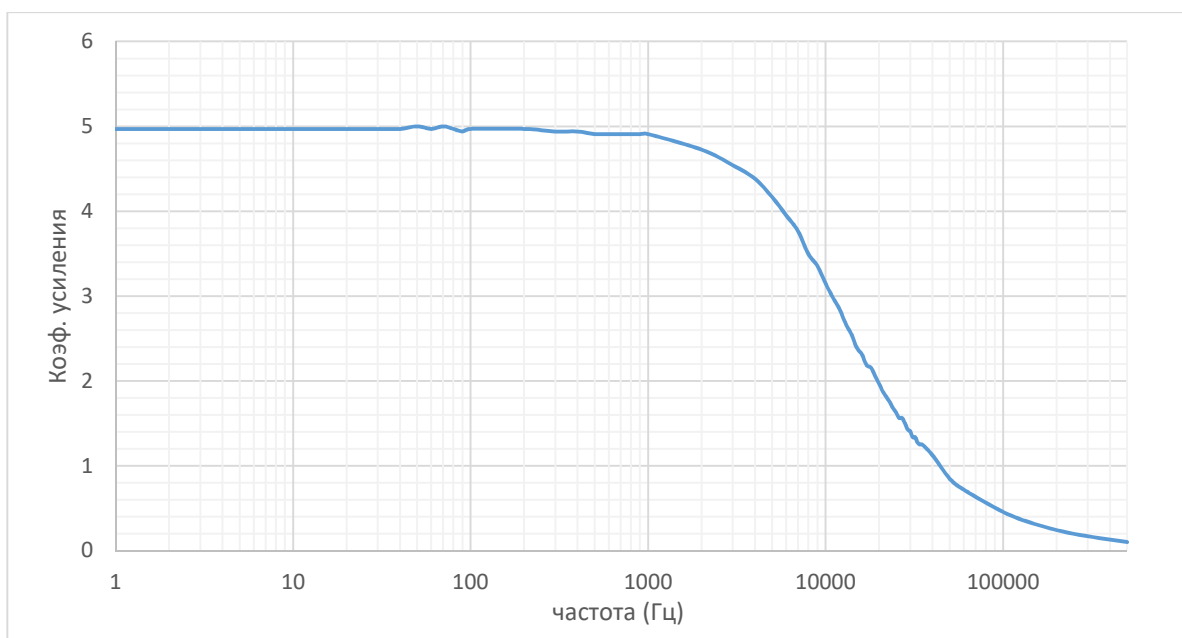


Рис. 4. Зависимость коэф. усиления от частоты

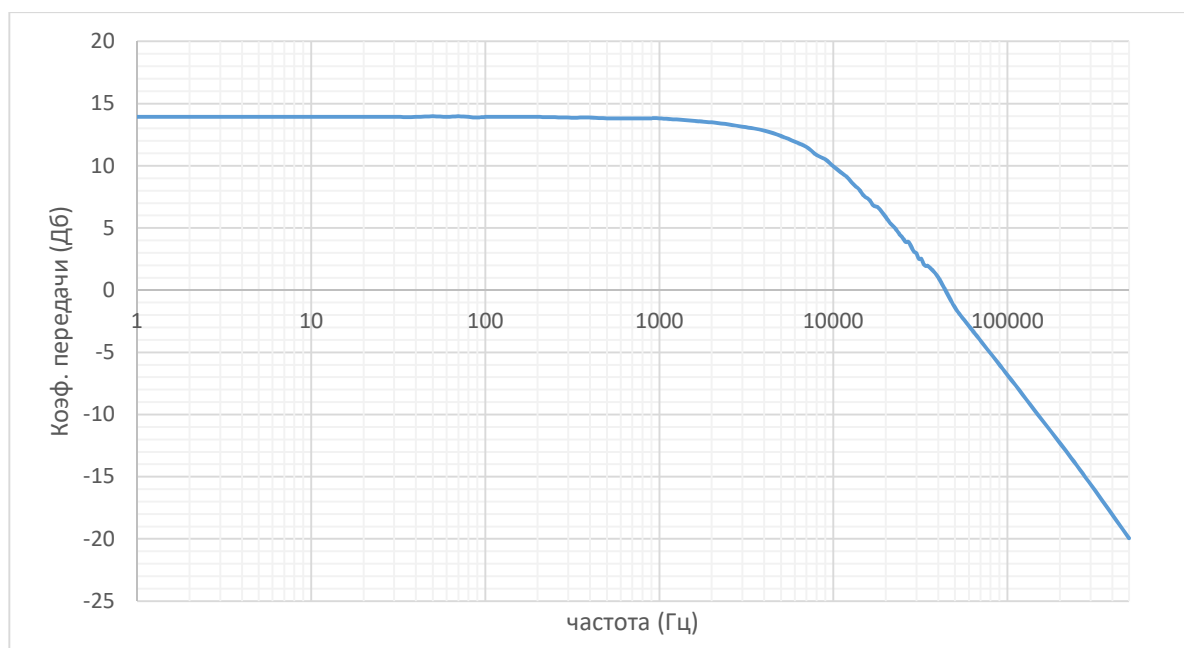


Рис. 5. АЧХ усилителя

Из полученных характеристик можно сделать вывод, что созданный усилитель подходит для проведения эксперимента, по измерению напряжённости магнитного поля, так как, в окрестности частоты измеряемого сигнала: а) $f \approx 53$ Гц и б) $f \approx 75$ Гц, он близок к идеальному усилителю.

При проведении основных замеров напряженности магнитного поля, датчик, с помощью деревянного стержня устанавливался ровно в центре линзы. Осциллографом снималась зависимость напряжения на батарее конденсаторов, показания усилителя и интегратора. На рисунке 6 приведена осциллограмма, снятая без усилителя, а на рисунке 7 с усилителем и интегратором.



Рис. 6.



Рис. 7.

Замеры проведены в случаях: а) $C=1860$ мкф и б) $C=3720$ мкф. По полученным значениям были построены графики зависимостей напряжённости магнитного поля в момент времени $T/4$, от начального напряжения батареи конденсаторов, представленные на рисунках 8 и 9.

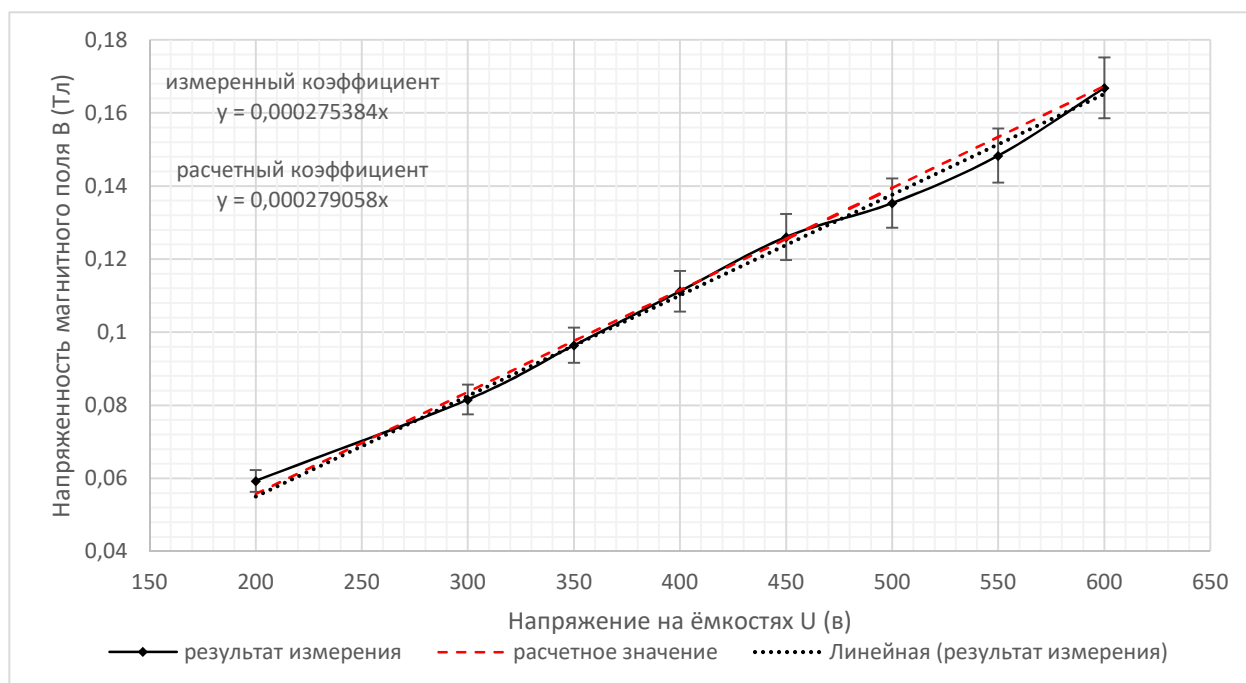


Рис. 8. Зависимость B от U при суммарной ёмкости 1860 мкф.

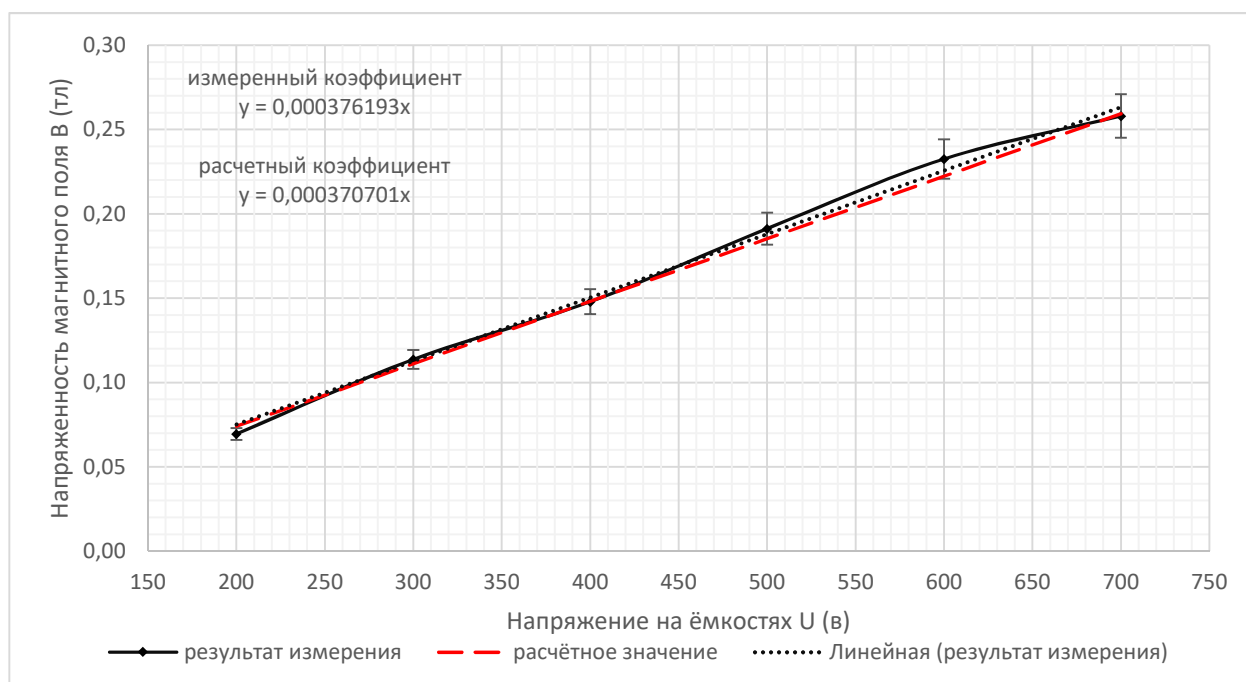


Рис. 9. Зависимость B от U при суммарной ёмкости 3720 мкф.

Из анализа, приведенных выше зависимостей можно сделать следующие выводы:

- Практические результаты измерений имеют расхождение с теоретическими значениями не более чем на 5 процентов.
- Теоретические расчёты источника питания магнитной линзы были выполнены верно, источник обеспечивает нужный ток в линзе, для получения поля 0,2 Тл, то есть отвечает необходимым требованиям.
- Изготовленные измерительные приборы (датчик и усилитель) отвечают требованиям поставленной задачи.

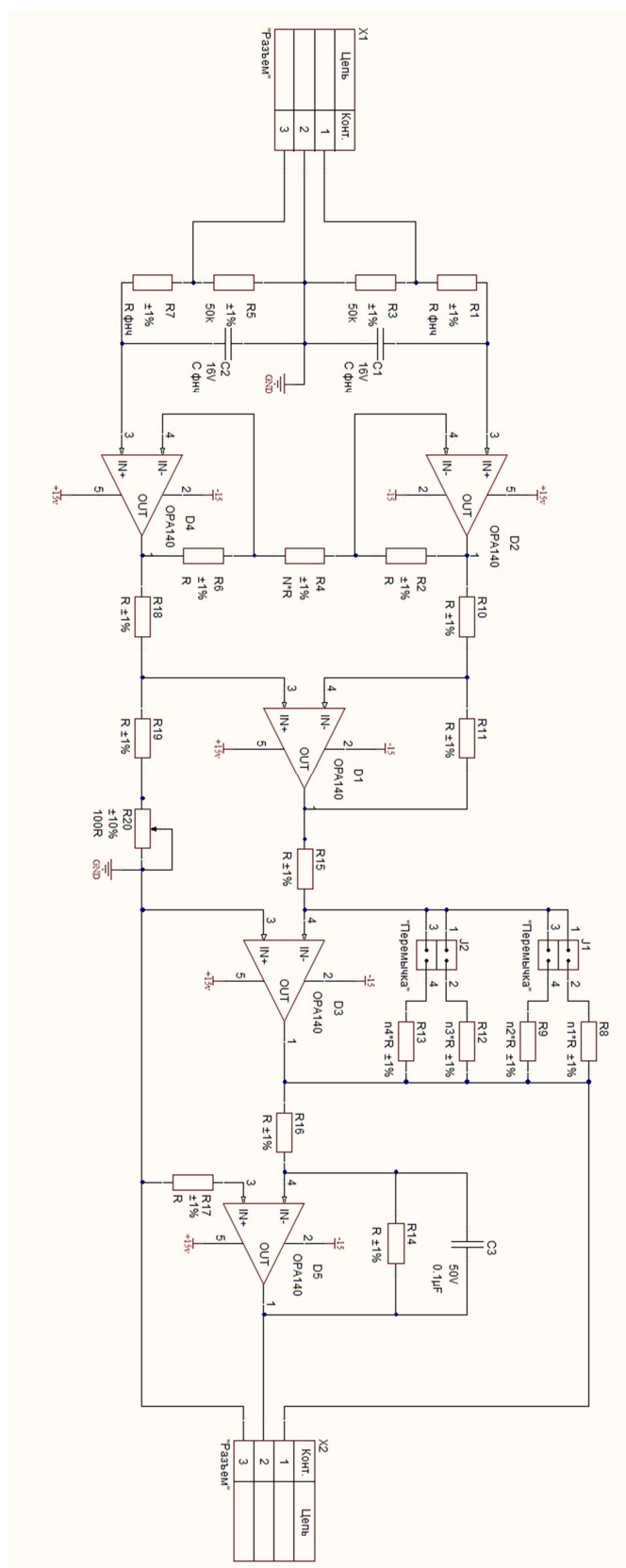
Результаты работы

В ходе выполнения курсовой работы были выполнены следующие задачи:

1. Рассчитан и собран источник питания магнитной линзы, работающий по принципу ёмкостного накопителя.
2. Изготовлен датчик напряжённости магнитного поля, работающий по принципу электромагнитной индукции Фарадея.
3. Были изучены основные принципы схемотехники устройств на ОУ. Используя эти принципы был рассчитан и изготовлен измерительный усилитель для датчика напряженности магнитного поля.
4. Измерены характеристики собранного усилителя, из анализа которых был сделан вывод о его пригодности для проведения измерений.
5. С помощью изготовленных измерительных приборов на практике были проверены расчетные характеристики источника питания магнитной линзы. В результате проверки был сделан вывод, что собранный источник полностью удовлетворяет требованиям поставленной задачи (получение поля 0,2 Тл в центре линзы).

Приложение

Рисунок 3 крупно.



Список литературы

- Сивухин Д. В. Общий курс физики, том III, электричество М.: Наука, 1977. – 704 с.
- Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. М.: Гардарики, 1999. – 638 с.
- Мищенко А. М. сборник задач по линейным электрическим цепям с кратким изложением теории. Новосибирск. Издательство НГУ. 2008 – 172 с.
- Ефимов И. П. операционные усилители и их применение: учебное пособие. – Ульяновск улГТУ, 2000. – 70 с.

