

Контрольно-измерительное устройство для управления магнитным полем катушек Гельмгольца

*Е.Н. Блажкова, В.В. Бадашев, П.В. Кременской, М.С. Чумаков, А.В. Реков,
О.Р. Сторчак*

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
им. М. И. Платова, Новочеркасск*

Аннотация: В данной статье рассмотрена разработка устройства калибровки магнитометра, которое управляется микроконтроллером, Arduino, способным принимать, обрабатывать и передавать необходимые команды периферийной части установки при помощи написанного кода программы. Необходимость буферных схем и элементов позволяет управлять устройствами ввода-вывода. С их помощью реализуются интерфейсные аппаратные средства. Были разработаны структурная и функциональная схемы устройства, а также проведен расчет параметров катушек Гельмгольца, построена их 3D-модель. С помощью гауссметра проведен натурный эксперимент, подтвердивший работоспособность устройства и его эффективность.

Ключевые слова: контрольно-измерительное устройство, индукция, катушки Гельмгольца, гауссметр.

Была спроектирована структурная схема контрольно-измерительного устройства для управления магнитным полем катушек Гельмгольца (рис. 1), состоящая из следующих блоков: три усилителя тока (УТ1, УТ2, УТ3); система катушек Гельмгольца; блок датчиков; измерительный блок; МП (микропроцессор) и блок USB, для подключения к компьютеру; ОГП – область генерируемого поля; УУ – устройство управления [1, 2]. Управляет работой всего устройства, а также формирует токи по 3-м осям; усилители тока (УТ1, УТ2, УТ3) – формируют выходные токи; система катушек Гельмгольца – создаёт трехмерное магнитное поле в пределах области генерируемого поля [3, 4]; датчик №1 – образцовый магнитометр, который измеряет трехмерное магнитное поле.

Разработка функциональной схемы контрольно-измерительного устройства (рисунок 2) производилась на базе структурной схемы.

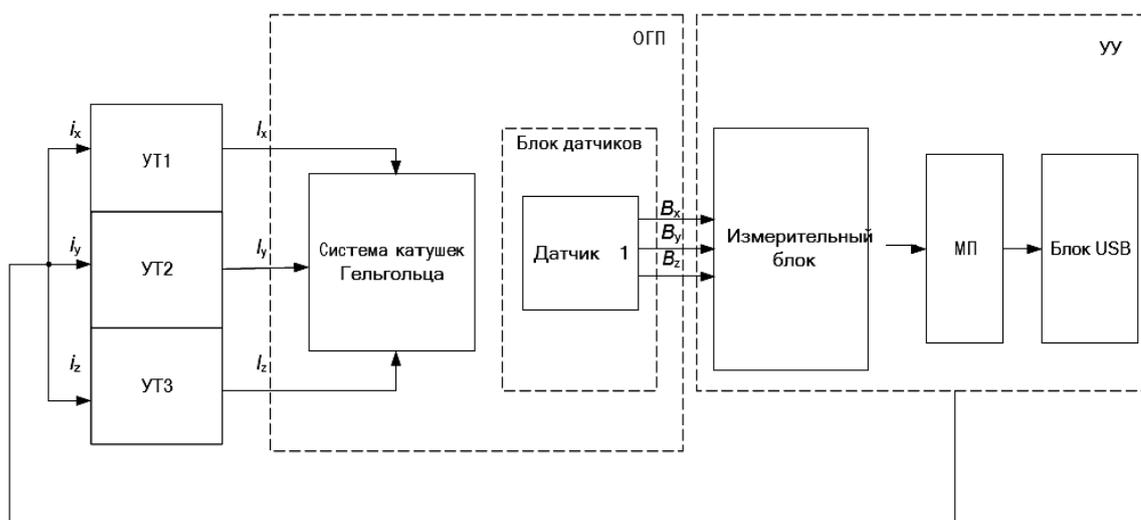


Рисунок 1. Структурная схема устройства

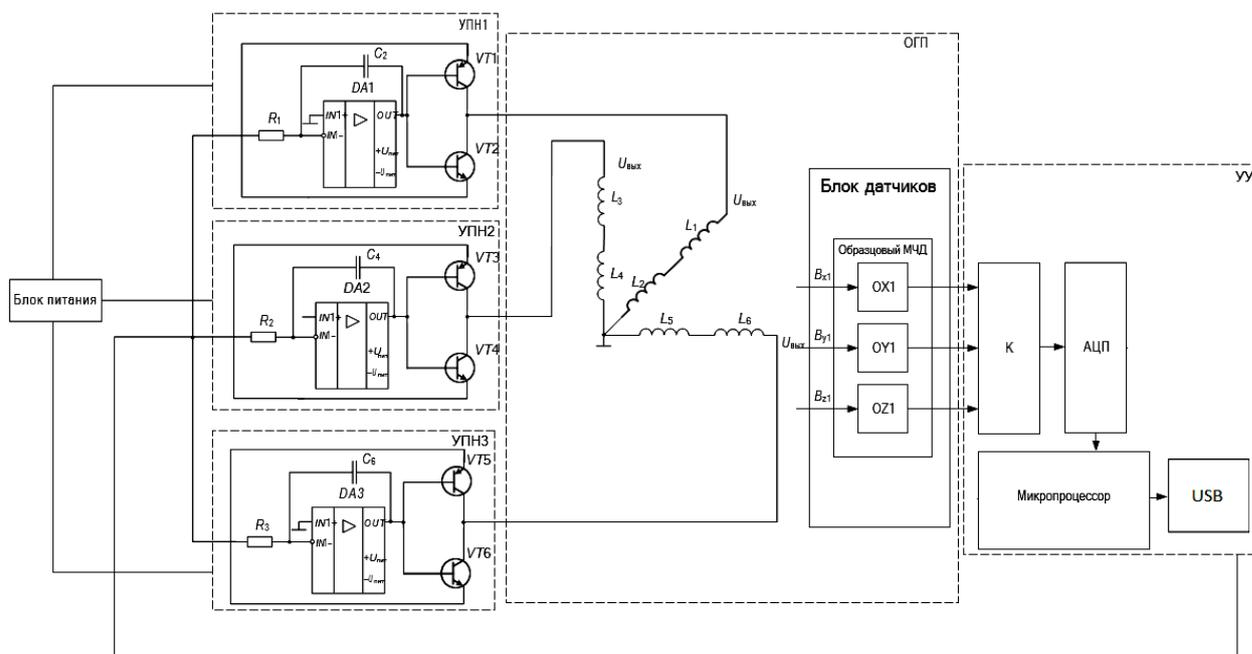


Рисунок 2. Функциональная схема устройства

На функциональной схеме представлены: усилители переменного напряжения и источники к ним; блок датчиков: образцовый магниточувствительный датчик МЧД; К – коммутатор; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; микропроцессор; интерфейс USB. Главную часть функциональной схемы составляет трехмерная система катушек Гельмгольца, которая представлена в виде трех пар катушек индуктивности. В центральную часть системы катушек Гельмгольца – область генерируемого

поля (ОГП) помещается образцовый датчик магнитного поля (3х-осевой магнитометр) [5, 6], который измеряет магнитное поле в 3-х направлениях: по осям OX, OY, OZ. С выхода устройства ввода-вывода на усилители тока поступает напряжение, пропорциональное току. С выхода усилителя тока ток поступает на катушки Гельмгольца. Через катушки протекает ток такой величины, что он компенсирует внешнее магнитное поле. Внутри катушек помещается калибруемый датчик, данные которого считываются аналогичным образом. Магнитное поле измеряется калибруемым датчиком. Измеренное магнитометром поле сравнивается с результатом измерений образцового датчика [7, 8].

Проведен расчет параметров катушек по следующим формулам [9, 10]. Плотность тока вычисляем по формуле:

$$j = \frac{I}{S} = \frac{I \cdot 4}{\pi \cdot d^2},$$

где j – плотность тока, А/мм²; I – ток, А; S – площадь поперечного сечения провода, мм²; d – толщина провода, мм.

Сопротивление провода вычисляем по формуле:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} = \rho \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot w \cdot 4}{\pi \cdot d^2},$$

где R – сопротивление провода, Ом; ρ – удельное сопротивление меди, $\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$; l – длина провода, м; r – радиус катушек, м; w – количество витков в паре катушек; d – толщина провода, мм.

Количество витков вычисляется по формуле:

$$w = \frac{a \cdot b \cdot k}{d^2},$$

где w – количество витков в паре катушек; a – глубина катушки, мм; b – ширина катушки, мм; k – коэффициент заполнения в пределах (0,5 ÷ 0,8), d – толщина провода, мм.

В таблице 1 приведены результаты расчетов параметров катушек.

Таблица 1 – Расчет параметров катушек Гельмгольца

№ пары	r , м	j , А/мм ²	a , мм	b , мм	k	w	R , Ом	S , мм ²	I , А	π	ρ , Ом·мм ² /м	d , мм
1	0,066	3,18	6	6	0,8	720	171	0,03	0,1	3,14	0,018	0,2
2	0,075	3,18	6	6	0,8	720	194	0,03	0,1	3,14	0,018	0,2
3	0,086	3,18	6	6	0,8	720	223	0,03	0,1	3,14	0,018	0,2

В ходе проведения расчетов, была спроектирована трехмерная модель системы катушек Гельмгольца (рисунок 3).

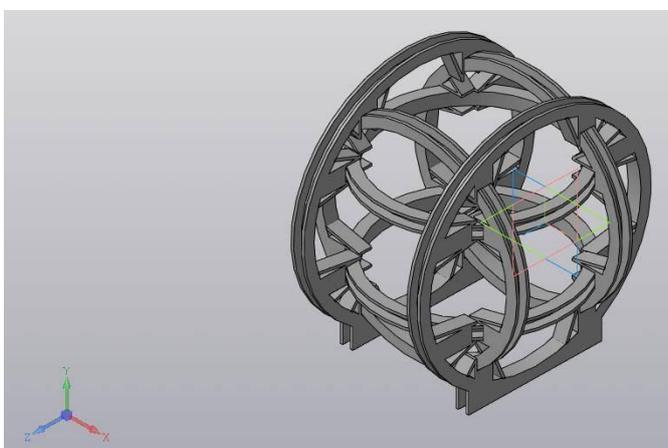


Рисунок 3. Модель системы катушек Гельмгольца

Из модели видно, что система катушек Гельмгольца позволяет задавать магнитное поле по трем осям: первая пара катушек меньшего радиуса $r = 0,066$ м задаёт магнитное поле по оси OX ; вторая пара катушек среднего радиуса $r = 0,075$ м задаёт магнитное поле по оси OY ; третья пара катушек большего радиуса $r = 0,086$ м задаёт магнитное поле по оси OZ .

Был проведен натурный эксперимент, заключающийся в измерении магнитного поля в каждой точке, изображенной на графике (рисунок 4) с помощью Гауссметра (Magnetic Instrumentation Model 2100 Gaussmeter). Магнитное поле генерирует выходное напряжение в датчике, пропорциональное произведению напряженности магнитного поля на индуцированный ток. Для более высоких значений напряженности магнитного поля это соотношение не является линейным, однако оно

автоматически компенсируется в измерительном устройстве.

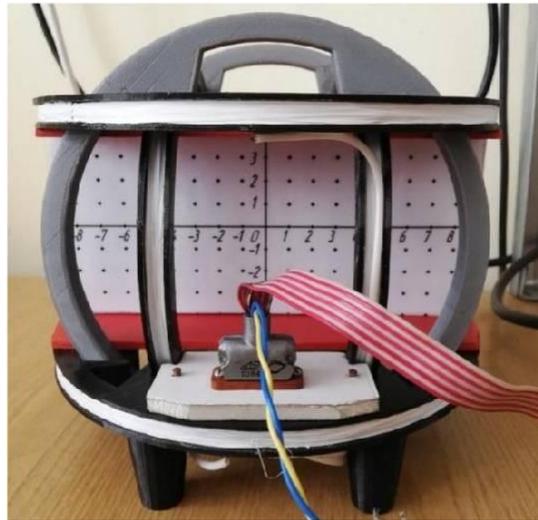


Рисунок 4. Катушки Гельмгольца с графиком распределения индукции

В таблице 2 представлены результаты измерения магнитного поля в каждой точке графика.

Таблица 2 – Результат измерений магнитного поля

-0,2269	-0,3739	-0,4189	-0,5406	-0,585	-0,538	-0,52	-0,506	-0,5019	-0,5257	-0,577	-0,5247	-0,4471	-0,3839	-0,2132
-0,2296	-0,3609	-0,4274	-0,5057	-0,5379	-0,5337	-0,5263	-0,5337	-0,5337	-0,5254	-0,5342	-0,5139	-0,5029	-0,3723	-0,2272
-0,2491	-0,3742	-0,4202	-0,4842	-0,5337	-0,5326	-0,5337	-0,5337	-0,5337	-0,5377	-0,5337	-0,5261	-0,4411	-0,3799	-0,2437
-0,2513	-0,3825	-0,4325	-0,4779	-0,5437	-0,5337	-0,5337	-0,526	-0,5337	-0,5337	-0,5228	-0,5127	-0,4642	-0,3672	-0,2576
-0,2506	-0,3866	-0,4421	-0,4911	-0,5337	-0,535	-0,5258	-0,5406	-0,5421	-0,5273	-0,5337	-0,487	-0,4666	-0,391	-0,2638
-0,2406	-0,3891	-0,4408	-0,5011	-0,5314	-0,5303	-0,5345	-0,5337	-0,5337	-0,5345	-0,5368	-0,5006	-0,447	-0,4113	-0,2719
-0,2281	-0,3685	-0,4357	-0,5349	-0,5602	-0,5307	-0,526	-0,5057	-0,532	-0,5542	-0,5428	-0,5745	-0,4461	-0,417	-0,2643

Выделенная область – область одинаковых значений. В неё помещался образцовый датчик, с целью измерения магнитного поля, создаваемого одной из пар катушек.

Эксперимент подтверждает работоспособность и эффективность контрольно-измерительного устройства для управления магнитным полем катушек Гельмгольца, погрешность формирования магнитного поля не превышает 0,5 %.

Литература

1. Nayyar A. and Puri V., A review of Arduino board's, Lilypad's & Arduino shields, 2016 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), 2016, pp. 1485-1492.

2. Amestica O.E., Melin P.E., Duran-Faundez C.R. and Lagos G.R., An Experimental Comparison of Arduino IDE Compatible Platforms for Digital Control and Data Acquisition Applications, 2019 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON), 2019, pp. 1-6.
 3. Saqib M., F. S. N. and F. J. N., Design and Development of Helmholtz Coils for Magnetic Field, 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), 2020, pp. 1-5.
 4. Alvarez A. F. R., Franco-Mejía E. and Pinedo-Jaramillo C. R., Study and Analysis of Magnetic Field Homogeneity of Square and Circular Helmholtz Coil Pairs: A Taylor Series Approximation, 2012 VI Andean Region International Conference, 2012, pp. 77-80.
 5. Игнатъев В.К., Невзоров А.А., Орлов А.А. Цифровой протонный магнитометр для измерения геомагнитного поля // Инженерный вестник Дона, 2012, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1274.
 6. Шихин А. Я. Автоматические магнитоизмерительные системы. – М.: Энергия, 1977. – 136 с.
 7. Sonehara M., Kamada H., Iida S. and Sato T., Characterization of Tunable Magnetic Sensor Using Bias Magnetic Field of a Hard Magnetic Film Magnetized by Pulsed-Magnetic Field, in IEEE Transactions on Magnetics, 2013, vol. 49, no. 7, pp. 3854-3857.
 8. Merah S. M. and Nadji B., Development and design of helmholtz coil for NBTI degradation studies, 2017 5th International Conference on Electrical Engineering - Boumerdes (ICEE-B), 2017, pp. 1-5.
 9. Chen X., Luo J. and Lin D., Analysis and Visualization of Magnetic Field for Multi-dimensional Helmholtz Coils Based on PEEC, 2021 IEEE 1st International Power Electronics and Application Symposium, 2021, pp. 1-7.
-

10. Badilita V., Kratt K., Burger T., Korvink J. G. and Wallrabe U., 3D high aspect ratio, MEMS integrated micro-solenoids and Helmholtz micro-coils, TRANSDUCERS 2009 - 2009 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, 2009, pp. 1106-1109.

References

1. Nayyar A. and Puri V., 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), 2016, pp. 1485-1492.
2. Amestica O. E., Melin P. E., Duran-Faundez C. R. and Lagos G. R., IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON), 2019, pp. 1-6.
3. Saqib M., F. S. N. and F. J. N., International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), 2020, pp. 1-5.
4. Alvarez A. F. R., Franco-Mejía E. and Pinedo-Jaramillo C. R., VI Andean Region International Conference, 2012, pp. 77-80.
5. Ignatev V.K., Nevzorov A.A., Orlov A.A. Inzhenernyj vestnik Don, 2012, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1274.
6. Shihin A. Ja. Avtomaticheskie magnitoizmeritel'nye sistemy [Automatic magneto-measuring systems]. M.: Jenergija, 1977. 136 p.
7. Sonehara M., Kamada H., Iida S. and Sato T., IEEE Transactions on Magnetics, 2013, vol. 49, no. 7, pp. 3854-3857.
8. Merah S. M. and Nadji B., 5th International Conference on Electrical Engineering - Boumerdes (ICEE-B), 2017, pp. 1-5.
9. Chen X., Luo J. and Lin D., IEEE 1st International Power Electronics and Application Symposium (PEAS), 2021, pp. 1-7.
10. Badilita V., Kratt K., Burger T., Korvink J. G. and Wallrabe U., TRANSDUCERS 2009 - 2009 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, 2009, pp. 1106-1109.