

Разработка прототипа системы идентификации электромагнитного поля

Е. А. Боронко^{1✉}, Ю. В. Ильюшин¹, И. М. Новожилов²,
А. Н. Ильюшина³, О. А. Беляевский⁴

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

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

³ Санкт-Петербургский технический колледж управления и коммерции, Санкт-Петербург, Россия

⁴ ООО «Техноавтоматика» ОП, г. Иркутск, Россия

✉ egor.boronko@mail.ru

Аннотация. Разработана информационная система мониторинга электромагнитного поля электрохимического процесса электролиза, основной элемент которой – пространственно распределенный датчик. Данная система позволяет идентифицировать характеристики электромагнитного поля в нескольких точках пространства. Также такая система может использоваться для поддержки принятия решений при выработке управляющего воздействия. В работе разработана электрическая схема пространственно-распределенного датчика электромагнитного поля, проведены теоретическое и экспериментальные исследования; осуществлен анализ результатов исследования.

Ключевые слова: система мониторинга, электромагнитное поле, металлургическая печь, алюминиевый электролизер

Для цитирования: Разработка прототипа системы идентификации электромагнитного поля. Е. А. Боронко, Ю. В. Ильюшин, И. М. Новожилов, А. Н. Ильюшина, О. А. Беляевский // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 3. С. 87–96. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-3-87-96.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Development of a Prototype Electromagnetic Field Identification System

Е. А. Boronko^{1✉}, Yu. V. Ilyushin¹, I. M. Novozhilov²,
A. N. Ilyushina³, O. A. Belyaevsky⁴

¹ Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

² Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

³ Saint Petersburg Technical College of Management and Commerce, St. Petersburg, Russia

⁴ «Technoavtomatika» Ltd. OP, Irkutsk, Russia

✉ egor.boronko@mail.ru

Abstract. An information system for monitoring the electromagnetic field of the electrochemical electrolysis process has been developed, the main element of which is a spatially distributed sensor. This system makes it possible to identify the characteristics of the electromagnetic field at several points in space. Also, such a system can be used to support decision-making when developing a control action. An electrical circuit of a spatially distributed electromagnetic field sensor has been developed, theoretical and experimental studies have been carried out; the analysis of the results of the study was carried out.

Keywords: monitoring system, electromagnetic field, metallurgical furnace, aluminum electrolyzer

For citation: Development of a Prototype Electromagnetic Field Identification System / E. A. Boronko, Yu. V. Ilyushin, I. M. Novozhilov, A. N. Ilyushina, O. A. Belyaevsky // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 3. P. 87–96. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-3-87-96.

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

Введение. С каждым днем все сильнее ощущается влияние информационных систем на деятельность человека. Системы как автоматического, так и автоматизированного управления технологическими процессами в своей структуре включают системы мониторинга. Посредством мониторинга собирается необходимая информация, на основании которой принимаются решения, влияющие на технологический процесс [1]–[3].

В мировой экономике металлургия занимает ведущее место и от ее технического оснащения зависит состояние экономики в целом [4], [5]. Именно поэтому в настоящее время существует острая необходимость в интенсификации производства продуктов металлургической отрасли. Один из способов осуществления данной задачи – внедрение на предприятиях информационных систем (ИС) мониторинга, с помощью которых осуществляется контроль технологических параметров, влияющих на качество изделий.

Основной способ получения первичного алюминия – электролиз [6], [7]. Для усовершенствования данного процесса предлагается использовать информационную систему мониторинга электромагнитного поля.

Актуальность исследования обусловлена наличием ряда проблем, связанных с электролизом. Исследование направлено на поиск возможных решений с целью повышения эффективности и безопасности технологического процесса получения первичного алюминия, который лидирует в РФ среди цветных металлов по объемам производства. В качестве возможного решения данных проблем предлагается использовать информационную систему мониторинга электромагнитного поля.

Целью исследования служит разработка макета информационной системы мониторинга электрохимического процесса электролиза для повышения эффективности управления данным процессом.

В рамках исследования установлены следующие задачи:

1. Анализ проблематики объекта исследования.
2. Описание роли ИС мониторинга электромагнитного поля (ЭМП).
3. Разработка структурной схемы системы мониторинга ЭМП.
4. Подбор необходимого оборудования, разработка электрической схемы устройства и его сборка согласно схеме.

5. Разработка программного обеспечения системы мониторинга.

6. Демонстрация работы разработанного технического решения.

Проблемы и недостатки технологического процесса. Ключевая проблема производства алюминия заключается в волнении металла, природа которого не изучена в должной мере, однако доказано, что перераспределение токов в электролитическом растворе оказывает на данное явление непосредственное влияние [7]. Идентификация электромагнитного поля в пределах электролизной ванны позволяет сделать вывод как о ходе протекания всего технологического процесса, так и о самом волнении металла, поскольку оно возникает в результате перераспределения тока в электролитическом растворе.

Также стоит отметить, что магнитогидродинамическая стабильность тоже зависит от вышеупомянутого перераспределения токов, которое способно породить искривление магнитного поля.

На предприятиях металлургической промышленности независимо от типа электролизной установки получения алюминия применяются комплексные средства для контроля процесса производства. В настоящее время математическое моделирование используется для осуществления контроля технологических параметров [8], [9].

Электролизер – сложное техническое устройство, в его основе также находится ряд сложных элементов, в процессе работы которых по разным причинам могут допускаться потери электрической энергии. Идентифицировать такие потери нередко можно только по последствиям, оказываемым на технологический процесс.

На практике измеряется 4 параметра, на базе которых и происходит построение моделей: сила тока, напряжение, межполюсное расстояние и загружаемый глинозем. В данной статье предлагается расширить количество измеряемых параметров для повышения точности косвенных расчетов побочных, но не менее важных технологических параметров [10], [11].

В моделях используется специальное программное обеспечение для моделирования сопутствующих процессу получения алюминия про-

цессов. Программы «Blums v5.07», «ArcRUSAL», «MHD-Valdis» способны моделировать постоянно изменяющиеся во времени магнитогидродинамические характеристики. Однако из-за сложности таких вычислений для работы данного программного обеспечения требуются соответствующие вычислительные мощности, используемые специализированными программами для расчетов:

- влияния полей соседних установок электролиза алюминия и соседнего ряда аналогичных установок;
- параметров электролизера;
- параметров анодного узла (размер узла, количество штырей, шага между ними);
- параметров катодного узла (количество секций, их размеры, размеры блюмса);
- физических характеристик материалов конструкции;
- температур элементов ванны и воздуха.

Разработка способа прямого измерения еще одного технологического параметра позволит снизить системные требования приведенных или аналогичных программ [11], этот параметр – уровень электромагнитного поля (ЭМП). Анализ данных, полученных при его считывании, даст возможность повысить эффективность воздействия на процесс электролиза алюминия, а своевременное реагирование на выявленную МГД-нестабильность позволит снизить экономические издержки производства, повысив однородность ЭМП.

Именно для обеспечения мониторинга электромагнитного поля электрохимического процесса электролиза алюминия необходимо использовать информационную систему мониторинга данного процесса. Ключевой элемент данной системы представляет специально разработанное устройство, основная задача которого – регистрация и сбор информации о значениях электромагнитного поля [11].

Устройство представляет собой распределенный в пространстве электромагнитный датчик, благодаря чему мониторинг будет вестись не в одной точке пространства, а по всей области, ограниченной размерами электронной ванны.

Таким образом, введение в исходные данные для моделирования технологического процесса еще одного параметра позволяет снизить нагрузку на вычислительные устройства и повысить быстродействие по выработке управляющего воздействия на технологический процесс, что, в свою очередь,

окажет положительное влияние на эффективность производства конечного продукта [12].

Роль информационной системы мониторинга электромагнитного поля электрохимического процесса электролиза в данном исследовании. Предполагается, что разрабатываемая система мониторинга позволит не только изучить, как именно происходит распределение электромагнитного поля в ходе протекания технологического процесса электролиза алюминия, но и в дальнейшем определить, какое влияние друг на друга оказывают температурное и электромагнитное поля объекта исследования.

Система состоит из аппаратного комплекса, осуществляющего идентификацию электромагнитного поля, а также из программного комплекса, который после обработки полученных данных осуществляет их графическое представление. Помимо прочего непосредственное отношение к методике настоящего исследования имеет серия экспериментов, благодаря которой можно проверить работоспособность и адекватность разрабатываемой информационной системы.

Структурная схема и задачи разрабатываемой информационной системы мониторинга. Разрабатываемая система мониторинга состоит из аппаратного и программного комплекса, между которыми в режиме, приближенном к реальному времени, осуществляется сбор, обмен и анализ экспериментальных данных.

Аппаратный комплекс на базе микроконтроллера ATmega328 (плата Arduino Uno) решает следующие задачи:

1. Идентификация электромагнитного поля объекта исследования.
2. Сбор сведений об электромагнитном поле объекта исследования.
3. Отправка собранных данных прикладному приложению.

Программный комплекс осуществляет:

1. Установку соединения с пространственно-распределенным датчиком электромагнитного поля.
2. Прием данных от пространственно-распределенного датчика.
3. Графическую интерпретацию полученных данных.
4. Анализ равномерности электромагнитного поля объекта исследования и хода технологического процесса электрохимического электролиза алюминия.

5. Занесение в журнал собранных данных для обеспечения возможности их анализа иными способами и программными продуктами.

Структурная схема информационной системы мониторинга электромагнитного поля электрохимического процесса электролиза приведена на рис. 1.

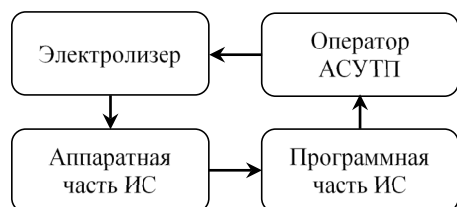


Рис. 1. Структурная схема ИС мониторинга ЭМП
Fig. 1. The block diagram of the IS EMF monitoring

Характеристики магнитного поля как измеряемые параметры информационной системы мониторинга. Система мониторинга разрабатывается для проверки возможности определения однородности электромагнитного поля объекта исследования (алюминиевого электролизера), степень однородности такого поля можно определить по однородности его значений в пространстве.

Основными параметрами разрабатываемой системы являются характеристики магнитного поля. Используемые аналоговые датчики идентифицируют данные характеристики, после чего эти данные подвергаются дальнейшему анализу.

После приема собранных аппаратным комплексом данных прикладным приложением осуществляется графическая их интерпретация в виде трехмерных данных, благодаря которой можно судить об однородности или неоднородности поля.

Используемое в макете оборудование. В данной информационной системе используется микроконтроллер Arduino Uno, именно с его помощью осуществляется непрерывный опрос датчиков эффекта Холла, а также передача данных следующему элементу системы – прикладному приложению.

Датчик SS49E – биполярный датчик эффекта Холла, с помощью которого можно измерить магнитное поле. Согласно технической документации, 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. Всего задействовано 125 таких датчиков.

Керамический конденсатор емкостью 0.1 мкФ применяется для настройки чувствительности датчиков на один уровень, всего задействованы 125 конденсаторов, по одному на каждый датчик.

Следующий элемент системы – 16-канальный аналоговый мультиплексор CD74HC4067, который используется для расширения количества аналоговых портов микроконтроллера. Характеристики мультиплексора: напряжение питания – 2...6 В; коммутируемое напряжение – от 0 до напряжения питания; сопротивление канала 70 Ом при напряжении питания 4.5 В, 60 Ом – при 6 В; скорость переключения: 6 нс; рабочая температура – от -55 до 125 °С. Всего в макете используются 10 таких устройств.

Электрическая схема. Предваряет монтаж оборудования разработка электрической схемы подключения всех электронных компонентов. Для проектирования была использована специализированная среда разработки EasyEDA, с помощью которой можно проектировать электрические цепи, симулировать процесс их работы, изготавливать из них печатные платы, а также предварительно визуализировать их в трехмерном виде. Электрическая схема представлена на рис. 2. Представленная схема справедлива для всех слоев пространственно распределенного датчика (их всего 5).

Пространственно распределенный датчик ЭМП. Пространственно распределенный датчик представляет собой куб со стороной 10 см, внутри куба расположены 125 аналоговых датчиков эффекта Холла, по 25 датчиков на каждый слой куба. Сама установка представлена на рис. 2.

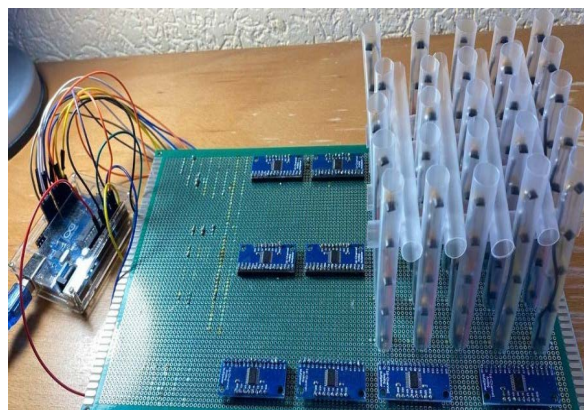


Рис. 2. Пространственно распределенный датчик электромагнитного поля

Fig. 2. Spatially distributed electromagnetic field sensor

Программное обеспечение. Программный модуль разработанной системы состоит из двух частей: программа, написанная на языке Arduino C (основан на C++) для опроса датчиков и отправки данных другой программе – прикладному приложению, принимающему и отображающему их графически.

Программа Arduino Uno опрашивает все 125 датчиков электромагнитного поля. Затем плата отправляет собранные данные в подготовленном для их дальнейшей обработки виде прикладному приложению через COM-порт.

Прикладное приложение создано на языке программирования Delphi в среде быстрой разработки Embarcadero RAD Studio. Основная задача указанного программного модуля – это визуализация собранных на предыдущем этапе данных для определения оператором информационной системы состояния алюминиевого электролизера.

Для обеспечения приема данных через COM-порт задействована библиотека ComDrv32. После интеграции библиотеки в среду разработки доступен компонент TcommPortDriver, который и используется для достижения вышеизложенной цели. Также в работе используется библиотека «SDL Delphi Component Suite» для построения трехмерных графиков, позволяющих визуально оценить ход технологического процесса электролиза алюминия. Данная библиотека существенно расширяет набор стандартных компонентов используемой среды разработки, однако в статье используется только один компонент – TPlot3D.

Демонстрация работы разработанной ИС мониторинга. После того как разработка макета информационной системы мониторинга электрохимического процесса электролиза завершена, можно проанализировать ее функционал и результаты ра-

боты в тех или иных условиях, а также сравнить трехмерные графики из разработанного прикладного приложения с графиками, построенными в MatLab для проверки адекватности системы мониторинга. MatLab был выбран, исходя из удобства построения интерполяционных моделей посредством генерации линейно распределенных значений по полученным от аналоговых датчиков данным.

Работа системы мониторинга в условиях отсутствия внешнего электромагнитного поля представлена на рис. 3. Незначительные отклонения показаний датчиков от нулевого значения можно объяснить тем, что под макетной платой находятся соединительные провода, в которых протекают токи, наводящие электромагнитное поле.

В таких условиях система сигнализирует о том, что она близка к переходу в другой режим. На основании данных с датчиков для сравнения в MatLab были построены интерполяционные модели распределения ЭМП первого и последнего слоев (рис. 4–5).

Таким образом, благодаря MatLab можно оценить целостную картину однородности электромагнитного поля благодаря интерполяции полученных от разработанного пространственно распределенного датчика данных.

Разработанная система позволяет идентифицировать оба полюса магнита. Например, внесением северного полюса магнита достигается имитация тока утечки электролизера, внесением южного – имитация электромагнитного поля анода.

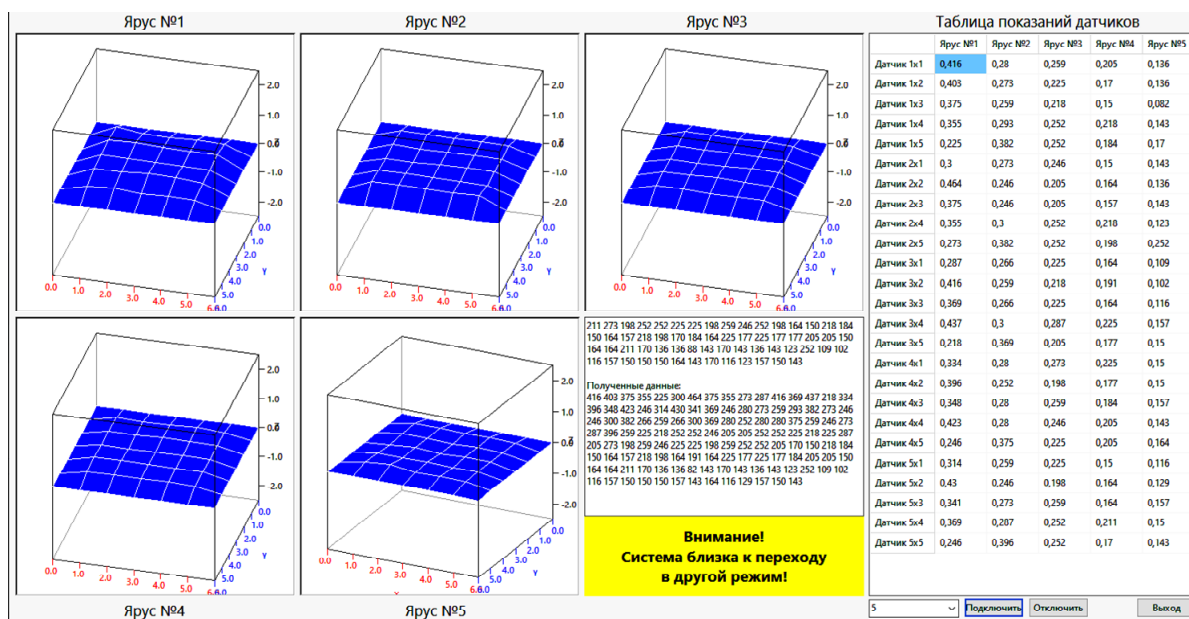


Рис. 3. ИС мониторинга при отсутствии внешнего источника поля (скриншот окна прикладного приложения)
 Fig. 3. Monitoring system in the absence of an external field source (screenshot of the application window)

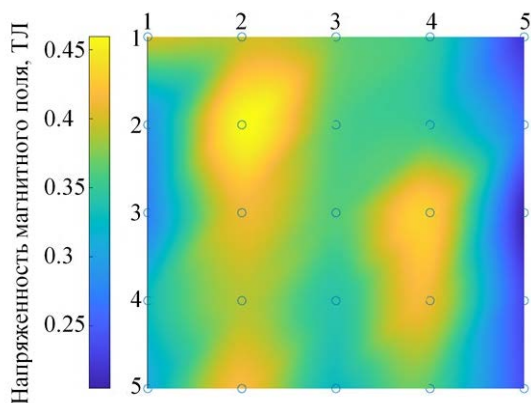


Рис. 4. Слой 1 в MatLab при отсутствии внешнего источника поля
Fig. 4. Layer 1 in MatLab in the absence of an external field source

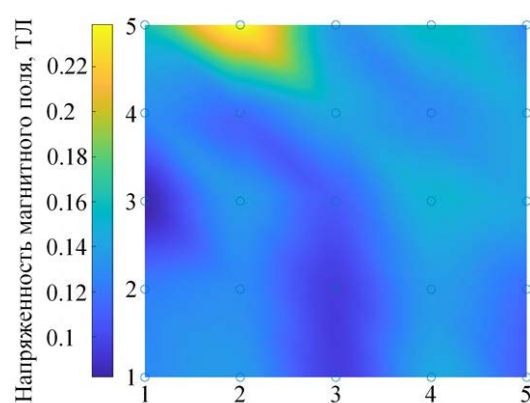


Рис. 5. Слой 5 в MatLab при отсутствии внешнего источника поля
Fig. 5. Layer 5 in MatLab in the absence of an external field source

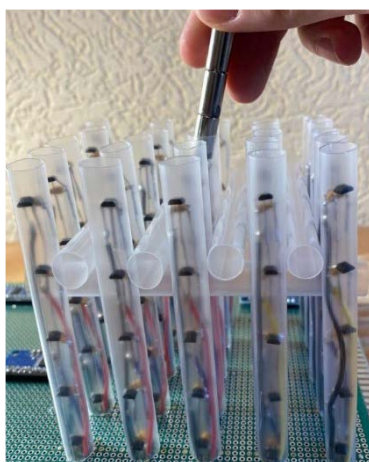


Рис. 6. Внесение постоянного магнита цилиндрической формы в зону действия датчиков
Fig. 6. Insertion of a cylindrical permanent magnet into the sensor area

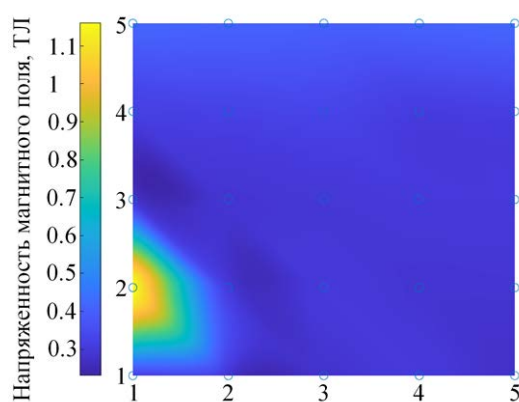


Рис. 7. Интерполяционная модель распределения ЭМП второго слоя при южном полюсе цилиндрического магнита из MatLab
Fig. 7. Interpolation model of the EMF distribution of the second layer at the south pole of a cylindrical magnet from MatLab

После внесения в зону действия датчиков постоянного магнита цилиндрической формы южным полюсом (рис. 6) вид трехмерных графиков изменяется (рис. 7). Таким образом достигается имитация ЭМП работающего анода.

Аналогично проверим реакцию системы сразу на несколько цилиндрических магнитов, внесенных как северным, так и южным полюсами (рис. 8, 9), имитируя электромагнитное поле анода и ток утечки.

На рис. 3 и 8 можно наблюдать работу модуля помощи принятия решений для оператора. Всего заложено 4 состояния: сигнализация о близости переходного процесса (рис. 3), о нормальном режиме работы (рис. 8), о критически высоких (рис. 10) или низких (рис. 11) значениях напряжений на датчиках. Последние два состояния сигнализируют о том, что требуется немедленное вмешательство в работу оборудования по какой-либо причине, например из-за выхода из строя оборудования.

Таким образом была доказана работоспособность ИС. Повышенное и пониженное напряжения на датчиках заслуживают отдельного внимания, так как они сигнализируют о неправильной работе оборудования электролиза, что требует немедленного вмешательства персонала для предотвращения аварийных ситуаций.

Обсуждение. В ходе научно-практического исследования было установлено, что при интерполяции данных можно увидеть целостную картину электромагнитного поля по площади ванны. Это означает, что от количества аналоговых датчиков электромагнитного поля напрямую зависит достоверность общей картины поля. Таким образом, увеличивая количество датчиков, можно достичь оптимальной степени достоверности, а значит, и гладкости трехмерных графиков. Однако такой подход ведет к существенному удорожанию системы мониторинга и повышению сложности ее монтажа.

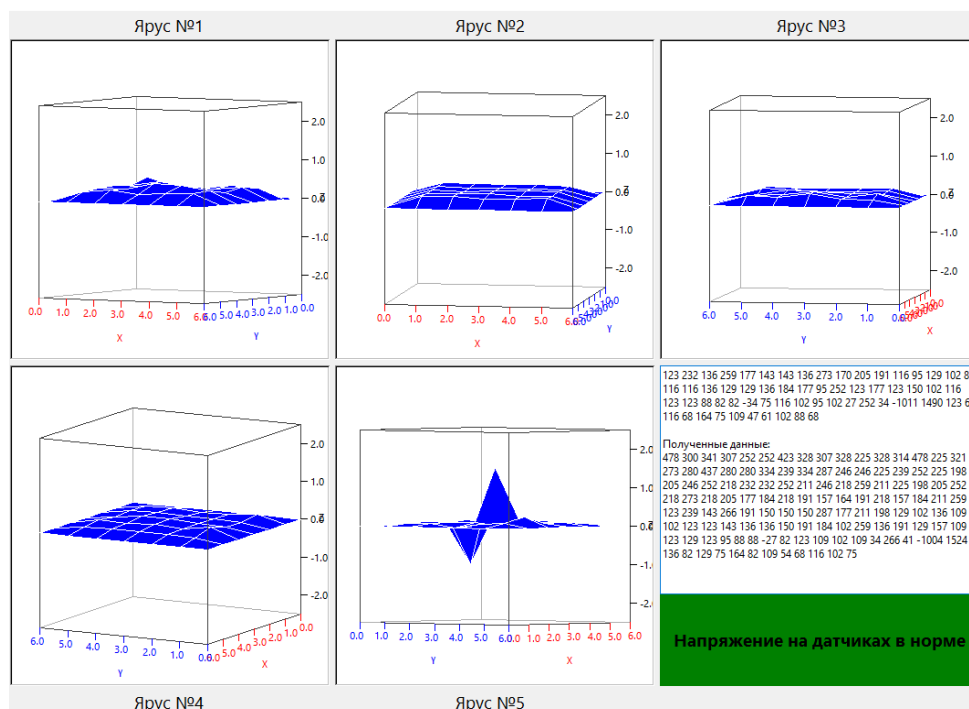


Рис. 8. Реакция системы мониторинга на имитацию тока утечки и ЭМП анода (скриншот окна прикладного приложения)

Fig. 8. The reaction of the monitoring system to the simulation of leakage current and EMF of the anode (screenshot of the application window)

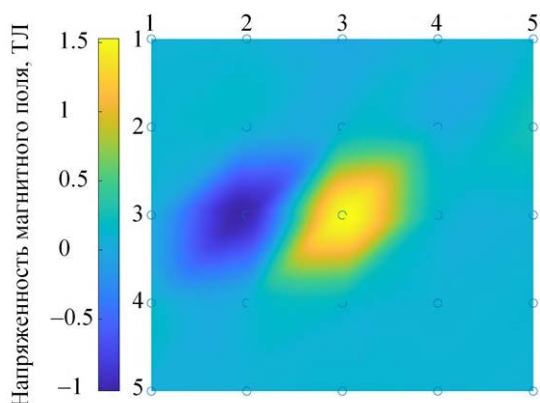


Рис. 9. Интерполяционная модель распределения ЭМП пятого слоя в MatLab в условиях тока утечки и ЭМП анода

Fig. 9. Interpolation model of the EMF distribution of the fifth layer in MatLab under conditions of leakage current and EMF anode

Целью дальнейших исследований стала модернизация ИС таким образом, чтобы на основании собранных данных можно было строить экстраполяционные модели, поскольку именно такой функционал необходим для обеспечения целесообразности внедрения данного технического решения на предприятия металлургической промышленности.

Заключение. В ходе исследования была разработана информационная система ЭМП, основным элементом которой стал пространственно распределенный датчик ЭМП, с помощью которого возмож-

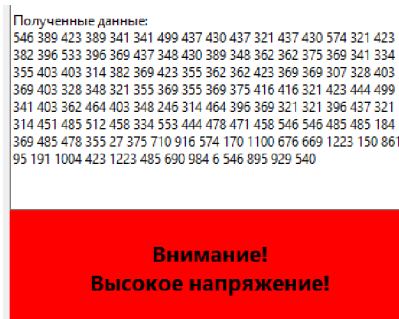


Рис. 10. Сигнализация оператору о критически высоких значениях напряжения на датчиках (скриншот окна прикладного приложения)

Fig. 10. Signaling to the operator about critically high voltage values on the sensors (screenshot of the application window)

на идентификация характеристик электромагнитного поля объекта исследования. Программный модуль данного проекта состоит из двух частей.

Прикладное приложение осуществляет прием собранных ранее данных. На основе таких данных программа визуализирует характеристики электромагнитного поля объекта исследования. Визуализация осуществляется выводом на экран 5 трехмерных графиков, позволяющих наглядно оценить характеристики рассматриваемого поля.

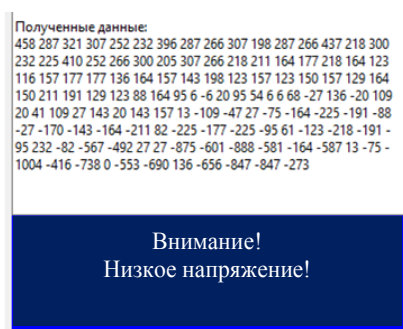


Рис. 11. Сигнализация оператору о критически низких значениях напряжения на датчиках (скриншот окна прикладного приложения)

Fig. 11. Signaling to the operator about critically low voltage values on the sensors (screenshot of the application window)

Прикладное приложение позволяет оценить состояние поля благодаря не только графикам, но и специальному элементу, оповещающему тек-

стовой информацией пользователя о ходе технологического процесса электролиза в целом. Помимо прочего, собранная информация представляется на экране еще в одном удобном для восприятия человека виде – табличном. Также ведется непрерывная запись полученной информации в журнал, имеющий табличный вид.

Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие корректность теоретических заключений. Выполнена интерполяция экспериментально полученных данных, что позволило построить целостную картину электромагнитного поля энергетической установки.

Список литературы

1. Растяжникова Е. В. Мировой рынок ресурсов цветной металлургии // Восточная аналитика. 2020, № 3. С. 109–130. doi 10.31696/2227-5568-2020-03-109-130.
2. Повышение эффективности технологической подготовки производства комплектующих для изготовления оборудования минерально-сырьевого комплекса / И. Н. Хрусталева, С. А. Любомудров, Т. А. Ларионова, Я. Ю. Бровкина // Зап. Горного ин-та. 2021. Т. 249. С. 417–426. doi: 10.31897/PMI.2021.3.11.
3. Трокоз Д. А., Трусов Е. В. Система мониторинга. Структура и основные компоненты // Тр. междунар. симп. «Надежность и качество». 2018, Т. 1. С. 214–215.
4. Коротков М. А. Развитие мировой металлургии // Науч. сообщество студентов XXI столетия. Экономические науки: сб. ст. по материалам ХСII студ. междунар. науч.-практ. конф., Новосибирск, 03 авг. 2020 г. Новосибирск: Общество с огр. ответственностью «Сибирская академическая книга», 2020. С. 51–55.
5. Володькина А. А., Немчинова Н. В., Дрягин Д. В. Изучение влияния технологических параметров процесса электролиза на выход по току при производстве алюминия // Молодежн. вестн. ИргТУ. 2020, Т. 10, № 4. С. 64–68.
6. Болтабоев Б. Б., Ахмедов Ш. Б. Применение индукционных тигельных печей для плавки металлов // Науч. разработки: евразийский регион: Материалы Восьмой междунар. науч. конф. теоретических и прикладных разработок / отв. ред. Д. Р. Хисматуллин. М.: Инфинити, 2017. С. 100–102.
7. Горланов Е. С., Бричкин В. Н., Поляков А. А. Электролитическое производство алюминия. Обзор. Ч. 1. Традиционные направления развития // Цветные металлы. 2020 № 2. С. 36–41. doi: 10.17580/tsm.2020.02.04.
8. Tulyakov T., Afanaseva O. Development of a methodology for introducing robotic devices for technical inspection of power lines based on data mining // Intern. Scientific Forum on Sustainable Development and Innovation (WFSDI 2023). Ekaterinburg: Institute of Digital Economics and Law LLC, 2024. P. 2018–2026.
9. Афанасьев М. П., Тулякова Т. Ф. Автоматизированное проектирование компоновок мехатронного станочного оборудования с использованием программного комплекса Solidworks // Современная наука и инновации. 2022, № 4(40). С. 31–40. doi: 10.37493/2307-910X.2022.4.3.
10. Boronko E. A., Novozhilov I. M. Designing an information system for monitoring the electromagnetic field of a power plant // Proc. of the 2024 Conf. of Young Researchers in Electr. and Electronic Engin. (ElCon). St. Petersburg, 2024. P. 331–334. doi: 10.1109/ElCon61730.2024.10468204.
11. Боронко Е. А., Капустей 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.
12. Ilyushin Yu. V., Kapostey E. I. Developing a comprehensive mathematical model for aluminium production in a sodenberg electrolyser // Energies. 2023. Vol. 16, no. 17/ P. 6313. doi: 10.3390/en16176313.

Информация об авторах

Боронко Егор Андреевич – аспирант кафедры системного анализа и управления Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II. 21-я линия, д. 2, В. О., Санкт-Петербург, 199106, Россия.

E-mail: egor.boronko@mail.ru

Ильюшин Юрий Валерьевич – д-р техн. наук, доцент кафедры системного анализа и управления, Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, 21 линия, д. 2, Васильевский остров, Санкт-Петербург, 199106, Россия.

E-mail: ilyushin_yuv@pers.spmi.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9175-8751>

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

E-mail: novozhilovim@list.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2056-3930>

Ильюшина Алена Николаевна – преподаватель специальных дисциплин Санкт-Петербургского технического колледжа управления и коммерции. Б. Сампсониевский пр., д. 61, лит. А, Санкт-Петербург, 197341, Россия.

E-mail: lilyliya@mail.ru

Беляевский Олег Александрович – ведущий инженер ООО «Техноавтоматика» ОП, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Октябрьской Революции, стр. 20в, офис 3, 664007, Россия.

E-mail: vost-sibenergo@yandex.ru

Вклад авторов:

Боронко Е. А. – сборка пространственно-распределенного датчика ЭМП и разработка программной части ИС.

Ильюшин Ю. В. – разработка аппаратной части ИС.

Новожилов И. М. – общее руководство.

Ильюшина А. Н. – экспериментальные исследования.

Беляевский О. А. – консультирование по предметной области.

References

- Rastjannikova E. V. Mirovoj rynek resursov cvetnoj metallurgii // Vostochnaja analitika. 2020, № 3. S. 109–130. doi: 10.31696/2227-5568-2020-03-109-130. (In Russ.).
- Povyshenie jeffektivnosti tehnologicheskoy podgotovki proizvodstva komplektujushih dlja izgotovlenija oborudovanija mineral'no-syr'evogo kompleksa / I. N. Hrustaleva, S. A. Ljubomudrov, T. A. Larionova, Ja. Ju. Brovkina // Zap. Gornogo in-ta. 2021, T. 249. S. 417–426. doi: 10.31897/PMI.2021.3.11. (In Russ.).
- Trokoz D. A., E. V. Trusov Sistema monitoringa. Struktura i osnovnye komponenty // Tr. mezhdunar. simp. «Nadezhnost' i kachestvo». 2018, T. 1. S. 214–215. (In Russ.).
- Korotkov M. A. Razvitie mirovoj metallurgii // Nauchnoe soobshhestvo studentov XXI stoletija. Jekonomicheskie nauki: sb. statej po materialam XCI stud. mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Novosibirsk, 03 avg. 2020 g. Novosibirsk: Obshhestvo s ogr. otvetstvennost'ju «Sibirskaja akademicheskaja kniga», 2020. S. 51–55. (In Russ.).
- Volod'kina A. A., Nemchinova N. V., Drjagin D. V. Izuchenie vlijanija tehnologicheskikh parametrov procesa jelektroliza na vyhod po toku pri proizvodstve aljuminija // Molodezhnyj vestn. IrGTU. 2020, T. 10, № 4. S. 64–68. (In Russ.).
- Boltaboev B. B., Ahmedov Sh. B. Primenenie indukcionnyh tigel'nyh pechej dlja plavki metallov // Nauch. razrabotki: evrazijskij region: Materialy Vos'moj mezhdunar. nauch. konf. teoreticheskikh i prikladnyh razrabotok / otv. red. D. R. Hismatullin. M.: Infiniti, 2017. S. 100–102. (In Russ.).
- Gorlanov E. S., Brichkin V. N., Poljakov A. A. Jelektroliticheskoe proizvodstvo aljuminija. Obzor. Ch. 1. Tradicionnye napravlenija razvitija // Cvetnye metally. 2020 № 2. S. 36–41. doi: 10.17580/tsm.2020.02.04. (In Russ.).
- Tulyakov T., Afanaseva O. Development of a methodology for introducing robotic devices for technical inspection of power lines based on data mining // II Intern. Scientific Forum on Sustainable Development and Innovation (WFSDI 2023). Ekaterinburg: Institute of Digital Economics and Law LLC, 2024. P. 2018–2026.
- Afanas'ev M. P., Tuljakova T. F. Avtomatizirovanoe proektirovanie komponovok mehatronnogo stanochnogo oborudovanija s ispol'zovaniem programmno-go kompleksa Solidworks // Sovremennaja nauka i innovacii. 2022, № 4(40). S. 31–40. doi: 10.37493/2307-910X.2022.4.3. (In Russ.).
- Boronko E. A., Novozhilov I. M. Designing an information system for monitoring the electromagnetic field of a power plant // Proc. of the 2024 Conf. of Young Researchers in Electrical and Electronic Engin. (ElCon). St. Petersburg, 2024. P. 331–334, doi: 10.1109/ElCon61730.2024.10468204.
- Boronko E. A., Kapostej E. I., Novozhilov I. M. Razrabotka informacionnoj sistemy monitoringa jelektromagnitnogo polja metallurgicheskoy pechi // Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2023. T. 16, № 5. S. 33–48. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-5-33-48. (In Russ.).
- Ilyushin Yu. V., Kapostej E. I. Developing a comprehensive mathematical model for aluminium production in a sodberg electrolyser // Energies. 2023. Vol. 16, no 17. P. 6313. doi: 10.3390/en16176313. (In Russ.).

Information about the authors

Egor A. Boronko – postgraduate student of the Department of System Analysis and Management, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 21st line, bld. 2, Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: egor.boronko@mail.ru

Yurij V. Ilyushin – Cand. Sci. (Eng.), Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 21st Line, bld. 2, Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: ilyushin_yuv@pers.spmi.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9175-8751>

Igor M. Novozhilov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Automation of Control Processes of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: novozhilovim@list.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2056-3930>

Alena N. Ilyushina – Ph. D. in Engineering, Associate Professor of the Department of System Analysis and Management, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 21st Line, bld. 2, Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: lilyliya@mail.ru

Oleg A. Belyaevsky – Leading Engineer of LLC «Technoavtomatika» OJSC, Irkutsk region, Irkutsk, Otkrytorskaya Revolyutsiya St., bld. 20b, office 3, 664007, Russia.

E-mail: vost-sibenergo@yandex.ru

Authors' contribution:

Boronko E. A. – assembly of a spatially distributed EMF sensor and development of the software part of the IS.

Ilyushin Yu. V. – development of the IS hardware.

Novozhilov I. M. – general guidance.

Ilyushina A. N. – experimental research.

Belyaevsky O. A. – subject area consulting.

Статья поступила в редакцию 19.11.2024; принята к публикации после рецензирования 23.01.2025; опубликована онлайн 28.03.2025.

Submitted 19.11.2024; accepted 23.01.2025; published online 28.03.2025.
