

Разработка информационной системы мониторинга электромагнитного поля металлургической печи

Е. А. Боронко^{1✉}, Е. И. Капостей¹, И. М. Новожилов²

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ egor.boronko@mail.ru

Аннотация. Цель статьи заключается в разработке макета информационной системы мониторинга электромагнитного поля металлургической печи, а также в демонстрации его работы. Система состоит из пространственно-распределенного датчика электромагнитного поля металлургической печи, в систему также входит программный код, обеспечивающий работу датчика и передачу данных прикладному приложению, и само приложение, разработанное в среде Embarcadero RAD Studio и осуществляющее прием данных, запись их в журнал показаний и построение на их основе 3D-графика. Решены следующие задачи: проанализированы объект исследования и технологический регламент; приведена демонстрация процесса мониторинга электромагнитного поля металлургической печи.

Ключевые слова: система мониторинга, электромагнитное поле, металлургическая печь, макет системы информационного мониторинга

Для цитирования: Боронко Е. А., Капостей Е. И., Новожилов И. М. Разработка информационной системы мониторинга электромагнитного поля металлургической печи // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 5. С. 33–48. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-5-33-48.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Development of an Information System for Monitoring the Electromagnetic Field of a Metallurgical Furnace

Е. А. Boronko^{1✉}, Е. I. Kapostey¹, I. M. Novozhilov²

¹ Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

² Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ egor.boronko@mail.ru

Abstract. The purpose of the work is to develop a layout of an information system for monitoring the electromagnetic field of a metallurgical furnace, as well as a demonstration of its operation. This system consists of a spatially distributed electromagnetic field sensor of a metallurgical furnace, the system also includes a program code that ensures the operation of the sensor and the transmission of data to the application, and the application itself, developed in the environment of Embarcadero RAD Studio and receiving data, recording them in the log of readings and building on their basis 3D graphics. The following tasks are solved in the work: the object of research and technological regulations are analyzed, and a demonstration of the process of monitoring the electromagnetic field of a metallurgical furnace is given.

Keywords: monitoring system, electromagnetic field, metallurgical furnace, layout of information monitoring system

For citation: Boronko E. A., Kapostey E. I., Novozhilov I. M. Development of an Information System for Monitoring the Electromagnetic Field of a Metallurgical Furnace // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 5. P. 33–48. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-5-33-48.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. В современном мире информационные системы мониторинга различных процессов играют немаловажную роль. Благодаря таким системам становится возможным внедрение систем автоматических и автоматизированных систем в различные сферы экономики, в том числе и в производственную область промышленной сферы. С помощью мониторинга осуществляется сбор информации для дальнейшей выработки решения на ее основе [1].

Также стоит отметить, что металлургия занимает ведущее место в мировой экономике, поэтому от состояния технического оснащения данной отрасли зависит не только ее продукция, но и состояние экономики в целом [2]. Именно поэтому необходимо совершенствовать различные процессы, протекающие при изготовлении продукции. Такое совершенствование возможно при реализации на предприятиях информационных систем мониторинга, с помощью которых осуществляется контроль необходимых параметров, от которых зависит качество изделий.

В металлургической отрасли широко применяются печи, один из видов которых подробно рассмотрен в данном исследовании, поскольку именно для него и создается информационная система мониторинга электромагнитного поля металлургической печи [3]. Металлургическая печь и является объектом исследования в данной статье.

Актуальность исследований обусловлена растущим спросом на изделия металлургической отрасли. Для удовлетворения спроса необходимо повысить эффективность производства и качество продукции, что и позволит сделать информационная система мониторинга электромагнитного поля металлургической печи.

Цель исследований состоит в разработке макета информационной системы мониторинга электромагнитного поля металлургической печи и демонстрации его работы.

Исходя из поставленной цели, решаются следующие задачи:

- анализ принципов индукционного нагрева и индукционной металлургической печи;
- выявление проблемы объекта исследования;

– разработка решения, основанного на аппаратно-программном средстве Arduino.

Описание принципа индукционного нагрева и принципа работы индукционной металлургической печи. Индукционный нагрев происходит по следующему принципу: энергия электромагнитного поля преобразуется в тепловую при ее поглощении нагреваемым объектом – проводником.

Индукционный нагрев осуществляется посредством электромагнитного поля, которое создает индуктор в установке – он представляет собой катушку с множеством витков. Изменяющееся во времени переменное магнитное поле индуктора, в свою очередь, возникает благодаря переменному электрическому току, проходящему по индуктору. Описанное в данном абзаце есть первое превращение энергии электромагнитного поля, характеризующееся уравнением Максвелла.

Объект, который необходимо нагреть, располагается внутри электромагнитного поля, т. е. внутри индуктора или рядом с ним. Изменяющийся во времени поток вектора магнитной индукции проходит через объект, индуцируя электрическое поле, электрические линии которого находятся в плоскости, перпендикулярной направлению магнитного потока, и замкнуты, иными словами электрическое поле является вихревым. Далее происходит второе превращение энергии электромагнитного поля: по закону Ома из-за возникшего электрического поля в объекте нагревания протекают вихревые токи [4].

И, наконец, в нагреваемом объекте происходит третье и последнее превращение энергии электрического поля в тепловую энергию. Данное превращение происходит посредством теплового рассеивания энергии, что и служит причиной нагревания объекта. Энергетическое соотношение данного превращения можно описать законом Джоуля–Ленца.

Представленные превращения энергии позволяют передавать энергию электричества от индуктора объекту нагревания без непосредственного контакта, используемого в печах сопротивления. Также стоит отметить, что индукционный нагрев позволяет повысить эффективность и ско-

рость нагревания объекта, поскольку тепло выделяется в самом объекте, в отличие от других металлургических агрегатов, в которых тепло передается от источника нагрева извне.

Существует два способа организации индукционных металлургических печей: с сердечником и без него. Их различия заключаются в конструкции и в свойствах эксплуатации. Такое разделение возможно благодаря тому, что на напряженность электрического поля в объекте нагревания воздействуют два фактора: значение магнитного потока и частота тока питания, т. е. частота изменений во времени магнитного потока, связанного с объектом [4].

Первый этап – это загрузка шихты в агрегат. Шихтой могут служить следующие материалы: стружка, бракованные изделия, лом, катоды, слитки.

Нередко перед загрузкой шихты возникает необходимость ее просушить. Такой процесс осуществляется при проблемах с влажностью материала. В отдельных случаях помимо сушки может потребоваться предварительный подогрев материала шихты до 200...300 °С. Данный процесс обеспечивает качественную сушку и облегчает плавление, одновременно повышая его производительность [5].

К загрузочному оборудованию относятся: захват, загрузочная корзина, вибрационный желоб, система разогрева катода.

Вслед за загрузкой идет этап плавления [5]. Получение металла высокого качества начинается с переплавки шихты, далее расплав необходимо подвергнуть легированию, процессу окисления или восстановления, а также удалению газов из полученного расплавленного металла. Главные процессы плавки, т. е. плавление, очищение и разливку металла, можно осуществить как в одной печи, так и в отдельных специальных агрегатах.

Благодаря тому, что существующие в настоящее время линии статического и непрерывного литья обладают высокими эксплуатационными показателями, а также отвечают повышенным требованиям металлургических характеристик, некоторые агрегаты для плавления и разливки металла становятся все более актуальными и получают более широкое применение. Основное преимущество данного процесса состоит в развитии будущих специализаций, а значит, в повышении эффективности и оптимизации конкретных узлов конструкции агрегата.

Следующий этап технологического процесса – перегрузка расплавленного металла. Воз-

можные варианты оборудования для осуществления данного этапа: ковш, желоб, качающаяся литниковая система [5].

Завершающим этапом становится разливка. В случае, когда разливка и плавка шихты осуществляются не с помощью одного и того же агрегата, то плавильный агрегат предназначен исключительно для плавления металла [5]. В дальнейшем линия разливочного производственного процесса выполняет следующие задачи:

- нагревание до температуры, необходимой для разливки;
- выдержка при определенной температуре и накопление металла;
- процесс уменьшения степени неоднородности распределения металла (гомогенизация);
- легирование и очищение;
- разливка и дозировка.

Устройство разливочных печей может быть сконструировано по-разному, конструкция зависит от применяемой технологии обработки. Печи можно разделить на два вида по способу разливки.

1. Разливка посредством перемещения агрегата:

- вращение;
- опрокидывание.

2. Разливка из неподвижной печи:

- подача под давлением;
- гравитационная разливка;
- заливка снизу вверх.

Проблемы объекта исследования. Проблематика индукционных печей достаточно глубока и требует особого внимания для определения основополагающих моментов для разработки информативной системы мониторинга электромагнитного поля. Данный раздел позволит лучше понять, для чего создается такая система, какие она преследует цели и какие решает задачи.

В настоящее время индукционные печи имеют следующие проблемы:

– неравномерный нагрев металла в рабочей зоне печи из-за неравномерного распределения электромагнитного поля [6];

– совершенствование технологической эффективности систем индукционной плавки посредством регулирования параметров электромагнитного поля в рабочих объемах индукционных печей и его силового воздействия на расплав металла [6];

– взаимное влияние электромагнитного и теплового полей во время индукционного нагрева;

– малый ресурс эксплуатации тигля. Для снижения потерь энергии, передаваемой от электро-

магнитного поля индуктора металлу, тигель имеет небольшую толщину, что уменьшает запас его рабочих циклов. Помимо этого существует перепад температур между плавками, который сказывается на состоянии футеровки;

– низкая температура шлаков, так как их нагрев происходит не от индукционных токов, а непосредственно от расплава;

– высокая стоимость оборудования, однако необходимое оборудование компенсирует затраты высокой экономичностью и качеством работы [7].

Решение перечисленных проблем непосредственно связано с разработкой информационной системы мониторинга электромагнитного поля металлургической печи, поскольку контроль электромагнитного поля – это основной критерий их устранения.

Напряженность магнитного поля как измеряемый параметр информационной системы мониторинга. Основным параметром в разрабатываемой системе мониторинга – напряженность магнитного поля, поскольку именно по значениям данной величины, полученным от датчиков, мониторинг и осуществляется [8]. При внесении в зону действия датчиков постоянного магнита – источника магнитного поля – с помощью аппаратного комплекса под управлением программного кода, реализованного в среде Arduino IDE, происходит сбор данных с сенсоров, их структуризация и передача для организации дальнейшей работы информационной системы мониторинга прикладному приложению. Оно по полученным значениям обеспечивает наглядный графический вывод информации, позволяющий определить положение источника магнитного поля в пространстве.

Таким образом, зная напряженность магнитного поля в определенном месте пространства, можно установить, где находится источник такого поля относительно точки данного пространства.

То, как именно происходит работа датчиков интересующего нас поля, будет рассмотрено далее.

Эффект Холла, датчики эффекта Холла, их виды и применение. Итак, для того чтобы понять, как работают датчики электромагнитного поля, необходимо разобраться с эффектом Холла. Все началось еще в 1878 г., когда Эдвин Холл зафиксировал этот эффект в ходе опыта. В ходе эксперимента было обнаружено, что при пропускании магнитного потока через тонкую золотую

пластинку на краях пластины возникает разность потенциалов. Иными словами, если вдоль образца проходит электрический ток, а в перпендикулярной образцу плоскости появляется магнитное поле, то на боковых плоскостях пластины возникает разность потенциалов.

Используемые датчики магнитного поля действуют по принципу эффекта Холла, они выступают той самой пластиной, через которую пропускается ток и перпендикулярно которой действует магнитное поле.

Датчики могут быть цифровыми и аналоговыми. Первые позволяют определить лишь наличие или отсутствие магнитного поля и чаще всего используются для определения скорости вращения колес и валов, вторые позволяют определить напряженность поля, благодаря чему с их помощью можно определять положение объекта в пространстве. Также датчики магнитного поля делятся на униполярные и биполярные. Униполярные реагируют на наличие одного полюса магнита в зоне их действия, биполярные же – на оба полюса.

Область применения подобных датчиков достаточно широка, будь то определение скорости вращения чего-либо, определение положения объекта в пространстве или оценки открытия и закрытия клапана.

Теоретический обзор аппаратно-программного средства Arduino. В настоящее время существуют различные микроконтроллеры и платформы, организующие управление различными физическими процессами. К таким микроконтроллерам относится одноименный продукт фирмы «Arduino», которому присущи следующие преимущества: простая и интуитивно понятная среда программирования, низкая стоимость и различные платы расширения. Все это позволило продуктам «Arduino» завоевать популярность и укрепиться на рынке. Среди преподавателей и студентов такая популярность особенно заметна, поскольку благодаря доступности и преимуществам данный микроконтроллер может стать основным элементом для проведения различного рода исследований и разработки решений ряда задач [9].

В линейке микропроцессоров от «Arduino» существует достаточно устройств, позволяющих выбрать необходимое под конкретные задачи аппаратное средство, а также присутствуют и универсальные устройства [10]. У каждого из них

Табл. 1. Сравнение характеристик плат Arduino
 Tab. 1. Comparison of characteristics of Arduino boards

Плата Arduino	Микроконтроллер	Тактовая частота, МГц	Напряжение рабочее, В	Флеш-память, Кбайт	Цифровые пины	Выходы с ШИМ	Аналоговые пины
Uno	Atmega328	16	5	32	14	6	6
Leonardo	Atmega32u4	16	5	32	20	7	12
Nano	ATmega328	16	5	32	14	6	8
Mega	ATmega2560	16	5	256	54	14	16
Due	Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3	84	3.3	512	54	12	12
Mini	ATmega328	16	5	32	14	6	6
Micro	ATmega32u4	16	5	32	20	7	12
M0	Atmel SAMD21	48	3.3	256	20	12	6
LilyPad	ATmega328p	8	2.7...5.5	32	20	6	6

свои особенности, которые и позволяют подстраивать их под нужды разработчиков. В табл. 1 представлены различные платы Arduino с их техническими характеристиками.

Для работы платы Arduino необходимо обеспечить ее питанием от компьютера с помощью USB-кабеля либо организовать питание посредством адаптера AC/DC или батареи. Программа, управляющая работой платы, передается посредством того же USB-кабеля; данные, передаваемые контроллером, получают тем же путем. На рис. 1 представлен общий вид Arduino UNO, его характеристики указаны в табл. 1.

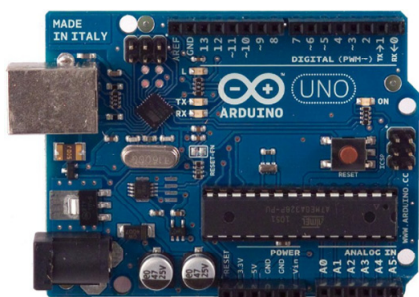


Рис. 1. Arduino UNO
 Fig. 1. Arduino UNO

Также к преимуществам данной аппаратно-программной платформы можно отнести полностью адаптированную среду разработки под конечного пользователя, которая позволяет работать как с оригинальными платами, так и с их клонами [11]. Стоит отметить, что лицензия на устройства и ПО бесплатна. Для РФ осуществлена полная локализация, что облегчает использование плат и позволяет преодолеть языковой барьер [9].

Программная среда разработки Arduino IDE использует язык C++ для программирования всех одноименных плат. Интерфейс данной среды включает в свою структуру встроенный текстовый редактор программного кода, панель инстру-

ментов, часто используемые команды, отображение текущего состояния, лога работы и конфигурации оборудования. К часто используемым инструментам данной части платформы относится «Монитор порта», назначение которого – вывод информации от аппаратной части. Разработанный в Arduino IDE код сначала компилируется в машинный, а потом загружается непосредственно в плату Arduino – так называемую аппаратную часть платформы.

Данная платформа хорошо подходит для образовательного процесса и реализации несложных систем благодаря ее обширному техническому оснащению и понятной в использовании программной среде. В зависимости от задач, решение которых необходимо реализовать на практике, разработчик выбирает наиболее подходящую для этого плату.

Начало разработки проекта. Подбор оборудования. Среди многих плат Arduino в системе мониторинга электромагнитного поля металлургической печи для реализации проекта была выбрана плата Arduino UNO, поскольку она обладает приемлемой ценой при своих технических характеристиках, позволяющих реализовать необходимую систему мониторинга.

Данная платформа разработана на базе микропроцессора Atmega328 с тактовой частотой 16 МГц, рабочим напряжением 5 В, флеш-памятью 32 Кбайт; имеет 14 цифровых входов/выходов, 6 из которых можно использовать в качестве широтно-импульсных (ШИМ) выходов, 6 аналоговых входов/выходов, силовой разъем, разъем USB-B для подключения к ПК, разъем ICSP и кнопку перезагрузки.

В качестве объекта для монтажа датчиков использована безопасная макетная плата Breadboard SYB-500 (рис. 2), обладающая 2400 контактами

для подключения периферии, на тыльной стороне макетной платы расположены 4 резиновые ножки, обеспечивающие устойчивое размещение платы и предотвращающие скольжение и передачу вибраций. Объект имеет размеры 20 × 24 см. Данная плата выбрана из-за ее устойчивости, размеров и количества контактов.

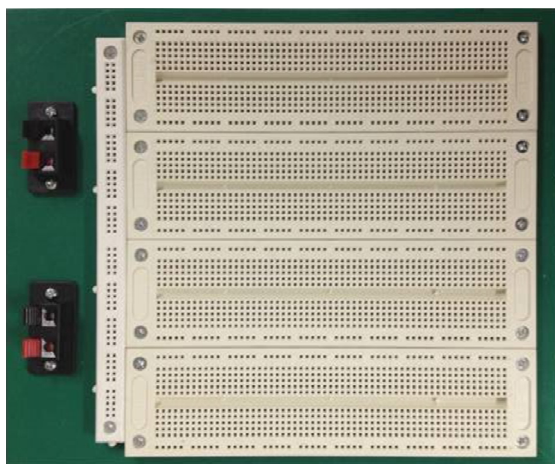


Рис. 2. Breadboard SYB-500
Fig. 2. Breadboard SYB-500

Еще одним монтажным элементом системы, обеспечивающим соединение всех компонентов электрической схемы, служит набор проводов «папа–папа» (рис. 3) длиной 10 и 30 см. Выбор данных проводов обусловлен расстоянием между элементами пространственно распределенного датчика электромагнитного поля, а также разъемами на концах проводника.



Рис. 3. Провода «папа–папа»
Fig. 3. Wires «dad–dad»

Для реализации информационной системы мониторинга электромагнитного поля были выбраны датчики SS49E (рис. 4), поскольку для корректной работы системы необходимы не цифровые датчики, определяющие только наличие или отсутствие магнитного поля, а аналоговые, преобразующие индукцию поля в напряжение, зависящее от полярности и силы магнита. Стоит от-

метить, что они работают по принципу эффекта Холла и относятся к достаточно бюджетным линейным датчикам. Данные устройства энергоэффективны из-за возможности низкого напряжения (2.7 В) постоянного тока и пониженного потребления тока (6 мА при 5 В). SS49E не требует наличия внешней фильтрации, поскольку он обладает низким уровнем шума. В состав устройства входят тонкопленочные резисторы, вследствие чего оно обладает повышенной температурной стабильностью и точностью.

Согласно технической документации данный датчик обладает рабочей температурой в диапазоне от –40 до +85 °С, чувствительностью от 1.4 до 1.75 Гс и погрешностью от –0.15 до 0.05 %/°С. В разработанной системе мониторинга задействованы 9 датчиков SS49E.



Рис. 4. Датчик SS49E
Fig. 4. SS49E sensor

Еще одним элементом системы является CD4051BE (рис. 5) – аналоговый мультиплексор на 8 каналов. С помощью данного устройства были расширены аналоговые порты платы Arduino UNO, поскольку она имеет всего 6 таких портов, а для разрабатываемой системы мониторинга необходимо 9 портов. Принцип работы заключается в следующем: при правильном подключении мультиплексора к питанию, заземлению, одному аналоговому контакту платы и трем цифровым можно добиться увеличения общего числа аналоговых портов на 7, поскольку 1 порт Arduino Uno задействуется на подключение CD4051BE. Однако сам мультиплексор имеет 8 аналоговых каналов для подключения периферии – какой именно из 8 новых портов будет задействован в нужный момент времени, задается программно. Устройство было выбрано из соображений количества аналоговых пинов, допускающих расширение.

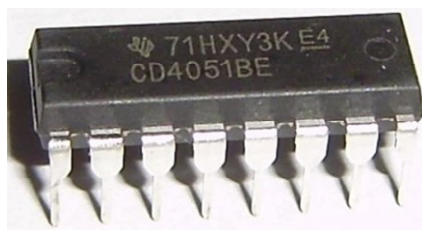


Рис. 5. Мультиплексор CD4051BE
Fig. 5. CD4051BE Multiplexer

В данном разделе представлены компоненты разрабатываемой информационной системы мониторинга электромагнитного поля и обоснован их выбор. Далее будет описана электрическая схема пространственно распределенного датчика электромагнитного поля.

Электрическая схема. С учетом подобранного оборудования для информационной системы мониторинга электромагнитного поля металлургической печи была разработана электрическая схема распределенного датчика (рис. 6).

Она позволяет монтировать оборудование для дальнейшей работы с ним, заключающейся в написании программного кода для функционирования разработанного устройства [12], [13].

Разработка макета и подключение оборудования. Здесь представлен монтаж компонентов

информационной системы мониторинга электромагнитного поля металлургической печи – пространственно распределенного датчика на беспаячной макетной плате.

Монтаж датчиков SS49E осуществляется согласно описанию назначения их контактов (рис. 7) из табл. 2.

Поскольку часть датчиков SS49E подключена непосредственно к плате Arduino, далее приведен пример монтажа (рис. 8) датчика без мультиплексора. Всего таким образом подключены 3 датчика.

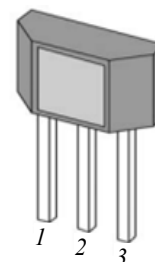


Рис. 7. Контакты SS49E
Fig. 7. SS49E contacts

Табл. 2. Описание контактов SS49E
Tab. 2. Description of SS49E contacts

Наименование	Номер	Описание
V_{dd}	1	Источник питания
Gnd	2	Заземление
Output	3	Выход

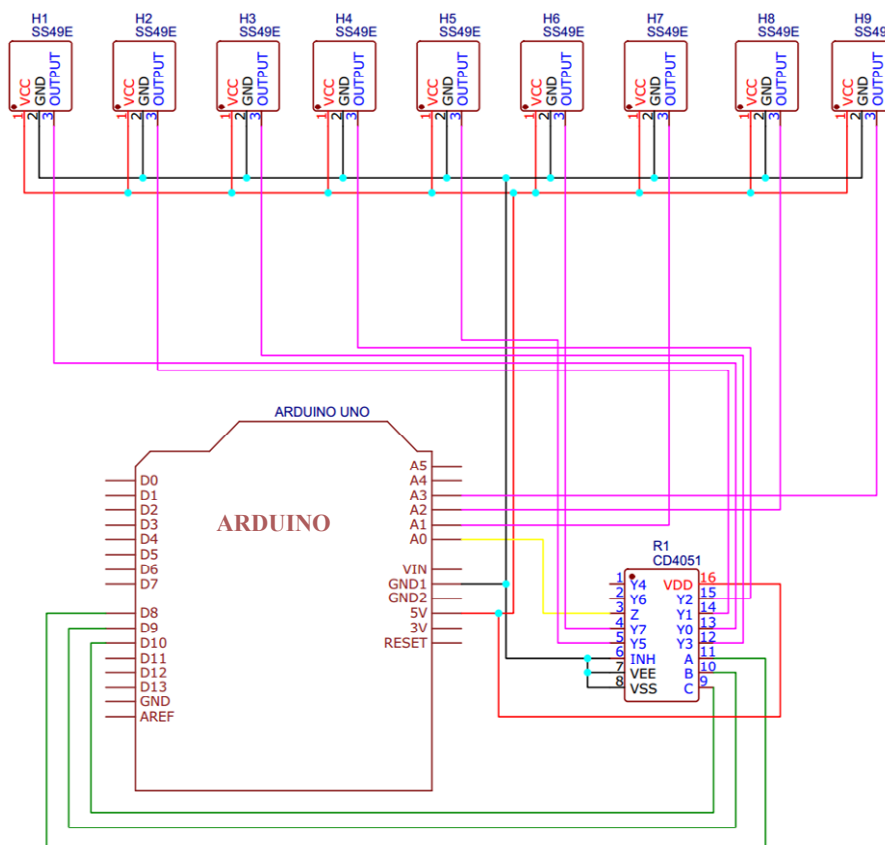


Рис. 6. Пространственно распределенный датчик электромагнитного поля
Fig. 6. Spatially distributed electromagnetic field sensor

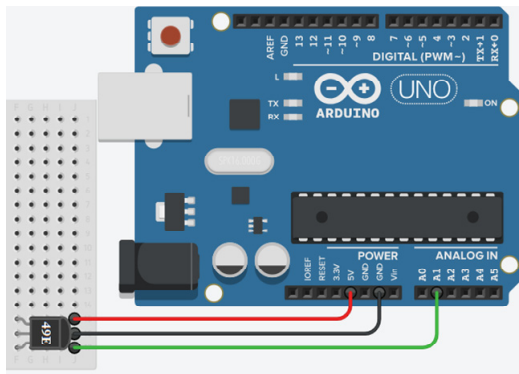


Рис. 8. Монтаж датчика SS49E
Fig. 8. Mounting the SS49E sensor

Согласно схеме подключения (рис. 9) осуществляется монтаж мультиплексора (рис. 10) в соответствии с назначением контактов, приведенных в табл. 3. Как уже говорилось ранее, использование данного устройства необходимо, поскольку на плате Arduino Uno недостаточное количество аналоговых пинов [14], [15].

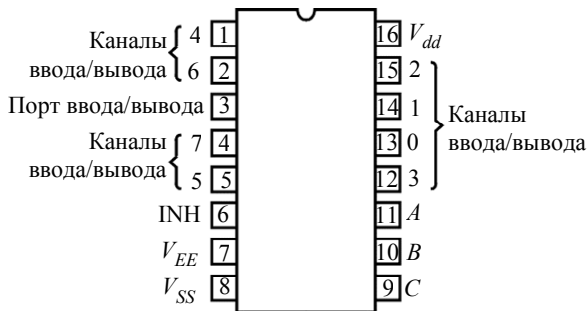


Рис. 9. Схема подключения CD4051BE
Fig. 9. CD4051BE connection diagram

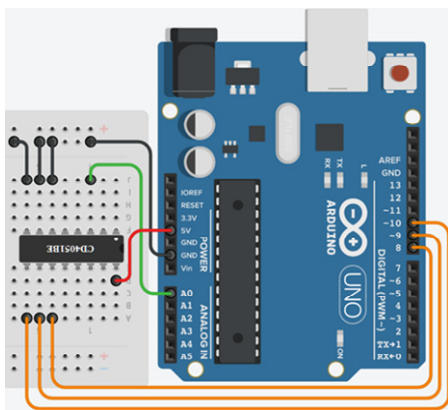


Рис. 10. Монтаж мультиплексора CD4051BE
Fig. 10. Installation of CD4051BE multiplexer

Также в схеме присутствуют датчики, подключенные к плате через мультиплексор, поскольку использованная в разработке плата не обладает необходимым количеством аналоговых пинов. Далее приведен пример подключения SS49E через CD4051BE (рис. 11).

Табл. 3. Описание контактов CD4051BE
Tab. 3. Description of CD4051BE contacts

Наименование	Описание
INH	Выключатель мультиплексора
V_{EE}	Заземление для входных сигналов
V_{SS}	Заземление для адресных сигналов
V_{dd}	Питание
A	Выходы управления переключением каналов
B	
C	

Монтаж всех устройств выполняется с учетом требований из их технической документации, поскольку в противном случае правильность работы как самого пространственно распределенного датчика электромагнитного поля, так и информационной системы мониторинга не гарантируется. Напротив, в случае неверного подключения того или иного устройства существует риск выхода его из строя.

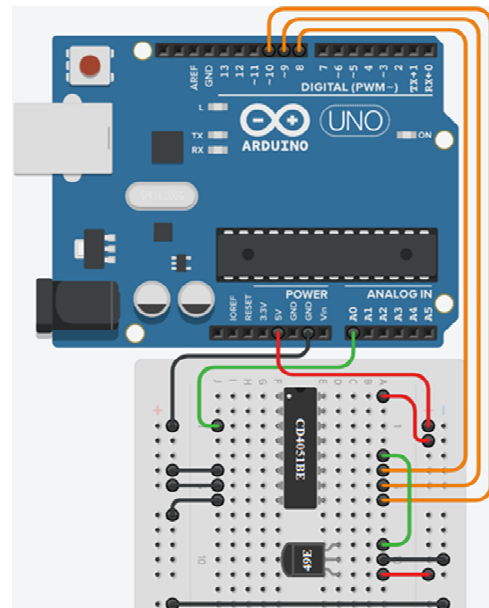


Рис. 11. Подключение SS49E через мультиплексор CD4051BE
Fig. 11. Connecting SS49E via CD4051BE multiplexer

Благодаря проведенным подготовительным работам было смонтировано все необходимое оборудование на макетной плате, а также разработан макет пространственно распределенного датчика электромагнитного поля металлургической печи (рис. 12).

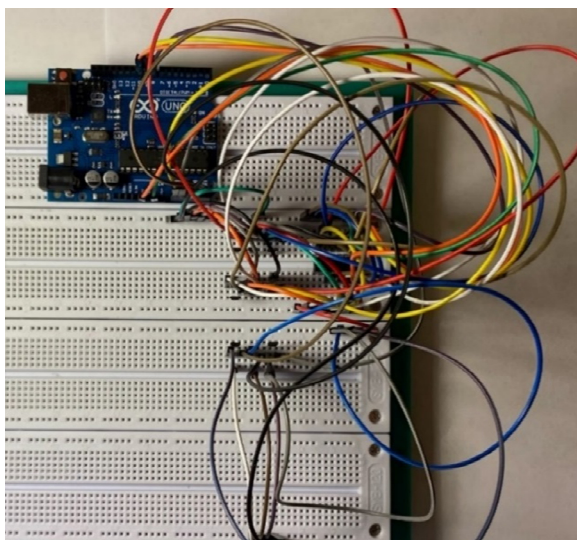


Рис. 12. Макет распределенного датчика
Fig. 12. Layout of the distributed sensor

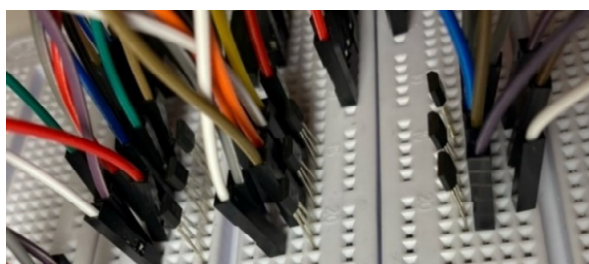


Рис. 13. Датчики SS49E на макете
Fig. 13. SS49E sensors on the market

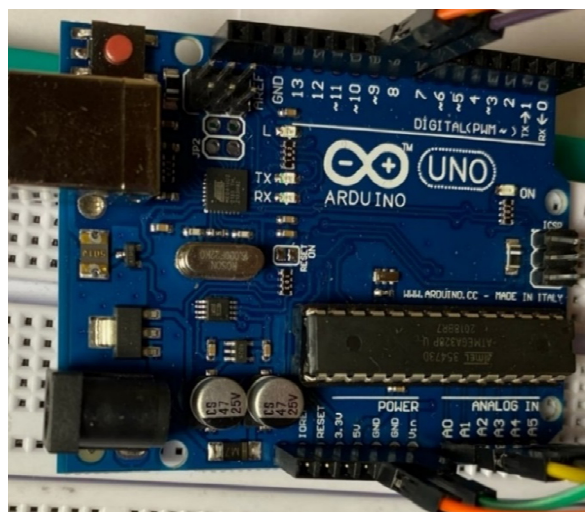


Рис. 14. Плата Arduino UNO
Fig. 14. Arduino UNO board



Рис. 15. CD4051BE на макете
Fig. 15. CD4051BE on the market

На данном макете смонтированы 9 датчиков эффекта Холла SS49E (рис. 13), 3 из которых подключены напрямую к плате Arduino UNO (рис. 14), а остальные – к этой же плате, но через мультиплексор CD4051BE (рис. 15).

Таким образом, в ходе проведенных работ согласно схеме подключения был спроектирован и собран представленный здесь макет устройства. Монтаж оборудования проведен по всем правилам, указанным в технической документации и описанным ранее. Дальнейшие этапы состоят в разработке программного кода информационной системы мониторинга электромагнитного поля металлургической печи в Arduino IDE для обеспечения работы собранного макета, а также в создании в Embarcadero RAD Studio прикладного приложения, позволяющего отображать и хранить информацию в удобном виде [16], [17].

Разработка программного модуля. Программирование в среде Arduino IDE. После успешного изготовления макета пространственно распределенного датчика информационной системы мониторинга электромагнитного поля металлургической печи был реализован программный код, который управляет работой вышеуказанного датчика и платы Arduino Uno, т. е. сбором и передачей информации от датчиков SS49E через COM-порт прикладному приложению. Демонстрация работы запрограммированного макета приведена далее.

Демонстрация работы программного модуля Arduino IDE. В качестве источника электромагнитного поля выступает постоянный магнит (рис. 16). В зависимости от наличия или отсутствия поля, а также от полюса магнита данные, получаемые от датчиков, будут изменяться [18], [19].

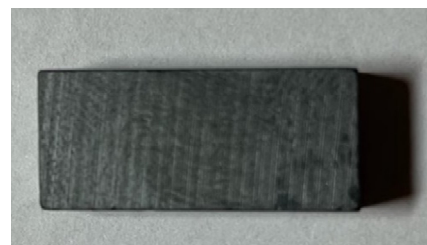


Рис. 16. Постоянный магнит
Fig. 16. Permanent magnet

Для обеспечения питания платы Arduino Uno и работы пространственно-распределенного датчика электромагнитного поля необходимо подключить плату к ПК (рис. 17), а затем загрузить в контроллер

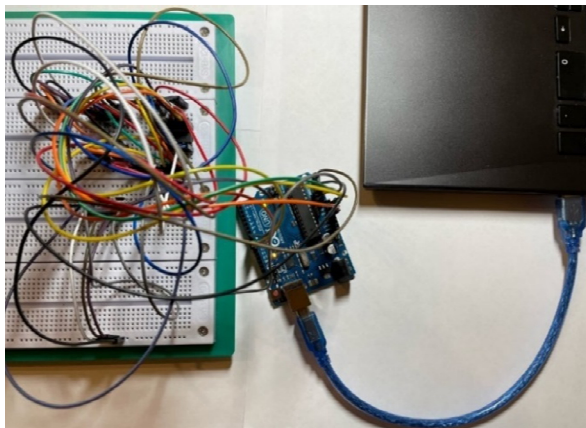


Рис. 17. Подключение макета к ПК
Fig. 17. Connecting the layout to a PC

разработанную ранее программу и в среде разработки Arduino IDE открыть «монитор порта», чтобы убедиться в работе датчика.

Открыв «Монитор порта» в среде разработки, можно наблюдать показания с датчиков (рис. 18) при отсутствии магнитного поля в зоне их действия.

COM1									
88	41	61	6	54	82	61	61	-109	
88	41	61	6	54	82	54	61	-109	
88	47	61	6	54	75	54	61	-109	
88	41	61	6	54	82	61	61	-102	
88	47	61	6	54	82	61	61	-109	
88	47	61	6	54	82	61	61	-109	
88	47	68	6	54	82	61	61	-109	
88	41	61	6	54	82	54	61	-109	
88	47	61	6	54	82	54	61	-109	
88	47	61	6	54	82	61	61	-102	
88	47	68	6	54	82	54	61	-102	
88	41	61	6	61	82	61	61	-102	
88	41	61	6	54	82	54	61	-102	

Рис. 18. Данные при отсутствии магнита в зоне действия датчиков

Fig. 18. Data in the absence of a magnet in the sensor range

После поднесения источника магнитного поля к датчикам SS49E (рис. 19) 4, 5 и 6 (рис. 6) наблюдается изменение показаний всех датчиков (рис. 20, 21); больше всего меняются показания тех, к которым подносится магнит – сначала одним полюсом, затем другим.

Помимо вышеупомянутого магнита работа пространственно распределенного датчика тестировалась и с помощью другого источника поля – также постоянного магнита (рис. 22); источники различаются формой и размерами. Помимо того что показания (рис. 23, 24) датчиков зависят от

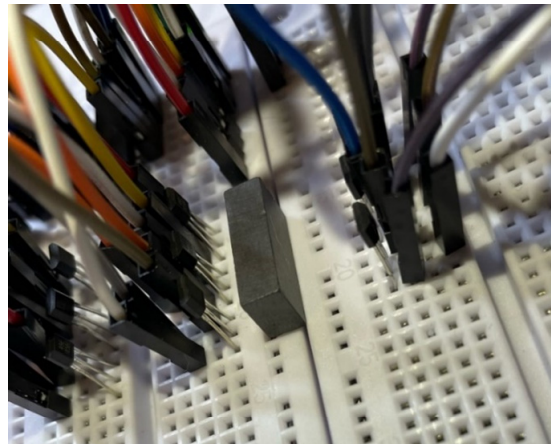


Рис. 19. Постоянный магнит в зоне действия датчиков SS49E

Fig. 19. Permanent magnet in the range of SS49E sensors

COM1									
150	129	129	2310	2413	2406	170	225	41	
150	123	129	2262	2413	2406	170	225	41	
150	123	123	2283	2413	2406	170	225	41	
88	68	88	6	157	587	54	95	211	
82	41	54	6	61	82	54	47	-109	
82	41	54	6	61	82	54	54	-102	
82	41	61	6	61	82	54	54	-109	
88	47	75	0	47	61	54	47	-102	
109	88	116	-6	806	1702	102	225	177	
150	129	129	1182	2392	2392	157	218	41	
150	129	129	1763	2378	2358	157	211	34	

Рис. 20. Показания датчиков при южном полюсе магнита

Fig. 20. Sensor readings at the south pole of the magnet

COM1									
82	41	61	13	68	88	61	54	-102	
82	41	61	13	68	88	61	54	-102	
82	41	61	13	61	88	61	54	-102	
82	41	61	13	61	88	61	54	-102	
88	41	61	13	61	88	54	54	-102	
88	41	61	13	61	88	61	54	-102	
88	41	54	13	61	82	68	68	-88	
47	-6	20	-526	-1497	-1011	-109	-252	-375	
27	-20	13	-2235	-2160	-560	-102	-170	-252	

Рис. 21. Показания датчиков при северном полюсе магнита

Fig. 21. Sensor readings at the north pole of the magnet

полюса магнита, они зависят еще и от его формы, силы и расстояния от датчика до магнита [20].

Таким образом был разработан программный код, обеспечивающий работу пространственного распределенного датчика электромагнитного поля необходимой системы мониторинга. Данный код

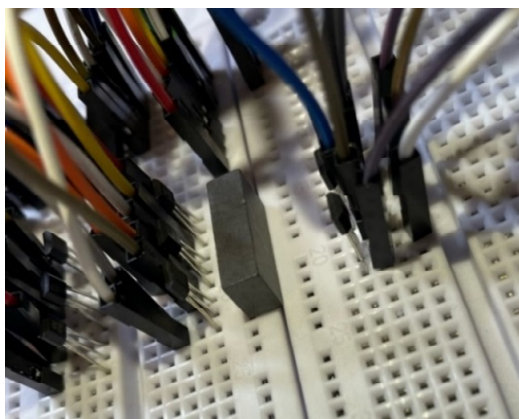


Рис. 22. Второй источник магнитного поля
 Fig. 22. The second source of the magnetic field

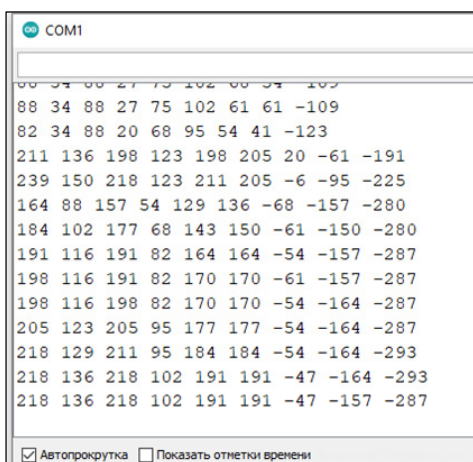


Рис. 23. Показания датчиков при южном полюсе второго магнита
 Fig. 23. Sensor readings at the south pole of the second magnet

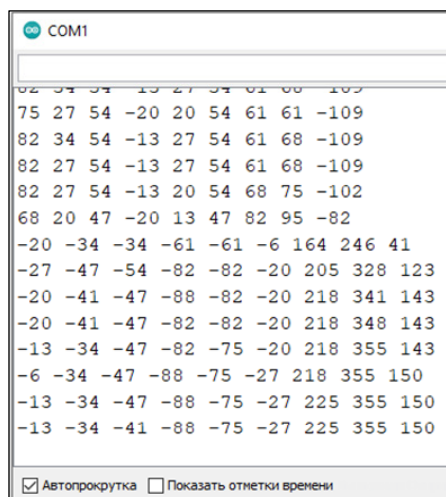


Рис. 24. Показания датчиков при северном полюсе второго магнита
 Fig. 24. Sensor readings at the north pole of the second magnet

необходим для сбора, обработки и передачи информации через COM-порт для дальнейшей работы программного модуля информационной си-

стемы мониторинга электромагнитного поля металлургической печи, заключающейся в реализации прикладного приложения для графического отображения информации, полученной от пространственно распределенного датчика, и организации журнала данных.

Программирование в среде быстрой разработки Embarcadero RAD Studio. Программирование в данной среде осуществляется на языке Delphi. Конечным итогом разработки служит прикладное приложение, в котором реализован прием данных от пространственно распределенного датчика электромагнитного поля для их хранения в файле журнала и построения на их базе 3D-графики, позволяющего наглядно определить напряженность поля и положение его источника.

Для обеспечения приема данных от пространственно распределенного датчика через COM-порт необходима библиотека «ComDrv32», благодаря ей установлена связь с платой Arduino Uno, отправляющей данные, а также реализован прием данных от этой платы, на основании которых строится 3D-график. Данная библиотека была интегрирована в среду разработки, благодаря чему в RAD Studio доступен компонент «TCommPortDriver», с помощью которого и осуществляются описанные ранее действия.

Для построения 3D-графики по показаниям пространственно распределенного датчика необходима библиотека «SDL Delphi Component Suite», существенно расширяющая набор стандартных компонентов RAD Studio. После установки данной библиотеки в среду разработки были интегрированы различные компоненты, позволяющие графически отображать информацию для облегчения ее восприятия человеком. В качестве компонента, строящего 3D-график, в данной работе был выбран TPlot3D.

Результатом данного этапа разработки макета информационной системы мониторинга электромагнитного поля металлургической печи служит прикладное приложение (рис. 25).

Посредством данного прикладного приложения осуществляется мониторинг электромагнитного поля металлургической печи. Иными словами, разработанный программно-аппаратный комплекс на базе подобранного оборудования и разработанного для него программного обеспечения является информационной системой мониторинга электромагнитного поля металлургической печи, состоящей из пространственно распределенного датчика электромагнитного поля, микроконтроллера и прикладного приложения, демонстрация работы последнего приведена далее.

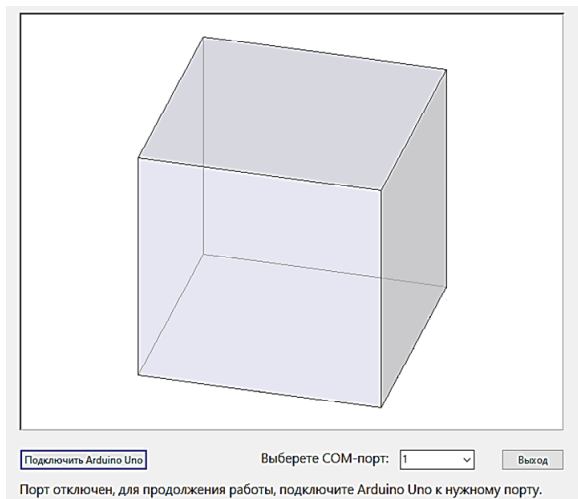


Рис. 25. Результат запуска приложения
Fig. 25. The result of launching the application

Демонстрация работы программного модуля из Embarcadero RAD Studio. Как упоминалось ранее, источником магнитного поля служит постоянный магнит, макет подключается к ПК, магнит подносится к датчикам 4, 5 и 6 (рис. 6, 26) сначала южным, а затем северным полюсом. При этом в прикладном приложении необходимо выбрать нужный COM-порт в выпадающем списке и нажать на кнопку «Подключить Arduino Uno». В результате проведенных действий объект «Plot3D1» строит сначала 3D-график, соответствующий реакции датчиков SS49E на один полюс источника магнитного поля, а затем на другой (рис. 27, 28). Параллельно с приемом данных идет их запись в файл журнала (рис. 26), просмотр которого будет доступен после закрытия прикладного приложения.

Затем после нажатия на «Выход» происходит разрыв соединения между макетом и прикладным приложением, закрытие файла журнала показаний и закрытие приложения. На рис. 26 представлены сохраненные данные.

На рис. 29 показан график при отсутствии источника магнитного поля в зоне действия датчиков SS49E.

Также работа прикладного приложения была протестирована на втором источнике магнитного поля. Вид 3D-графика (рис. 30, 31) зависит от полюса, формы, силы магнита и расстояния от источника поля до датчиков SS49E.

В данном разделе продемонстрирована работа прикладного приложения, заключающаяся в обеспечении удобного для пользователя интерфейса информационной системы мониторинга электромагнитного поля металлургической печи, т. е. в построении 3D-графика на основании данных, полученных приложением через COM-порт

от платы Arduino Uno, которая опрашивает датчики SS49E макета пространственно распределенного датчика электромагнитного поля. Данные, получаемые приложением, записываются в файл и могут быть просмотрены при возникновении такой необходимости.

1:	2:	3:	4:	5:	6:	7:	8:	9:
0,08	0,09	-0,08	0,10	0,05	0,09	0,02	0,08	0,10
0,10	0,05	0,09	0,02	0,08	0,10	0,08	0,08	-0,09
0,13	0,10	0,13	0,49	1,10	0,97	0,31	0,51	0,25
0,14	0,11	0,13	0,70	1,40	0,88	0,25	0,37	0,14
0,14	0,10	0,13	0,67	1,30	0,77	0,25	0,38	0,14
0,14	0,11	0,14	0,79	1,60	0,87	0,23	0,34	0,12
0,12	0,09	0,12	0,17	0,90	0,91	0,23	0,50	0,39
0,10	0,05	0,08	0,03	0,09	0,11	0,09	0,09	-0,08
0,09	0,05	0,08	0,03	0,08	0,11	0,08	0,09	-0,08
0,09	0,04	0,08	0,03	0,08	0,10	0,09	0,10	-0,06
0,05	0,01	0,04	-0,39	-1,20	-0,96	-0,10	-0,29	-0,42
0,05	0,00	0,04	-0,72	-1,50	-0,89	-0,09	-0,23	-0,33
0,05	0,00	0,04	-0,68	-1,50	-0,90	-0,08	-0,22	-0,34
0,05	0,00	0,04	-0,55	-1,40	-0,86	-0,08	-0,23	-0,36
0,10	0,06	0,09	0,01	0,04	0,08	0,07	0,05	-0,12
0,10	0,05	0,09	0,01	0,04	0,08	0,08	0,05	-0,12
0,10	0,06	0,09	0,01	0,04	0,08	0,07	0,05	-0,12
0,10	0,06	0,09	0,00	0,04	0,08	0,08	0,05	-0,12

Рис. 26. Журнал данных
Fig. 26. Data log

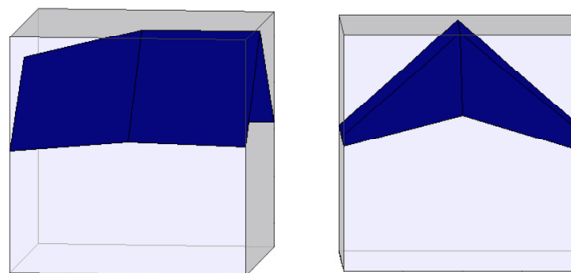


Рис. 27. Построенные графики при южном полюсе магнита в зоне действия датчиков
Fig. 27. Plotted graphs at the south pole of the magnet in the sensor range

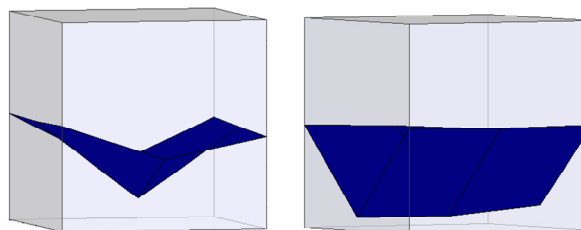


Рис. 28. Построенные графики при северном полюсе магнита
Fig. 28. Plotted graphs at the north pole of the magnet

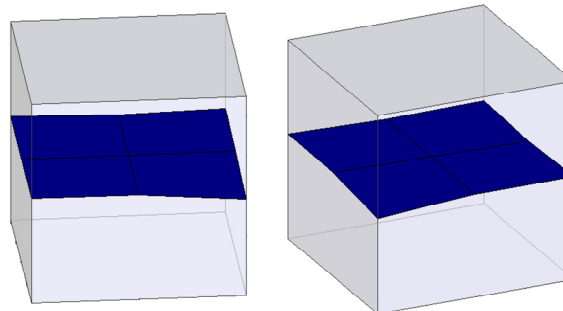


Рис. 29. 3D-графики при отсутствии магнита в зоне действия SS49E
Fig. 29. 3D graphics in the absence of a magnet in the SS49E area of operation

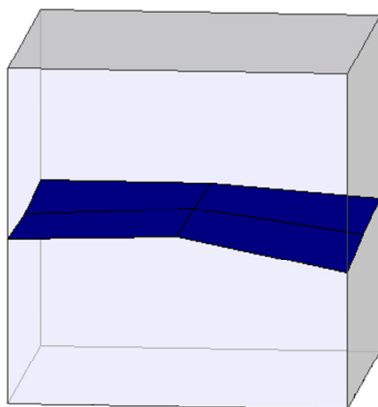


Рис. 30. 3D-график при северном полюсе второго магнита

Fig. 30. 3D graph at the north pole of the second magnet

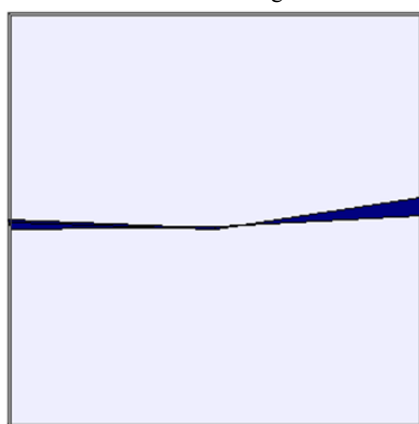


Рис. 31. 3D-график при южном полюсе второго магнита

Fig. 31. 3D graphics at the south pole of the second magnet

Описание работы информационной системы мониторинга электромагнитного поля металлургической печи. Программный модуль для информационной системы мониторинга электромагнитного поля металлургической печи был успешно разработан. Благодаря программному коду, написанному в среде разработки Arduino IDE, осуществляется работа пространственно распределенного датчика электромагнитного поля посредством платы Arduino Uno.

Каждый датчик SS49E регистрирует значение напряженности магнитного поля в зоне своего действия и передает данное значение плате, которая проводит первичную обработку информации и отправляет ее через COM-порт прикладному приложению.

Прикладное приложение, реализованное с помощью языка программирования Delphi в среде разработки Embarcadero RAD Studio, принимает информацию от пространственно распределенного датчика электромагнитного поля. Затем по-

лученные данные фиксируются в журнале показаний, а также визуализируются посредством построения 3D-графика.

Программный модуль информационной системы мониторинга электромагнитного поля успешно разработан, благодаря чему завершена разработка данной системы мониторинга.

Обсуждение. Уровень технологического производства металлов определяется областью совершенствования функционирования технологического процесса плавки. Большинство методик оптимизации технологического процесса носят точечный локальный характер. В рамках данного исследования сделана попытка совершенствования производства металлов плавкой в металлургической индукционной печи. Коллектив авторов, опираясь на работы в области металлургии и информационных систем, проанализировал технологический процесс плавки сырья; достаточно подробно осветил принцип индукционного нагрева и проблемы объекта исследования; разработал информационную систему мониторинга электромагнитного поля индукционной металлургической печи.

Научный интерес данной работы состоит в информационной системе мониторинга электромагнитного поля металлургической печи, в основе которой лежит разработанный коллективом авторов пространственно распределенный датчик магнитного поля, позволяющий определять магнитное поле сразу в нескольких точках пространства на любом этапе технологического процесса.

Производственный интерес данных исследований состоит в возможности технического контроля и прогнозирования развития технологического процесса. Современная металлургическая печь – это динамический объект. Определение качества расплава в лабораторных условиях занимает столько времени, что к завершению процесса плавки анализ пробы расплава все еще не готов. Таким образом, результат определения теряет свою актуальность практически на этапе измерения. Косвенно о качестве расплава можно судить по равномерности его нагрева, что, в свою очередь, зависит от равномерности электромагнитного поля. Представленный макет информационной системы позволяет осуществлять мониторинг электромагнитного поля для поддержания равномерности нагрева.

Таким образом, данная статья может быть полезна как представителям промышленности, так и академическому сообществу.

Заключение. Востребованность основного потребительского металла – алюминия – на современном рынке приводит к существенному росту производства. По оценке зарубежных экспертов, ежегодный прирост получения алюминия будет расти в среднем от 3–5 %, что приведет к необходимости модернизации существующих производств. Эту задачу невозможно выполнить без комплексного понимания технологического процесса. В рамках данного исследования проведен анализ и разработан макет, позволяющий осуществлять мониторинг технологического процесса.

К основным результатам работы следует отнести следующее:

1. Для разработки информационной системы мониторинга было подобрано необходимое оборудование, составлена электрическая схема пространственно распределенного датчика электромагнитного поля, на основании которой был построен макет данного датчика.

2. Разработан программный модуль, управляющий работой пространственно распределенного датчика. Также было разработано прикладное приложение, которое с помощью данных, собранных с этого датчика, графически отображает такие данные и записывает их в журнал показаний.

Список литературы

1. Трокоз Д. А., Трусов Е. В. Система мониторинга. Структура и основные компоненты / Тр. междунар. симп. «Надежность и качество». 2018. Т. 1. С. 214–215.
2. Коротков М. А. Развитие мировой металлургии // Научное сообщество студентов XXI столетия. Экономические науки: сб. ст. по материалам ХСII студенческой междунар. науч.-практ. конф. Новосибирск: ООО «Сибирская академическая книга». 2020. С. 51–55.
3. Болтабоев Б. Б., Ахмедов Ш. Б. Применение индукционных тигельных печей для плавки металлов // Научные разработки: евразийский регион: материалы Восьмой междунар. научной конф. теоретических и прикладных разработок / отв. ред. Д. Р. Хисматуллин. М.: Инфинити. 2017. С. 100–102.
4. Принцип работы индукционных печей. Принцип индукционного нагрева / ОКБ Козырев. URL: <https://inductor.su/tehnikeskaya-biblioteka/printsip-raboty-induktsionnyh-pechej-printsip-induktsionnogo-nagreva/> (дата обращения 18.05.2022).
5. Принцип работы индукционной печи для плавки металла: описание, характеристики. URL: <https://kakraботаet.ru/elektronika/princzip-raboty-indukcionnoj-pechi-dlya-plavki-metalla/> (дата обращения 22.05.2022).
6. Comparative analysis of electrical and thermal control of the lining state of induction apparatus of copper wire manufacture / V. M. Zolotaryov, M. A. Shcherba, R. V. Belyanin, R. P. Mygushchenko, O. Yu. Kropachek // Электротехника и электромеханика. 2018. № 1. С. 35–40. doi: 10.20998/2074-272X.2018.1.05.
7. Преимущества и недостатки индукционной печи, возможности применения. URL: <https://mvdrrb.ru/preimushchestva-i-nedostatki-indukcion/> (дата обращения 18.05.2022).
8. Исследование параметров электромагнитного поля в многослойной проводящей среде при индукционном нагреве / М. А. Федин, А. Б. Кувалдин, А. О. Кулешов, С. В. Ахметьянов, С. С. Кондрашов, Б. Чэнь // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век: материалы XVII междунар. науч.-практ. конф. Орел: ОГУ им. И. С. Тургенева. 2019. С. 103–108.
9. Краткий обзор и перспективы применения микропроцессорной платформы Arduino / Е. Я. Омельченко, В. О. Танич, А. С. Маклаков, Е. А. Карякина // Электротехнические системы и комплексы. 2013. № 21. С. 28–33.
10. Баранов А. А. Обзор аппаратно-программных средств ARDUINO // Методы и средства обработки и хранения информации: Межвуз. сб. науч. тр. / под ред. Б. В. Кострова. Рязань: Редакционно-издательский центр РГРТУ. 2019. С. 149–152.
11. Борисов Е. А., Теплов А. В. Анализ и актуальность использования программно-аппаратной платформы Arduino в современных условиях // Наука через призму времени. 2019. № 8(29). С. 78–80.
12. Ильюшин Ю. В., Кравцова А. Л., Мардоян М. М. Устойчивость температурного поля распределенной системы управления // Науч. обозрение. 2012. № 2. С. 189–197.
13. Afanaseva O., Ilyushin Yu. Analysis and processing of the hydrolitospheric plast information remote sensing through the theory of systems with distributed // 18th Intern. Multidisciplinary Scientific GeoConf. SGEM 2018. Albena, Bulgaria: ООО СТЕФ92 Технолоджи. 2018. Vol. 18. P. 35–40. doi: 10.5593/sgem2018/2.2/S08.005.
14. Ильюшин Ю. В. Методы импульсного управления объектами с распределенными параметрами: Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / Южный федер. ун-т. Пятигорск, 2012. 170 с.
15. Ильюшин Ю. В. Синтез наблюдателя Люинбергера для автоматизированной системы управления // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: IV межд. науч.-техн. и науч.-метод. конф.: сб. науч. ст. в 2 т. СПб.: Санкт-Петербургский гос. ун-т телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. 2015. Т. 1. С. 314–320.
16. Проектирование распределенных систем управления гидrolитосферными процессами. Синтез распределенных систем управления / И. М. Першин, Д. А. Первухин, Ю. В. Ильюшин, О. В. Афанасьева // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2017: сб. науч.

тр. междунар. науч.-техн. конф. / науч. ред. В. В. Макаров, В. В. Габов. СПб.: Санкт-Петербургский горный университет. 2017. С. 189–195.

17. Антропова В., Соболев Е. Ф., Ильющин Ю. В. Сенсорные датчики. Анализ геологических данных авиаразведки // Сб. тр. X междунар. конф. «Фундаментальные проблемы оптики – 2018». СПб.: Университет ИТМО. 2018. С. 24–25.

18. Ильющин Ю. В., Новожилов И. М., Шестопалов М. Ю. Методика и система управления позиционированием геологоразведочного подводного аппарата // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2019. № 7. С. 57–61.

19. Ильющин Ю. В., Шестопалов М. Ю. Применение модифицированного критерия Найквиста для анализа импульсных распределенных систем // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2019. № 3. С. 42–46.

20. Анализ и идентификация электромагнитных полей пространственно распределенных систем управления / И. М. Новожилов, О. А. Беляевский, Ю. В. Ильющин, Т. В. Кухарова, Е. М. Михайлова // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 2. С. 41–50. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-2-41-50.

Информация об авторах

Боронко Егор Андреевич – магистрант Горного университета.

E-mail: egor.boronko@mail.ru

Капостей Екатерина Ивановна – магистрант Горного университета.

E-mail: kapostey@yandex.ru

Новожилов Игорь Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации и процессов управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: novozhilovim@list.ru

References

1. Trokoz D. A., Trusov E. V. Sistema monitoringa. Struktura i osnovnye komponenty // Tr. mezhdunar. simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo». 2018. T. 1. S. 214–215. (In Russ.).

2. Korotkov M. A. Razvitie mirovoj metallurgii // Nauchnoe soobshhestvo studentov XXI stoletija. Jekonomicheskie nauki: sb. st. po materialam XCI studencheskoj mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Novosibirsk: OOO «Sibirskaja akademicheskaja kniga». 2020. S. 51–55. (In Russ.).

3. Boltaboev B. B., Ahmedov Sh. B. Primenenie indukcionnyh tigel'nyh pechej dlja plavki metallov // Nauch. razrabotki: evrazijskij region: materialy Vos'moj mezhdunar. nauch. konf. teoreticheskij i prikladnyh razrabotok / otv. red. D. R. Hismatullin. M.: Infiniti. 2017. S. 100–102. (In Russ.).

4. Princip raboty indukcionnyh pechej. Princip indukcionnogo nagreva / OKB Kozyrev. URL: <https://inductor.su/tehnicheskaya-biblioteka/printsip-raboty-indukcionnyh-pechej-printsip-indukcionnogo-nagreva/> (data obrashhenija 18.05.2022). (In Russ.).

5. Princip raboty indukcionnoj pechi dlja plavki metalla: opisanie, harakteristiki. URL: <https://kakrabotaet.ru/elektronika/princip-raboty-indukcionnoj-pechi-dlja-plavki-metalla/> (data obrashhenija 22.05.2022). (In Russ.).

6. Comparative analysis of electrical and thermal control of the lining state of induction apparatus of copper wire manufacture / V. M. Zolotaryov, M. A. Shcherba, R. V. Belyanin, R. P. Mygushchenko, O. Yu. Kropachek // Jelektrotehnika i jelektromehanika. 2018. № 1. S. 35–40. doi: 10.20998/2074-272X.2018.1.05.

7. Preimushhestva i nedostatki indukcionnoj pechi, vozmozhnosti primeneniya. URL: <https://mvdbr.ru/preimushchestva-i-nedostatki-indukcion/> (data obrashhenija 18.05.2022). (In Russ.).

8. Issledovanie parametrov jelektromagnitnogo polja v mnogoslujnoj provodjashhej srede pri indukcionnom nagreve / M. A. Fedin, A. B. Kuvaldin, A. O. Kuleshov, S. V. Ahmet'janov, S. S. Kondrashov, B. Chjen' // Jenergo- i resursosberezhenie – XXI vek: materialy XVII mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Orjol: OGU im. I. S. Turgeneva. 2019. S. 103–108. (In Russ.).

9. Kratkij obzor i perspektivy primeneniya mikroprocessornoj platformy Arduino / E. Ja. Omel'chenko, V. O. Tanich, A. S. Maklakov, E. A. Karjakina // Jelektrotehnicheskie sistemy i kompleksy. 2013. № 21. S. 28–33. (In Russ.).

10. Baranov A. A. Obzor apparatno-programmnyh sredstv ARDUINO // Metody i sredstva obrabotki i hraneniya informacii: Mezhvuz. sb. nauch. tr. / pod red. B. V. Kostrova. Rjazan': Redakcionno-izdatel'skij centr RGRTU. 2019. S. 149–152. (In Russ.).

11. Borisov E. A., Teplov A. V. Analiz i aktual'nost' ispol'zovanija programmno-apparatnoj platformy Arduino v sovremennyh uslovijah // Nauka cherez prizmu vremeni. 2019. № 8(29). S. 78–80. (In Russ.).

12. Il'jushin Ju. V., Kravcova A. L., Mardojan M. M. Ustojchivost' temperaturnogo polja raspredelennoj sistemy upravlenija // Nauch. obozrenie. 2012. № 2. S. 189–197. (In Russ.).

13. Afanaseva O., Ilyushin Yu. Analysis and processing of the hydrolitospheric plast information remote sensing through the theory of systems with distributed

// 18th Intern. Multidisciplinary Scientific GeoConf. SGEM 2018. Albena, Bulgaria: OOO STEF92 Tekhnology. 2018. Vol. 18. P. 35–40. doi: 10.5593/sgem2018/2.2/S08.005.

14. Il'jushin Ju. V. Metody impul'snogo upravlenija ob#ektami s raspredelennymi parametrami: Dis. ... kand. tehn. nauk: 05.13.01. Pjatigorsk. Juzhnyj feder. un-t, 2012. 170 s. (In Russ.).

15. Il'jushin Ju. V. Sintez nabljudatelja Ljuinbergera dlja avtomatizirovannoj sistemy upravlenija // Aktual'nye problemy infotelekkommunikacij v nauke i obrazovanii: IV mezhdunar. nauch.-tehn. i nauch.-metod. konf.: sb. nauch. st. v 2 t. SPb.: Sankt-Peterburgskij gos. un-t telekkommunikacij im. prof. M. A. Bonch-Bruevicha. 2015. T. 1. S. 314–320. (In Russ.).

16. Proektirovanie raspredelennyh sistem upravlenija gidrolitosfernymi processami. Sintez raspredelennyh sistem upravlenija / I. M. Pershin, D. A. Pervuhin, Ju. V. Il'jushin, O. V. Afanas'eva // Innovacii i perspektivy razvitiija gornogo mashinostroeniija i jelektromehaniki: IPDME-2017: sb. nauch. tr. mezhdunar. nauch.-tehn. konf. / nauch. red. V. V. Maksarov, V. V. Gabov. SPb.:

Sankt-Peterburgskij gornyj universitet. 2017. S. 189–195. (In Russ.).

17. Antropova V., Sobol' E. F., Il'jushin Ju. V. Sensornye datchiki. Analiz geologicheskikh dannyh aviarazvedki // Sb. tr. X mezhdunar. konf. «Fundamental'nye problemy optiki – 2018». SPb.: Universitet ITMO. 2018. S. 24–25. (In Russ.).

18. Il'jushin, Ju. V., Novozhilov I. M., Shestopalov M. Ju. Metodika i sistema upravlenija pozicionirovaniem geologorazvedochnogo podvodnogo apparata // Izv. SPbGETU «LETI». 2019. № 7. S. 57–61. (In Russ.).

19. Il'jushin Ju. V., Shestopalov M. Ju. Primenenie modifitsirovannogo kriterija Najkvista dlja analiza impul'snyh raspredelennyh sistem // Izv. SPbGETU «LETI». 2019. № 3. S. 42–46. (In Russ.).

20. Analiz i identifikacija jelektromagnitnyh polej prostranstvenno raspredelennyh sistem upravlenija / I. M. Novozhilov, O. A. Beljaevskij, Ju. V. Il'jushin, T. V. Kuharova, E. M. Mihajlova // Izv. SPbGETU «LETI». 2022. T. 15, № 2. S. 41–50. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-2-41-50. (In Russ.).

Information about the authors

Egor A. Boronko – master's student at Saint Petersburg Mining University.

E-mail: egor.boronko@mail.ru

Ekaterina I. Kapostey – master's student at Saint Petersburg Mining University.

E-mail: kapostey@yandex.ru

Igor M. Novozhilov – Cand. Sci. (Eng.), Assistant professor of Department of Automation and Control Processes of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: novozhilovim@list.ru

Статья поступила в редакцию 21.03.2023; принята к публикации после рецензирования 31.03.2023; опубликована онлайн 25.05.2023.

Submitted 21.03.2023; accepted 31.03.2023; published online 25.05.2023.
