

Анализ и идентификация электромагнитных полей пространственно распределенных систем управления

И. М. Новожилов^{1✉}, О. А. Беляевский²,
Ю. В. Ильюшин³, Т. В. Кухарова³, Е. М. Михайлова³

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² ООО «Техноавтоматика», Иркутск, Россия

³ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

✉ novozhilovim@list.ru

Аннотация. В процессе производства алюминия остро встает вопрос контроля состояния электромагнитного поля электролизера. В данном исследовании коллектив авторов ставит своей целью рассмотрение технической возможности идентификации и последующего анализа электромагнитного поля, формируемого сильноточными цепями электрического тока катодной и анодной ошиновки подключения электролизеров к общей схеме электропитания электролизной серии. Для этой цели авторы проанализировали технологический процесс производства (получения) алюминия, выявили места формирования электромагнитного поля, источники и области концентрации электромагнитных напряжений и разработали программно-аппаратный комплекс идентификации и анализа электромагнитного поля. Проведя ряд представленных в статье экспериментов, авторы подтвердили гипотезу исследования. По результатам проделанной работы сделан ряд выводов о перспективах исследования данного направления.

Ключевые слова: идентификация, система управления, алюминии, автоматизация

Для цитирования: Анализ и идентификация электромагнитных полей пространственно распределенных систем управления / И. М. Новожилов, О. А. Беляевский, Ю. В. Ильюшин, 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.

Original article

Analysis and identification of spatially distributed control systems electromagnetic fields

I. M. Novozhilov^{1✉}, O. A. Belyaevsky²,
Yu. V. Ilyushin³, T. V. Kukharova³, E. M. Mikhailova³

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

² Leading engineer of «Technoavtomatika» Ltd. OP, Irkutsk, Russia

³ Saint-Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

✉ novozhilovim@list.ru

Abstract. In the process of aluminum production, the issue of monitoring the state of the electromagnetic field of the electrolytic cell becomes acute. In this study, the team of authors aims to consider the fundamental possibility of identifying and subsequent analysis of the electromagnetic field formed by the busbar and the anode-cathode system of the cell. For this purpose, the authors analyzed the technological process of aluminum production, identified the places where the electromagnetic field is formed, and developed a hardware-software complex for identifying and analyzing the electromagnetic field. After conducting a number of experiments presented in the article, the authors confirmed the main objective of the study. Based on the results of the work done, a number of conclusions were made about the prospects for research in this area.

Keywords: analysis, identification, control system, aluminum, automation

For citation: Novozhilov I. M., Belyaevsky O. A., Ilyushin Yu. V., Kukharova T. V., Mikhailova E. M. Analysis and identification of spatially distributed control systems electromagnetic fields // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2022. Vol. 15, no. 2. P. 41–50. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-2-41-50.

Введение. Постоянно растущая конкурентная среда в сфере формирования стабильного спроса на продукцию промышленных предприятий требует внедрения новых технологий и инновационных способов производства более совершенных продуктов, имеющих лучшие потребительские качества и удовлетворяющих возрастающим требованиям и конъюнктуре современного потребительского рынка.

К основным элементам обновления производственных процессов, в которых закладываются конкурентные свойства будущих новых продуктов, относятся способы переработки исходного (минерального) сырья. На этапе получения обогащенных, концентрированных комплексов и компонентов для последующей переработки закладываются основные свойства готового товарного продукта, напрямую влияющие на формирование его качества и себестоимости [1].

На рынке представлены различные виды сырья в виде металлов, углеводородов, химических материалов, веществ и соединений, пластиков и других технологических материалов, качество которых наряду с их себестоимостью определяет оптимальную добавленную стоимость конечного продукта и его конкурентное положение на рынке.

Потребитель требует от производителя все более легких и качественных продуктов. В этих условиях растет значимость рынка легких металлов, и прежде всего алюминия. За последние двадцать лет рынок производства и потребления товарного алюминия увеличился в пять раз, а для любого увеличения производства обязательно требуется увеличение потребления энергии [2]–[4].

Алюминиевые заводы получают свою продукцию электрохимическим способом – электролизом расплавленных солей по методу Эру–Холла. Новейшие технологии получения алюминия в сверхмощных электролизерах с обожженными анодами значительно эффективнее технологии с электролизерами Содерберга, однако они имеют один существенный недостаток – отсутствие современных автоматизированных систем контроля полезного использования электроэнергии, в том числе диагностики электролизеров с функциями непосредственного онлайн-контроля

электрической проводимости и электромагнитного поля шинопроводов.

Металлургия алюминия – весьма энергоемкое производство с достижением доли электроэнергии в составе себестоимости алюминия-сырца на уровне до 25–55 %, что в свою очередь влияет на общую стоимость конечного продукта. Исходя из этого соотношения, эффективное и полезное потребление технологической энергии оказывается очень весомым, требующим сокращения его непроизводительных затрат [5].

Грядущая модернизация алюминиевой промышленности России и программа реконструкции алюминиевых заводов РУСАЛа предполагает переход на сверхмощные электролизеры. В связи с этим отсутствие системного контроля электрической проводимости шин, энергетических и электромагнитных параметров технологического тока становится все более актуальным, так как возросшее действующее значение тока оказывает прямое воздействие на электромагнитную гидродинамику расплава, а следовательно, и на технологический процесс в целом.

Для эффективного контроля указанных параметров необходима новая конструкция (модель) системы управления и контроля, следящая за полезным потреблением электроэнергии и ее непроизводительными потерями. Комплексное использование современных инструментов слежения позволит контролировать качество ведения энергетического режима электролизных серий, а способность системы видеть и учитывать эти параметры даст возможность существенно воздействовать на качество технологического процесса электролиза и количество выпущенного металла.

Постановка задачи. Основой существующего массового производства алюминия-сырца является электролиз расплавленных солей (электролита) в составе глинозема (Al_2O_3), криолита (Na_3AlF_6), и фтористого алюминия (AlF_3) в строго определенных технологических пропорциях [6], [7].

Процесс электролиза можно представить упрощенной моделью, в которой слой расплавленного металла, наработанный на подине электролизера, служит катодом. Над слоем расплавленного металла находится слой расплавленного

электролита, в который погружается самообжигающийся или обожженный угольный анод. На границе расплавленного металла и электролита происходит электролитическая диссоциация – процесс массопереноса металла из расплава. Ток подводится к аноду и, проходя через электролит, производит разложение глинозема в расплаве с выделением металла алюминия на катоде электролизера. Далее, проходя через конструктивные токоведущие элементы катода, через гибкие катодные спуски ток «стекает» на катодную ошиновку, которая определенным образом соединена с анодной ошиновкой следующего в серии электролизера.

Основную роль в формировании электромагнитного и электрического баланса электролизеров играют проводимость, распределение и плотность тока в цепях анодных и катодных шинопроводов. Электрический ток подводится к аноду электролизера по анодной шине от вертикальных анодных стояков, соединенных с катодной ошиновкой предыдущего электролизера по определенной схеме. Учитывая, что воздействие электромагнитного поля ошиновки прямо влияет на качество электролитического процесса, схема подключения анода и катода распределяет электрические токи по шинам таким образом, чтобы компенсировать вредные электромагнитные поля, вызывающие нестабильные и вредные гидродинамические процессы в электролизерах.

Рассмотрим структуру взаимосвязи электролизеров в серии. Для этого разберем формирование токов в трех электролизерах, последовательно подключенных в серию.

На рис. 1 видна схема подключения электролизеров в серию. Питание электрическим током электролизер получает от катодной ошиновки предыдущего электролизера. Ошиновка и катод исследуемого электролизера является питающим

для анода последующего электролизера по ходу течения тока в электролитной серии. Таким образом, результирующее магнитное поле исследуемого электролизера состоит из магнитных полей, формируемых конструкцией ошиновки анодных стояков (состоящей из сваренных пакетов шин и пакетов гибкого токоподвода), катодной ошиновкой предыдущего и последующего электролизеров, а также влиянием магнитного поля электролизеров соседнего ряда в корпусах с двухрядным их расположением. Таким образом, можно сформировать систему уравнений, описывающих комплексное магнитное поле. Однако разрабатываемая система уравнений потребует проверки на адекватность. В этом случае целесообразно провести экспериментальные исследования по замеру электромагнитного поля в электролизере. Существующие способы замера позволяют проводить точечный замер напряженности магнитного поля в конкретных точках. Такой способ не учитывает пространственную распределенность исследуемого объекта, и, как следствие, не позволяет учитывать динамическое распределение тока по всей поверхности электролизера. Важно отметить, что неоднородное электромагнитное поле вращает наработанный алюминий (что приводит к негативным последствиям для футеровки подины вплоть до ее разрушения и существенно снижает срок эксплуатации электролизеров) который, будучи самостоятельным элементом, формирует свое электромагнитное поле. Формируемые поля также влияют на процесс наработки алюминия, что задает индивидуальную динамику электролитического баланса для каждого электролизера.

Важно отметить, что при обеднении электролита возникают анодные эффекты, при которых напряжение в электролизере возрастает до 20...40 В. Они приводят к выделению большого количества теп-

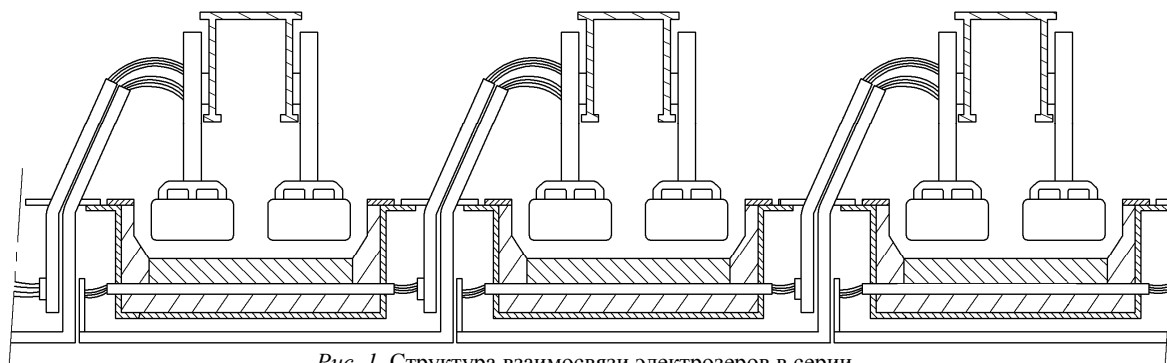


Рис. 1. Структура взаимосвязи электролизеров в серии
Fig. 1. The structure of the connection of electrolyzers in the series

ла и повышению температуры электролита, к снижению выхода по току, увеличению расхода электроэнергии и фтористых солей.

Таким образом, идентификация и, по возможности, управление электромагнитными полями электролизера позволит существенно повысить наработку алюминия и увеличить срок службы электролизера.

Методология исследования. История исследования процессов, протекающих в установках промышленного производства алюминия, началась с 1825 г. с работ физика Х. К. Эрстеда и математика Анри Этьена Сент-Клер Девиля. В 1827 г. в работу включился химик Фридрих Велер, которому удалось преобразовать электрохимический процесс и получить 29 г чистого алюминия. Данный метод показал возможность промышленного получения алюминия, и в 1856 г. появилось первое промышленное производство алюминия на заводе братьев Шарля и Александра Тиссье в Руане (Франция). В 1886 г. французский инженер Поль Эру и американский студент Чарльз Холл разработали принципиально новый способ получения алюминия. Разработанный электролитический способ стал основой для последующего промышленного производства. Впоследствии в 1920 г. данный способ был модернизирован Карлом Вильгельмом Содербергом, что привело к существенному удешевлению производства. За этим последовал большой рост производства и, как следствие, научно-технические исследования, направленные на совершенствование технологии получения алюминия. Основные работы в данной области принадлежат Ю. В. Борисоглебскому, А. И. Бегунову, М. В. Левину, Г. В. Архипову, М. М. Ветюкову, Б. И. Зельбергу, Р. Г. Локшину, А. Н. Купцову, П. А. Демькину, Е. П. Концуру, М. Я. Минцису, В. Х. Манн, Т. В. Пискажова, В. И. Скорнякову, В. И. Чалых, П. В. Полякову, А. И. Березину, И. В. Николаеву, В. В. Платонову, и многим другим. Исследования в данной области за рубежом ведутся рядом ученых: А. Заруни, Л. Мишра, Дж. Тонстад, М. Дупиус, В. Бояревич, и др.

Процессом мониторинга электромагнитного поля стали активно интересоваться в послевоенные годы. Ю. В. Борисоглебский, Б. И. Зельберг, Р. Г. Локшин, А. Н. Купцов, П. А. Демькин и др. показали возможности применения конечно-разностных методов к решению задач анализа электромагнитной составляющей ошиновки. Вместе с тем, они показали и невозможность точечной диа-

гностики падины. В ряде случаев это связано с техническим браком. В. И. Скорнякову, В. И. Чалых, П. В. Полякову и другим исследователям удалось показать, что учет производственного брака возможен в ряде случаев при соблюдении минимальной аппроксимации модели. Н. П. Савенкова, Р. Н. Кузьмин, С. В. Анпилов, А. В. Калмыков и другие разработали общую динамическую модель ванны электролизера и электромагнитных процессов в нем. Особо стоит отметить работы В. М. Белолипецкого, Т. В. Пискажова, описавших процесс получения алюминия дифференциальными уравнениями и А. В. Калмыкова, А. А. Кулешова, Н. П. Савенкова, описавших и промоделировавших электромагнитное поле электролизера программными средствами [8].

Для исследования электромагнитных полей существует два основных подхода: методы, базирующиеся на уравнениях Максвелла и их производных, и методы, в которых электромагнитное поле выражается в виде суммы операторов Фурье. Первый подход основывается на теории электрического поля:

$$E = \frac{\rho}{\epsilon_0},$$

где E – электрическое поле; ρ – полный заряд; ϵ_0 – начальная электрическая постоянная. Если μ_0 – начальная магнитная постоянная, то полное магнитное поле будет равно

$$B = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t},$$

где J – плотность магнитного потока; t – время, или в дифференциальном виде для однородной нейтральной непроводящей среды:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial z^2} = \epsilon \mu \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2},$$

где ϵ , μ – электрическая и магнитная постоянные. Модифицируя данное уравнение с помощью формулы Остроградского–Гаусса и теоремы Стокса, его можно представить в интегральном виде.

Второй подход описывает систему в статическом состоянии, для динамического описания которого может быть построена S-матрица с помощью ряда Дайсона, диаграммы Фейнмана и т. д.

В обоих случаях указанные подходы описывают поведение идеального электромагнитного поля во временном срезе. Представляя указанные

уравнения в виде системы, можно описать электромагнитный баланс электролизера. Для проверки адекватности данной системы необходимо разработать аппаратный комплекс, осуществляющий сбор, хранение и визуальное отображение электромагнитного поля. Для разработки указанного прибора необходимо совместить в едином комплексе несколько датчиков электромагнитного поля (например, датчиков Холла), подключить их к единой системе сбора информации и разработать программный продукт, осуществляющий визуальное отображение.

Разработка пространственно-распределенного датчика электромагнитного поля. В качестве блока управления разрабатываемого устройства (в лабораторных целях) целесообразно использовать микроконтроллер Arduino – Arduino MEGA. Это связано с низкой ценой, а также с использованием данного прибора на макете электролизера, где мощность электромагнитных токов не столь велика. Для идентификации магнитного поля в пространстве будем применять равноудаленно-расположенные датчики Холла SS49E. Жесткая фиксация местоположения датчиков даст возможность идентификации электромагнитного поля в фиксированных координатах декартовой сетки, что позволит в достаточной мере точно определить векторы электромагнитной напряженности. Для уменьшения количества соединений между датчиками Холла и платой управления в цепь интегрированы мультиплексоры CD4052BE. Они позволили сократить число используемых цифровых входов и существенно разгрузить монтажную плату от лишних соединительных элементов. Все элементы последовательно размещены на текстолитовой плате, представленной на рис. 2.

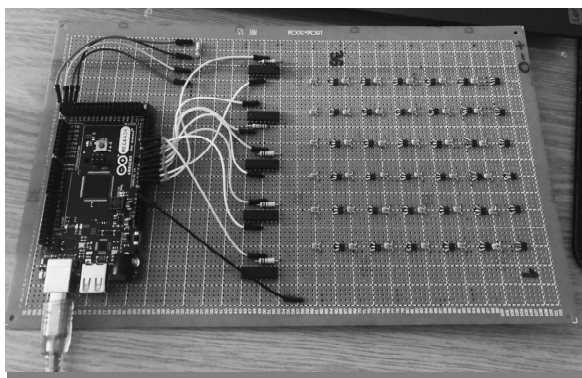


Рис. 2. Разработанный датчик электромагнитного поля
Fig. 2. Developed electromagnetic field sensor

Для микроконтроллера написана соответствующая программа опроса указанных датчиков. Опрос датчиков происходит параллельно по координате X. Фрагмент кода, осуществляющий опрос датчиков, представлен далее:

```
float voltage1 = (analogRead(A1) * 5.0)/1024.0;
float voltage2 = (analogRead(A2) * 5.0)/1024.0;
HALL_data[i] = (voltage0-
AVRG_VOLT)*mV_OUT;
HALL_data[i+(1*4)] = (voltage1-
AVRG_VOLT)*mV_OUT;
HALL_data[i+(2*4)] = (voltage2-
AVRG_VOLT)*mV_OUT;
```

Данные с разработанного датчика поступают на персональный компьютер по средствам интерфейса USB. Для ПК на языке Delphi разработан программный комплекс, осуществляющий получение информации с микроконтроллера через интерфейс COM+:

```
begin
CommPortDriver1.BaudRateValue:=9600;
CommPortDriver1.PortName:='\\.\Com4';
CommPortDriver1.DataBits:=db8BITS;
CommPortDriver1.Connect;
if CommPortDriver1.Connect=true then
begin
radiobutton1.Checked:=true;
end
end;
```

Полученные данные формируют таблицы для расчета векторов напряженности. Фрагмент программного кода построения таблиц представлен ниже:

```
for j1 := 2 to mas3-2 do
begin
elements[i1,j1]:=elements2[j1-2+(mas+1)*(i1-2)];
end;
for i1 := 0 to 1 do
for j1 := 0 to mas3 do
elements[i1,j1]:=0;
for i1 := mas3-1 to mas3 do
for j1 := 0 to mas3 do
elements[i1,j1]:=0;
```

После формирования таблицы векторов происходит визуальное отображение идентифицированного электромагнитного поля. Для решения этой задачи используется класс GLGraph. Пример его использования для оси X можно представить следующим фрагментом:

```
label3.Caption:=inttostr(count);
datepack := copy(data, 1, count);
delete(data, 1, length(datepack));
Memo1.Lines.Add(datepack);
Memo1.text := Memo1.Text + datepack;
data := copy(data, count+1, length(data));
i := strtoint(datepack[1]) + 1;
j := strtoint(datepack[3]) + 1;
```

```
count := LastDelimiter(':', datepack);
count := length(datepack) - LastDelimiter(':',
datepack) - 1;
test_str := (copy(datepack, LastDelimiter(':',
datepack) + 1, length(datepack) - 1 - LastDelimit-
er(':', datepack)));
napr := strtfloat(copy(datepack, LastDelim-
iter(':', datepack) + 1, length(datepack) - 1 - LastDe-
limiter(':', datepack)));
datepack := AnsiStrRScan(datepack, ':');
elements[i,j] := napr;
```

Для построения по осям Y и Z программный код выглядит идентично. Для расчета векторов напряженности используются классы Thread, GLVectorGeometry, GLVectorTypes, GLWin32Viewer. Пример расчетного фрагмента выглядит следующим образом:

```
procedure TForm1.Formula3_1(const x, y:
Single; var z: Single;
var color: TColorVector; var texPoint:
TTexPoint);
begin
z:=0.5/(1-
StrToFloat(hide_label1.Caption)+VectorNorm(GLSp
here1.position.X-x, GLSphere1.position.Y-y));
end;
```

Программный код формирует векторы падения токов относительно исследуемой точки. В конечном счете точный расчет данного вектора позволяет определить движение токов и, как следствие, дает возможность разработать систему управления электромагнитным полем. Результат работы программы представлен на рис. 3. Главное ее окно состоит из двух основных частей: левой – графической и правой – расчетной.

В левой части, в зависимости от заданной чувствительности датчика, происходит визуальное отображение сформированного электромагнитного поля. Данные отображаются в режиме реального времени.

В правой части программного модуля отображаются данные, поступающие с датчика (без разбиения для обеспечения фиксации нулевых точек), временной срез (для определения точек смены полярности, для определения точек утечки), срезы по координатной оси (для последующего расчета векторов напряженности).

Таким образом, разработанный программно-аппаратный комплекс мониторинга распределенного электромагнитного поля позволяет в режиме реального времени проводить мониторинг динамического электромагнитного поля.

Численный пример. В рамках проводимого исследования проведен ряд экспериментов для идентификации электромагнитного поля. В качестве генератора поля использовались реостат, дроссель и электромагнит. Методика эксперимента заключалась в определении уровня воздействия на датчик электромагнитного поля, графическом отображении его структуры. Основная задача эксперимента – подтвердить техническую возможность идентификации электромагнитного поля.

Электромагнитное поле, формируемое дросселем, показало наибольшую неоднородность. Это связано с конфигурацией токовых катушек, расположенных внутри дросселя. Для детального отображения продемонстрируем пространственно-распределенное поле в графическом виде на рис. 4, где на осях координат отмечены порядковые номера датчиков.

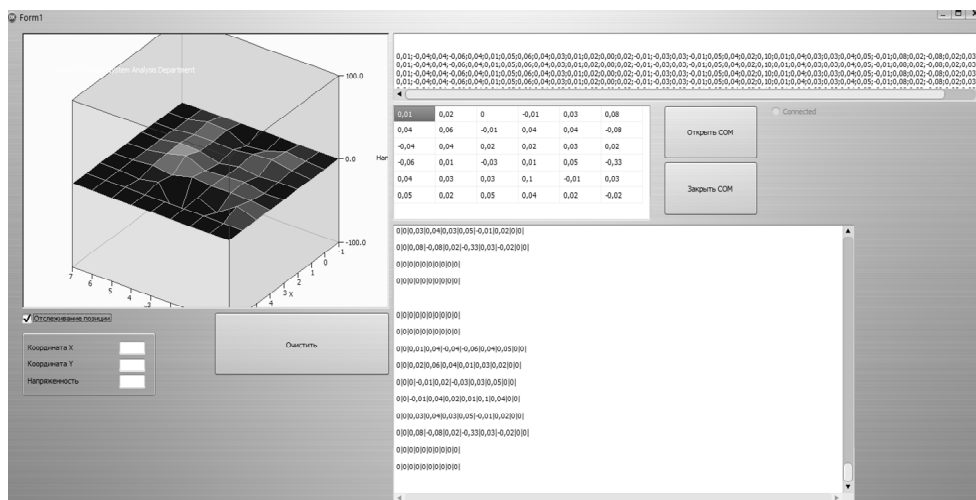


Рис. 3. Главное окно программы
Fig. 3. The main window of the program

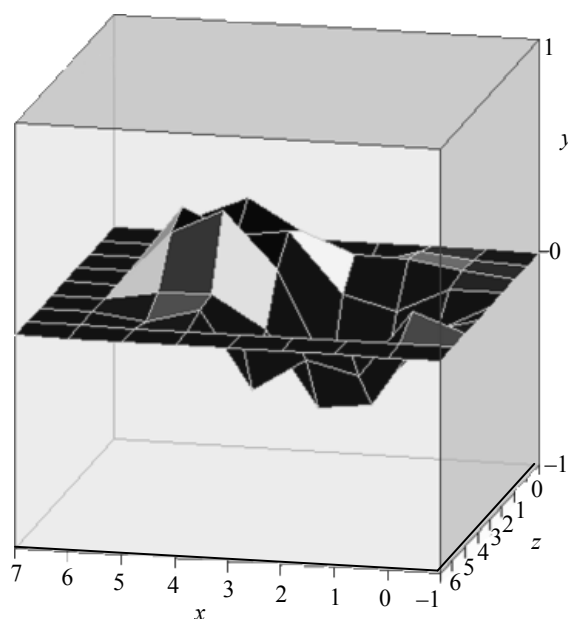


Рис. 4. Формирование точки перегиба
 Fig. 4. Forming an inflection point

Как видно из графика, в сформированном поле есть точки перегиба. Очевидно, они существуют из-за отсутствия у дросселя сердечника. Более наглядно это можно увидеть на временном срезе в табличном виде (табл. 1), где в столбцах обозначена координата x , в строках – координата z , а значения таблицы соответствуют координате y графика.

Из таблицы видно, что область, в которой должен быть расположен сердечник, находится в границах датчиков 1:3; 1:2; 1:1; 2:3; 2:2; 2:1; 3:3; 3:2; 3:1. Рассчитаем падение токов и построим векторы напряженности электромагнитного поля. Результат построения векторов можно увидеть на рис. 5. Этот результат показывает направления перетекания положительного заряда. Из рисунка видно, что векторы напряженности расположены неравномерно. Это говорит о неоднородности исследуемого объекта. Таким образом, гипотеза о возможности идентификации электромагнитного поля подтверждена.

Табл. 1. Значение электромагнитного поля дросселя
 Tab. 1. The value of the electromagnetic field of the throttle

Координаты датчика	6	5	4	3	2	1
1	0.01	0.03	0	-0.13	-0.07	0.09
2	0.04	0.07	0.12	-0.40	-0.43	-0.23
3	0.04	0.07	0.05	-0.38	-0.46	-0.17
4	0.05	0.17	0.23	0.12	0.10	0.33
5	0.08	0.31	0.20	0.38	0.05	0.04
6	0.05	0.21	0.32	0.26	0.04	0.03

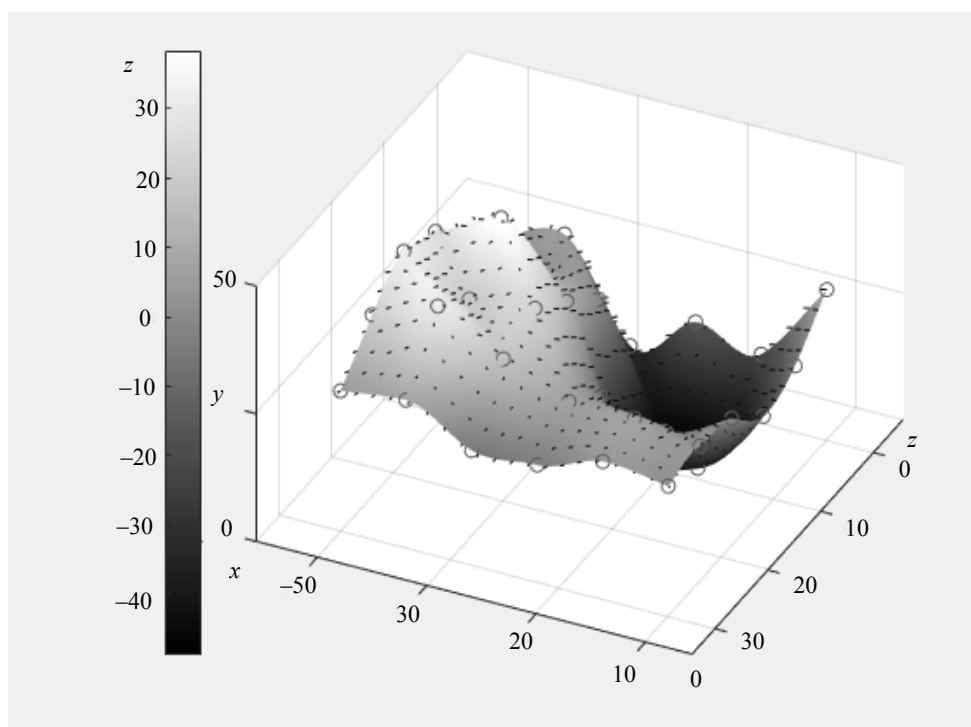


Рис. 5. График векторов напряженности электромагнитного поля дросселя
 Fig. 5. Graph of the electromagnetic field intensity vectors of the throttle

Табл. 2. Значение электромагнитного поля линейного источника
Tab. 2. The value of the electromagnetic field of a linear source

Координаты датчика	6	5	4	3	2	1
1	0.05	0	-0.03	-0.03	0.05	0.55
2	0.12	0.01	-0.01	-0.04	0.04	0.03
3	0.01	0	-0.01	-0.01	0.01	0.06
4	0.36	0.02	-0.02	-0.05	0.01	0.08
5	0	0.03	-0.07	-0.01	0.01	0.02
6	0.05	0.01	-0.01	-0.03	0	0.04

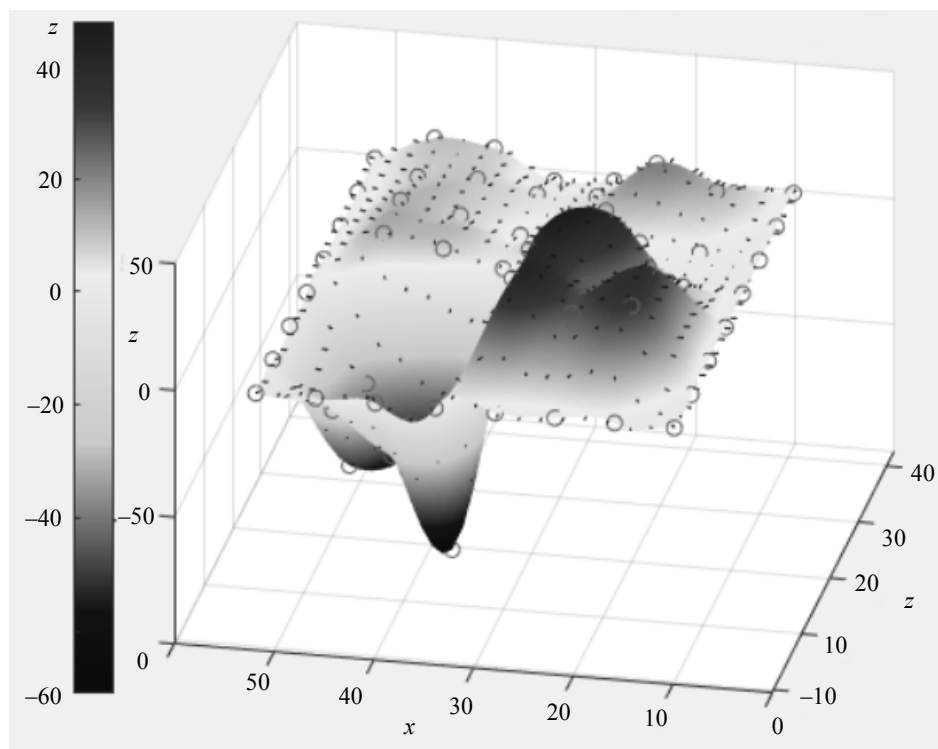


Рис. 6. График векторов напряженности электромагнитного поля линейного источника
Fig. 6. Graph of electromagnetic field intensity vectors of a linear source

Важно понимать, что для задач идентификации электромагнитного поля в электролизере необходимо идентифицировать и поле в ошиновке, а не только на катоде и аноде. Для этой цели с помощью реостата симитируем линейный (по площади) источник электромагнитного поля. Для наглядности эксперимента продемонстрируем результаты в табличном виде (табл. 2). Структура таблицы идентична табл. 1.

Как видно из табл. 2, реостат находился по координатам датчиков 1:4–6:4, 3:3–6:3 (первая цифра – это строка, вторая – столбец), что дает возможность утверждать, что разработанный датчик позволяет идентифицировать динамическое электромагнитное поле в линейном (по площади) источнике.

Как уже было сказано, электролизеры находятся достаточно близко друг к другу и оказывают существенное взаимное влияние. Кроме того, вклад в формирование результирующего поля вносят неоднородность ошиновки, недостатки технологических элементов и другие конструкционные особенности. Таким образом, поле электролизера включает в себя хаотичное влияние множества электромагнитных полей всех технологических элементов. Для проверки работоспособности датчика в таких условиях проведем эксперимент, в рамках которого к датчику будут подведены три разнородных генератора электромагнитного поля.

В рамках данного эксперимента получена векторная диаграмма сформированного электромагнитного поля (рис. 6).

Из рисунка видно, что программно-аппаратный комплекс позволил идентифицировать все объекты, генерирующие электромагнитное поле.

Обсуждение. В рамках данного исследования коллектив авторов продемонстрировал возможность идентификации электромагнитного поля в электролизерах Содерберга. Ранее такие исследования не проводились. Разработанный программно-аппаратный комплекс позволит идентифицировать векторы напряженности электромагнитного поля, тем самым создав предпосылки для создания системы управления полем. Однако, стоит отметить тот факт, что нестационарность электромагнитного поля требует мониторинга параметров в режиме реального времени, что затруднительно в условиях непрерывного производственного процесса. Коллектив авторов продолжит работу над решением данной проблемы. Также в статье получены зависимости распределения токов по шинам. Неоднозначность, продемонстрированная авторами на рис. 5, показывает, что анодная шина, состоящая из листового металла, пропускает электрический ток в разных направлениях по-разному. Данные результаты могут стать предметом отдельного исследования.

Заключение. Важность алюминия в современном обществе неоспорима, однако технологии производства алюминия с 1920 гг. изменились несущественно, несмотря на то, что были созданы более совершенные печи и системы автоматизации. Основная проблема данной технологии – невозможность управления электромагнитным полем.

При анализе реального состояния электромагнитного поля на производстве используются токовые клещи. Результат их замера заносится в таблицу и в последующем создается карта электромагнитного поля. Время создания данной карты может составлять до 4 ч. В современном электролизере время наработки алюминия доходит до 12 ч. Очевидна огромная погрешность данной методики расчета. В рамках данного исследования разработан датчик пространственно-распределенного динамического электромагнитного поля и программное обеспечение, необходимое для сбора, анализа и визуализации результатов измерений. Проведено множество экспериментов, в результате которых получены следующие результаты.

1. Подтверждена техническая возможность идентификации электромагнитного поля, формируемого электролизером.

2. Разработан программно-аппаратный комплекс диагностики электромагнитного поля.

3. Разработанный алгоритм расчета векторов напряженности электромагнитного поля позволит создавать карту электромагнитного поля в режиме реального времени и, как следствие, диагностировать электромагнитные и тепловые процессы в электролизере.

Разработанная программно-аппаратная система позволяет существенно сократить время диагностики электромагнитного поля. Полученные данные могут стать основой для создания регрессионных моделей, что составит предмет дальнейшего исследования.

Список литературы

1. Плавление и литье алюминиевых сплавов / В. И. Напалков, В. Ф. Фролов, В. Н. Баранов и др. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2020. 716 с.
2. Исаева Л. А., Михалев Ю. Г., Поляков П. В. Глинозем и его поведение в алюминиевых электролизерах. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2020. 232 с.
3. Пискажова Т. В., Донцова Т. В., Даныкина Г. Б. Математическое моделирование объектов и систем управления: учеб. пособие. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2020. 230 с.
4. Поляков П. В. Жизнь алюминиевого электролизера как диссипативной системы. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2018. 192 с.
5. Молдабаева М.: Н. Автоматизация технологических процессов и производств: учеб. пособие. М., Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. 224 с.

6. Горенский Б. М., Кирякова О. В., Лапина Л. А. и др. Информационные технологии в управлении технологическими процессами цветной металлургии. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. 148 с.

7. Евдокимов С. В. Система теоретических моделей взаимосвязанных процессов, протекающих на пористых оксидных рутениево-титановых анодах в условиях хлорного и хлоратного электролиза. М.: НИЦ ИНФРА-М, 2000. 520 с.

8. Куликов Б. П., Сторожев Ю. И. Пылегазовые выбросы алюминиевых электролизеров с самообжигающимися анодами. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. 268 с.

Информация об авторах

Новожилов Игорь Михайлович – канд. техн. наук, доцент СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: novozhilovim@list.ru

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

Беляевский Олег Александрович – ведущий инженер ООО «Техноавтоматика» ОП, г. Иркутск.
E-mail: vost-sibenergo@yandex.ru

Ильюшин Юрий Валерьевич – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой системного анализа и управления Санкт-Петербургского горного университета.
E-mail: ilyushin_yuv@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9175-8751>

Кухарова Татьяна Валерьевна – канд. техн. наук, доцент кафедры системного анализа и управления Санкт-Петербургского горного университета.
E-mail: Kukharova_TV@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5359-6763>

Михайлова Екатерина Михайловна – соискатель Санкт-Петербургского горного университета.
E-mail: prosvet83@rambler.ru

References

1. Plavlenie i lit'yo alyuminievykh splavov / V. I. Napalkov, V. F. Frolov, V. N. Baranov i dr. Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 2020. 716 s. (In Russ.).
2. Isaeva L. A., Mihalev YU. G., Polyakov P. V. Glinozem i ego povedenie v alyuminievykh elektrolizernykh. Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 2020. 232 s. (In Russ.).
3. Piskazhova T. V., Doncova T. V., Danykina G. B. Matematicheskoe modelirovaniye ob'ektov i sistem upravleniya: ucheb. posobie. Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 2020. 230 s. (In Russ.).
4. Polyakov P. V. ZHizn' alyuminievogo elektrolizera kak dissipativnoy sistemy. Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 2018. 192 s. (In Russ.).
5. Moldabaeva M. N. Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh processov i proizvodstv: ucheb. posobie. M., Vologda: Infra-Inzheneriya, 2019. 224 s. (In Russ.).
6. Gorenskiy B. M., Kiryakova O. V., Lapina L. A. i dr. Informatsionnye tekhnologii v upravlenii tekhnologicheskimi processami cvetnoy metallurgii. Krasnoyarsk: Sib. Fed. un-t, 2012. 148 s. (In Russ.).
7. Evdokimov S. V. Sistema teoreticheskikh modelej vzaimosvyazannykh processov, protekayushchikh na poristyykh oksidnykh rutenievo-titanovykh anodakh v usloviyakh hlornogo i hlornatnogo elektroliza. M.: NIC INFRA-M, 2000. 520 s. (In Russ.).
8. Kulikov B. P., Storozhev YU. I. Pylegazovye vybrosoy alyuminievykh elektrolizerov s samoobzhigayushchimisya anodami. Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 2012. 268 s. (In Russ.).

Information about the authors

Igor M. Novozhilov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: novozhilovim@list.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2056-3930>

Oleg A. Belyaevsky – Leading engineer of Technoautomatics LLC, Irkutsk.
E-mail: vost-sibenergo@yandex.ru

Yuriy V. Ilyushin – Dr Sci. (Eng.), Head of the Department of System Analysis and Management of St. Petersburg Mining University.
E-mail: ilyushin_yuv@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9175-8751>

Tatyana V. Kukharova – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of System Analysis and Management of St. Petersburg Mining University.
E-mail: Kukharova_TV@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5359-6763>

Ekaterina M. Mikhailova – the applicant, of Saint Petersburg Mining University.
E-mail: prosvet83@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 20.01.2022; принята к публикации после рецензирования 15.02.2022; опубликована онлайн 11.03.2022.

Submitted 20.01.2022; accepted 15.02.2022; published online 11.03.2022.
