

УДК 53.082.743.4

ГАУССМЕТР С РАСШИРЕННЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ ДИАПАЗОНОМ

Климов А. А.

к.ф.-м.н., доцент

Российский технологический университет – МИРЭА

Москва, Россия

Ле Д. Н.

Магистрант

Российский технологический университет – МИРЭА

Москва, Россия

Аннотация: Данная статья посвящена разработке гауссметра с расширенным динамическим диапазоном. Авторы исследуют основные принципы работы устройства, включая эффект Холла и электромагнитную индукцию, а также описывают передовые технологии, способствующие расширению диапазона измерений и точности измерений. Авторы проектируют архитектуру гауссметра по методу Arcadia. Arcadia – метод модели-ориентированной системной инженерии, основанный на использовании моделей. Наконец, также проектируются и тестируются аппаратное и программное обеспечение гауссметра.

Ключевые слова: гауссметр, эффект Холла, метод Arcadia, операционный анализ, системный анализ, логическая архитектура, физическая архитектура, Labview, Capella.

GAUSSMETER WITH EXTENDED DYNAMIC RANGE

Klimov A. A.

Ph.D., Associate Professor

Russian Technological University - MIREA

Moscow, Russia

Le D. N.

Master's student

Russian Technological University - MIREA

Moscow, Russia

Abstract: This article is devoted to the development of a gaussmeter with an extended dynamic range. The authors investigate the basic principles of the device, including the Hall effect and electromagnetic induction, and describe advanced technologies that contribute to expanding the measurement range and measurement accuracy. The authors design the architecture of the gaussmeter using the Arcadia method. Arcadia is a model-based systems engineering method based on the use of models. Finally, the hardware and software of the gaussmeter are also designed and tested.

Keywords: gaussmeter, Hall effect, Arcadia method, operational analysis, system analysis, logic architecture, physical architecture, Labview, Capella.

Каждое вещество в природе обладает магнитными свойствами, но они проявляются по-разному, поэтому вещества делятся на сильномагнитные и слабомагнитные (немагнитные). Для изучения свойств материалов гауссметр является незаменимым прибором. Для того чтобы расширить диапазон измерения гауссметра, нам необходимо понять принцип работы датчика Холла. Датчик Холла основан на явлении Холла.

1. Эффект Холла

Эффект Холла наблюдается у металлов и полупроводников. У металлов и полупроводников n-типа, где носителями зарядов являются электроны, на нижней грани пластины скапливаются избыточные отрицательные заряды, а верхняя грань заряжается положительно (рис. 1). У полупроводников p-типа, где

носителями являются так называемые дырки, имеющие положительный заряд, нижняя грань заряжается положительно, а верхняя — отрицательно.

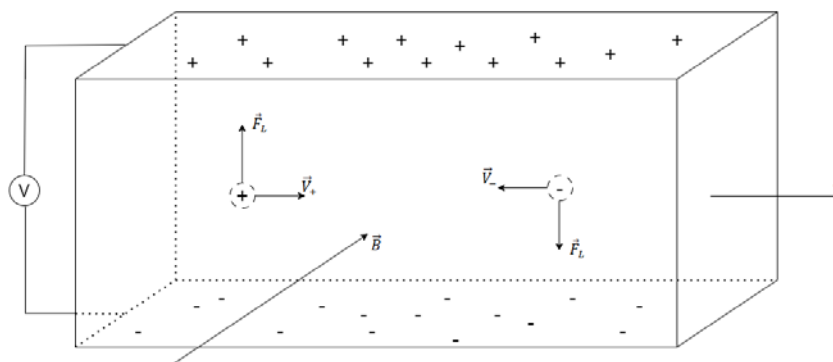


Рисунок 1 – Эффект Холла (составлено авторами)

Помещаем металлическую пластину, через которую течет ток $\vec{I}$, в магнитное поле $\vec{B}$, как показано на рисунке 1. У отрицательных зарядов вектор скорости $\vec{V}_-$ и ток $\vec{I}$ направлены в противоположные стороны, для положительных зарядов направления скорости $\vec{V}_+$ и тока $\vec{I}$ совпадают. Применяя правило винта, находим, что силы Лоренца, действующие на отрицательные и положительные заряды, противоположны по направлению. Поэтому две стороны металлической пластины заряжены противоположно и между ними возникает разность потенциалов.

Сила Лоренца равна:

$$F_L = qvB \quad (1)$$

Заряды, скопившиеся на верхней и нижней границах пластины, создают электрическое поле напряженностью E_x , которое в свою очередь воздействует на электрические заряды с силой

$$\vec{F}_x = q\vec{E}_x \quad (2)$$

Когда устанавливается стационарное распределение зарядов в поперечном сечении проводника, эти две силы уравниваются друг друга

$$F_x = F_L \quad (3)$$

То есть

$$qE_x = qvB \quad (4)$$

Откуда

$$E_x = vB \quad (5)$$

Из формулы для величины плотности тока $j = qnv$ находим скорость упорядоченного движения зарядов

$$v = \frac{j}{qn} \quad (6)$$

Таким образом, для напряженности поперечного (холловского) электрического поля получаем:

$$E_x = \frac{Bj}{qn} \quad (7)$$

Следовательно, при расстоянии между гранями пластины d разность потенциалов между ними равна:

$$U_x = E_x d = d \frac{Bj}{qn} = R_x djB \quad (8)$$

Где $R_x = \frac{1}{qn}$ — коэффициент пропорциональности, называемый постоянной Холла. Плотность носителей зарядов (электронов) в металле $n = 10^{28} \text{ м}^{-3}$ откуда $R_x = 10^{-9} \text{ м}^3/\text{Кл}$. Для наиболее распространенных полупроводников $R_x = 0.1 \text{ м}^3/\text{Кл}$.

Модуль плотности электрического тока можно выразить через силу тока dI , проходящего через поперечно ориентированную к движению носителей тока площадку площадью dS :

$$j = \frac{dI}{dS} \quad (9)$$

Если плотность электрического тока одинакова по сечению проводника, то плотности электрического тока:

$$j = \frac{I}{S} \quad (10)$$

где S — площадь поперечного сечения проводника.

Из формул (8) и (10) имеем разность потенциалов между гранями пластины равна:

$$U_x = \frac{R_x dBI}{S} \quad (11)$$

Индукция магнитного поля равна:

$$B = \frac{U_x S}{R_x dBI} \quad (12)$$

Измеряя напряжение между двумя концами датчика Холла, мы можем рассчитать значение индукции магнитного поля

2. Выбор решение

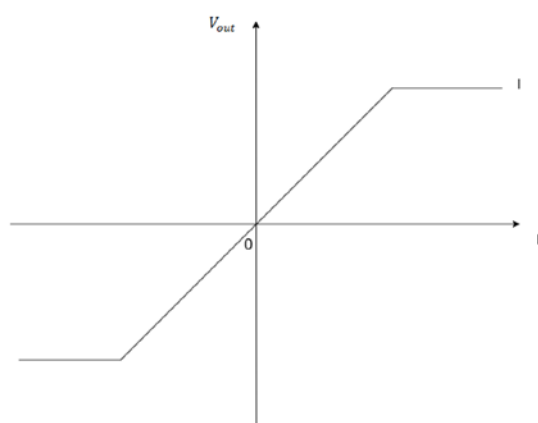


Рисунок 2 – Соотношение между выходным напряжением датчика Холла в магнитном поле и током I , протекающим через датчик (составлено авторами)

Теоретически, если подавать ну очень сильный магнитный поток на датчик Холла, то напряжение Холла будет бесконечно большим (рис. 2). Однако выходное напряжение будет лимитировано напряжением питания. То есть график будет выглядеть примерно как на рисунке 3.

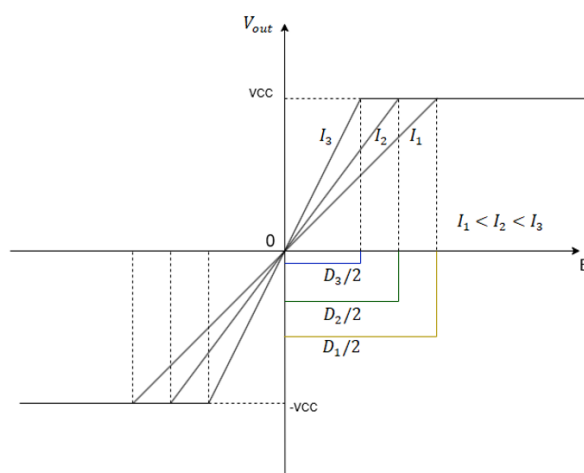


Рисунок 3 – Изменение диапазона измерения при изменении тока, протекающего через датчик (составлено авторами)

Изменяя проходящий через датчик ток, мы изменим диапазон его измерения. Поскольку ток через датчик пропорционален чувствительности датчика, чем меньше ток, тем меньше напряжение, генерируемое датчиком, и наоборот. При больших магнитных сигналах мы будем уменьшать ток, чтобы рабочая точка датчика не попадала в зону насыщения.

Диапазон измерения D_1, D_2, D_3 сможет меняться в зависимости от входного сигнала. Причина изменения диапазона измерений заключается в том, что точность измерения будет меняться вместе с диапазоном измерений. Чем уже диапазон измерения, тем выше точность, поскольку при той же напряженности магнитного поля выходное напряжение датчика будет больше и после прохождения через АЦП результат будет иметь более высокое разрешение.

3. Архитектурное решение по методу Arcadia

Метод модели-ориентированной системной инженерии ARCADIA (далее метод ARCADIA) определяет совокупность приемов и операций практической инженерной деятельности, ориентированных на разработку полного семейства взаимосвязанных моделей инженерной системы. [1]

Сначала мы анализируем заинтересованные стороны и их требования. Таблицы 1,2,3,4 представлены соответственно: заинтересованные стороны, проблемы, потребности, и требования заинтересованных сторон.

Таблица 1 – Заинтересованные стороны

ID	Заинтересованная сторона
St.01	Пользователь

Таблица 2 – Проблемы ЗС

ID	Проблема ЗС	Трассировка
StPr.01	Пользователь не может измерить сильные магнитные сигналы.	St.01
StPr.02	Пользователь не может изменить диапазон гауссметра для соответствия сигналу магнитного поля.	St.01
StPr.03	Пользователь не может интегрировать результаты измерений с другими блоками в программе Labview	St.01
StPr.04	Пользователь не может получить удаленный доступ к истории измерений	St.01

StPr.05	Пользователь трудно передвигаться из-за большого размера гауссметра	St.01
StPr.06	Пользователь сталкиваются с финансовыми ограничениями.	St.01

Таблица 3 – Потребности ЗС

Идентификатор	Потребность ЗС	Трассировка
StN.1	Пользователь хочет расширить диапазон измерения гауссметра	StPr.01
StN.2	Пользователь хочет изменить диапазон измерения гауссметра в соответствии с сигналом магнитного поля.	StPr.02
StN.3	Пользователь хочет интегрировать результаты измерений с другими блоками в программе Labview.	StPr.03
StN.4	Пользователь хочет получить удаленный доступ к истории измерений	StPr.04
StN.5	Пользователь хочет уменьшить размер гауссметра	StPr.05
StN.6	Пользователь хочет снизить стоимость производства гауссметра	StPr.06

Таблица 4 – Требования ЗС

Идентификатор	Требование ЗС	Трассировка
StR.1	Пользователю необходимо расширить диапазона измерения гауссметра	StN.1
StR.2	Пользователю необходимо изменить диапазон измерений.	StN.2
StR.3	Пользователям необходимо интегрировать результаты измерений с блоками обработки в программах Labview.	StN.3
StR.4	Пользователям необходимо удаленно просматривать историю измерений	StN.4

StR.5	Ползователю необходимо уменьшить размер гауссметра	StN.5
StR.6	Ползователю необходимо снизить стоимость гауссметра	StN.6

Мы определяем 3 возможности системы: измерение магнитного поля, сохранение результатов измерений, просмотр истории измерений (рис.4).

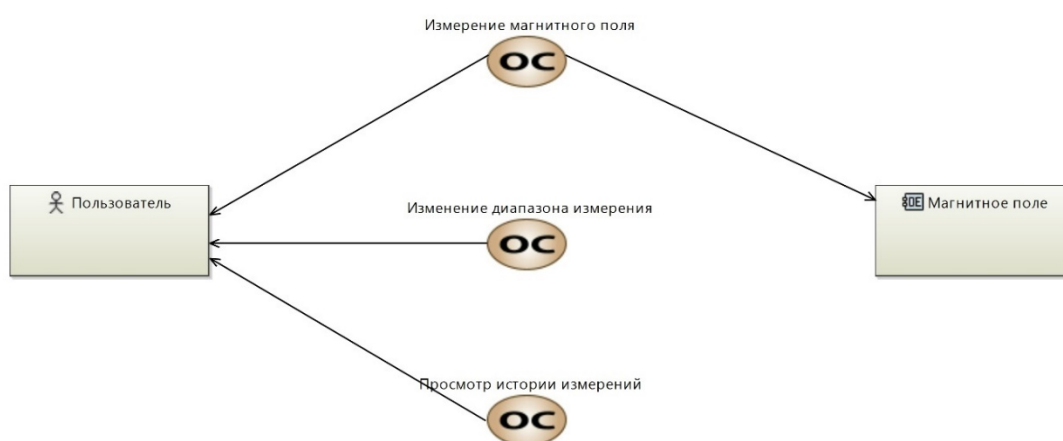


Рисунок 4 – Диаграмма операционных способностей (составлено авторами)

Операционная архитектура системы показывает взаимодействие между системой и внешними факторами. (рис. 5)

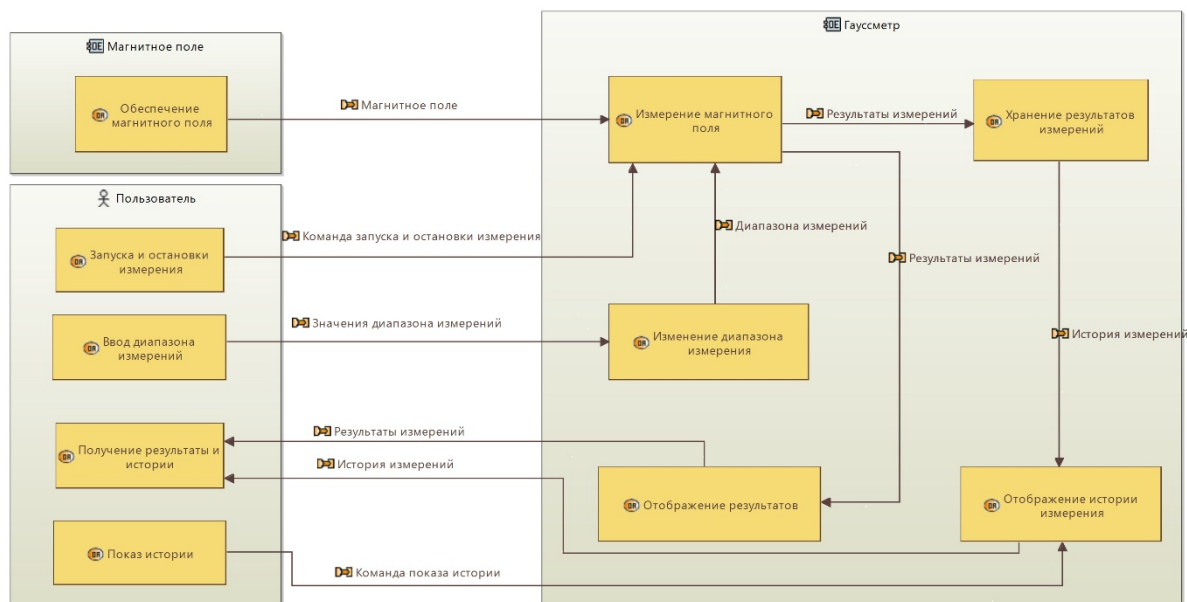


Рисунок 5 – Диаграмма операционной архитектуры (составлено авторами)

Уровень системного анализа требует ответа на следующие вопросы:

- Что должна делать система?
- Каким является внешний интерфейс системы? [3]

Эти вопросы проясняет диаграмма функциональной архитектуры. (рис. 6)

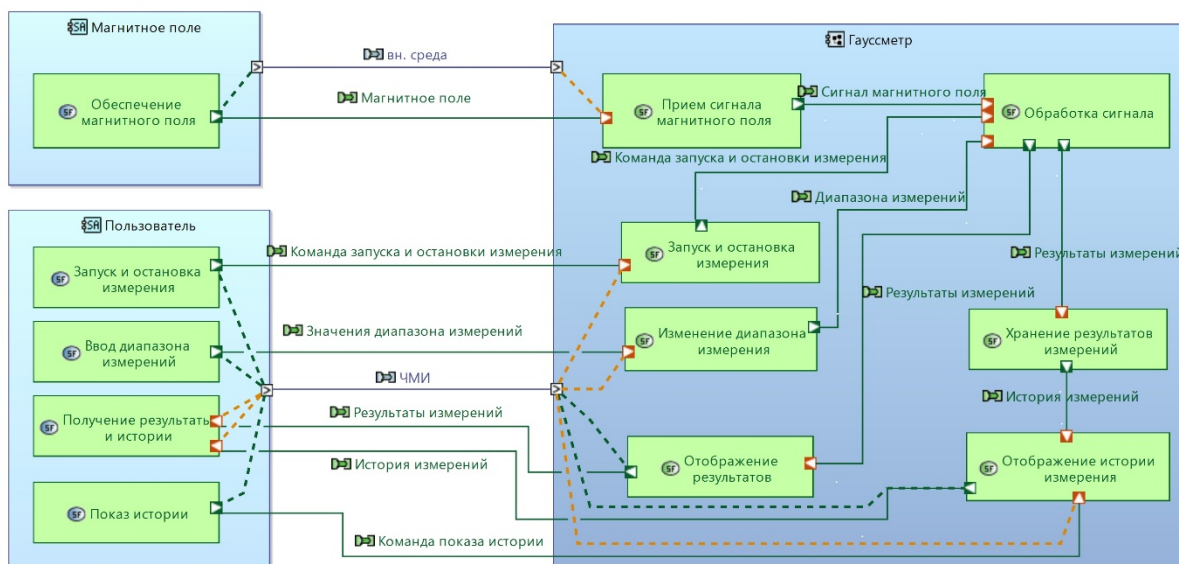


Рисунок 6 – Диаграмма функциональной архитектуры (составлено авторами)

Логическая архитектура начинает «приоткрывать ящик», чтобы идентифицировать структурные элементы, называемые логическими компонентами, а также их свойства и связи. (рис. 7)

Система имеет две подсистемы: подсистему обработки сигналов и подсистему отображения.

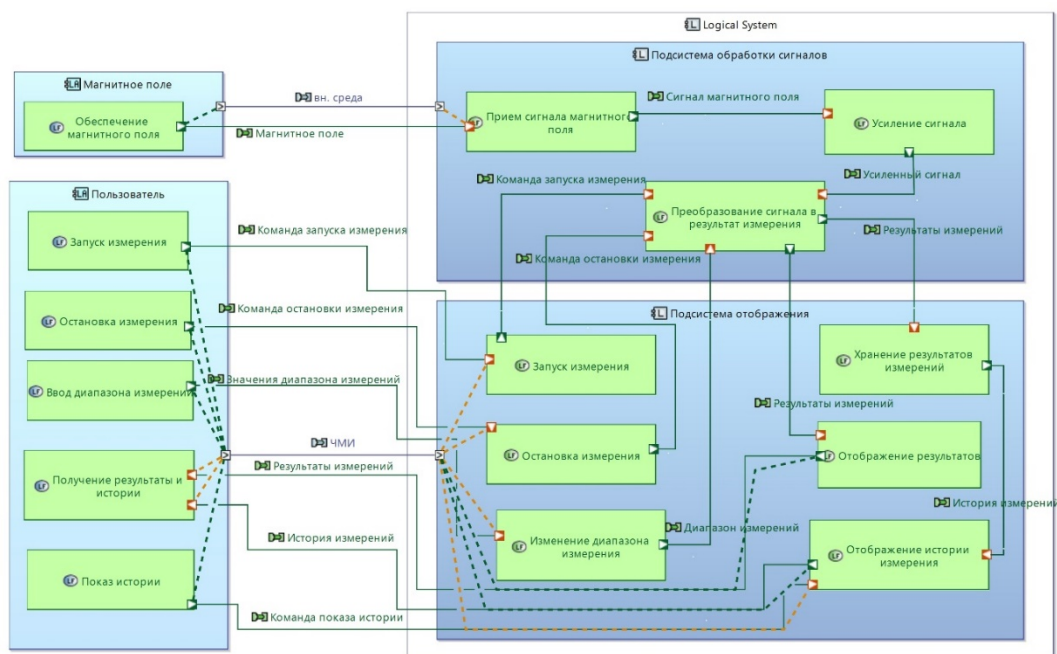


Рисунок 7 – Диаграмма логической архитектуры (составлено авторами)

Уровень физической архитектуры представляет собой уровень принятия инженерных решений, нижележащий по отношению к уровню логической архитектуры (рис. 8). На уровне физической архитектуры формируется представление инженеров о предполагаемой конструкции и материальном воплощении создаваемой систем. [1]

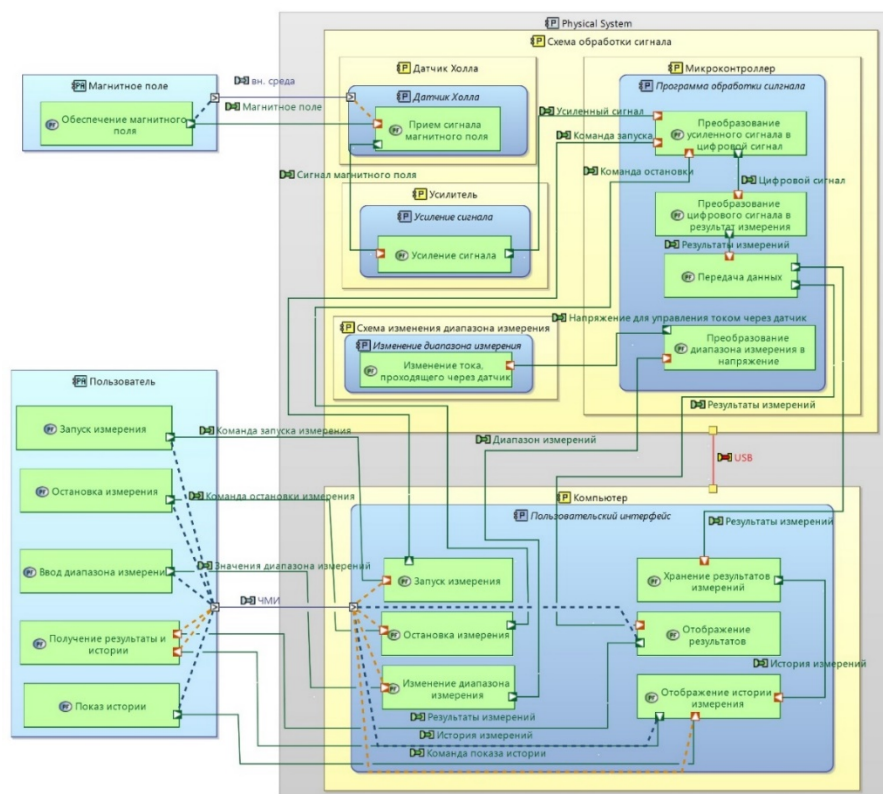


Рисунок 8 – Диаграмма физической архитектуры (составлено авторами)

4. Реализация системы

С точки зрения физической архитектуры система имеет 4 основных компонента: датчик Холла, усилитель, схему управления током, микроконтроллер.

4.1 Выбор датчика

Поскольку нам необходимо измерять большие магнитные поля, мы выбираем датчик Холла CYSJ3A, изготовленный из материала GaAs. Некоторые параметры этого датчика:

Таблица 5 – Параметры датчика CYSJ3A

Параметры	Значение
Макс. чувствительность (мВ/мТл)	0.96 ~ 1.44
Линейность	1.0%
Диапазон измерения	3 Т
Входное/выходное сопротивление (Ом)	1100 ~ 1450 / 1100 ~ 1450
Рабочая температура	-100°C ~ 200°C
Макс. ток питания	5 мА
Макс. Ток управления	4 мА

4.2 Усилитель

Для усиления сигнала с датчика мы используем операционный усилитель AD627 (рис. 9). Коэффициент усиления AD627 программируется резистором R_G или, точнее, любым сопротивлением R_G , возникающим между контактами 1 и 8. Коэффициент усиления устанавливается по формуле:

$$K = 5 + (200 \text{ k}\Omega / R_G) \quad (13)$$

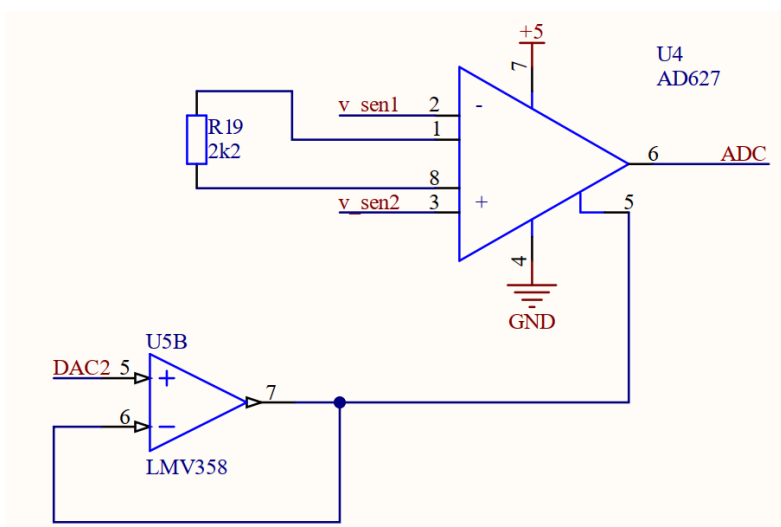


Рисунок 9 – Схема усилителя (составлено авторами)

4.3 Источник тока, управляемый напряжением

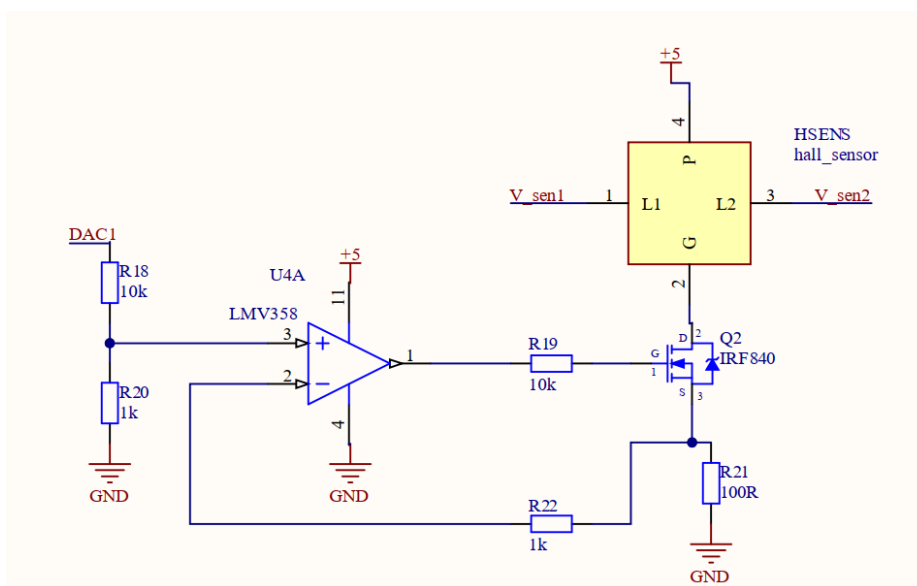


Рисунок 10 – Источник тока, управляемый напряжением (составлено авторами)

Напряжение на выводе 3 микросхемы операционного усилителя составляет (рис. 10):

$$U_{op-amp} = \frac{U_{DAC}}{10} = U_{R21} \quad (14)$$

Ток, проходящий через датчик, равен:

$$I_0 = \frac{U_{R21}}{R21} = \frac{U_{op-amp}}{100} = \frac{U_{DAC}}{1000} \quad (15)$$

4.4 Микроконтроллера

Для выбора микроконтроллера у нас есть следующие критерии:

- + Имеется как минимум 1 АЦП и 1 ЦАП.
- + Имеет встроенный АЦП и ЦАП не менее 12 бит
- + Имеет интерфейс UART для связи с компьютером
- + 16-битная или более высокая архитектура для обеспечения скорости и точности обработки.
- + Работает с напряжением 3 В или 5 В.

В этом проекте мы выбираем микроконтроллер STM32L151CBT6A.



Рисунок 11 – Печатная плата в программе Altium (составлено авторами)



Рисунок 12 – Реальное изображение гауссметра (составлено авторами)

На рисунке 11 показано изображение печатной платы, разработанное в программе Altium. На рисунке 12 — фактическое изображение гауссметра.

Пользователь может запускать и останавливать измерения, просматривать результаты измерений с течением времени, сохранять результаты измерений,

просматривать историю измерений и изменять диапазон измерений системы. (рис. 13)

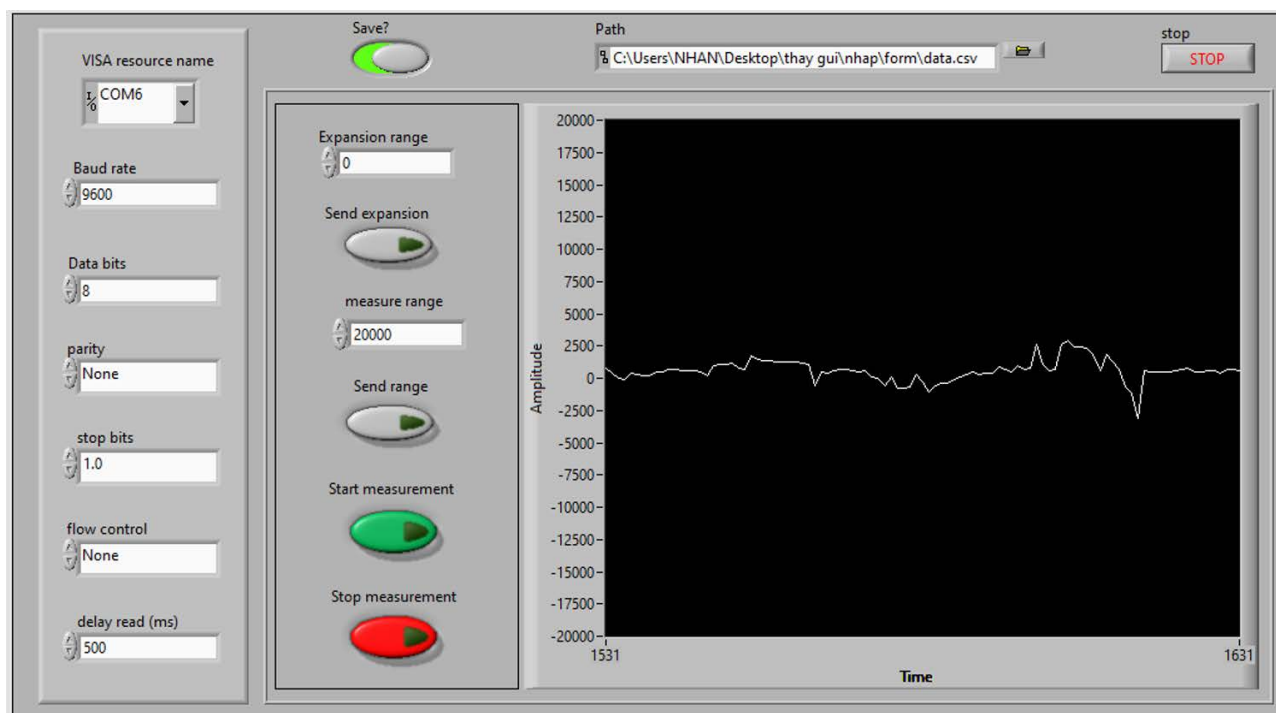


Рисунок 13 – Пользовательский интерфейс (составлено авторами)

В статье разработан гауссметр с расширенным динамическим диапазоном с использованием метода Arcadia. Этот метод помогает управлять требованиями заинтересованных сторон, функции системы соответствуют требованиям измерений более научным и эффективным способом.

Библиографический список:

1. Батоврин В.К. Моделе-ориентированная системная инженерия. Метод системной инженерии ARCADIA. Основные понятия. [Электронный ресурс]: Учебно-методическое пособие / Батоврин В.К. – М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2021. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

2. Гудыма Д.А.: Проектирование физической архитектуры систем с использованием средств модели-ориентированной системной инженерии. [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие / Гудыма Д.А. – М.: Российский технологический университет – МИРЭА, 2020 – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

3. Королев А.С.: Инструментарий модели-ориентированной системной инженерии. [Электронный ресурс]: учебное пособие / Королев А.С. – М.:

Российский технологический университет – МИРЭА, 2019 – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

4. Королев А.С.: Функциональный анализ систем с использованием средств модели-ориентированной системной инженерии. [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие / Королев А.С. – М.: Российский технологический университет – МИРЭА, 2020 – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

5. Королев А.С.: Инструментарий модели-ориентированной системной инженерии. [Электронный ресурс]: учебное пособие / Королев А.С. – М.: Российский технологический университет – МИРЭА, 2019 – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

6. Королев А.С.: Проектирование логической архитектуры систем с использованием средств модели-ориентированной системной инженерии. [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие / Королев А.С. – М.: Российский технологический университет – МИРЭА, 2020 – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

Оригинальность 79%