

Моделирование технического состояния электролизера с помощью нейронных сетей

А. Н. Ильюшина
Санкт-Петербургский колледж управления и
коммерции
bdbyu@mail.ru

О. А. Беляевский
ООО «Техноавтоматика» ОП
vost-sibenergo@yandex.ru

И. М. Новожилов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
novozhilovim@list.ru

Аннотация. Измерение параметров работающего электролизера является трудоемкой задачей. Из-за наличия огромного количества внешних факторов точность измерения остается достаточно низкой. Для устранения данного недостатка авторы статьи предлагают размещение на электролизере большого количества беспроводных датчиков, данные с которых поступают в нейронную сеть. Сеть создана в системе MatLab, для последующего анализа. Сконфигурируемая таким образом система позволяет осуществлять мониторинг и прогнозирование технического состояния электролизера.

Ключевые слова: измерение, системный анализ, прогнозирование, управление, нейронная сеть

I. ВВЕДЕНИЕ

Производство алюминия является дорогостоящей и трудоемкой задачей. В большой мере это связано с наличием достаточно сложной технологической схемы производства, которая формирует, не только сам технологический процесс, но и множество объективных и субъективных факторов. Например, большое электромагнитное поле, формируемое электролизным процессом, делает невозможным определение параметров электролизера большинством видов датчиков. Та небольшая часть датчиков, которые возможны для использования, не способна сформировать единую картину измеряемых параметров. Для формирования единой системы чаще всего применяют SCADA- системы. Такие системы способны обрабатывать достаточно большое количество получаемой информации. Для масштабного и всестороннего анализа необходимо использование потенциала нейронных сетей. Сформированная нейронная сеть способна осуществлять множественный анализ и выдачу рекомендаций пользователю исходя из наилучшего сценария. Таким образом, разработка системы диагностики технического состояния электролизера с помощью нейронной сети является актуальной и наукоемкой задачей.

II. 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 [7–8].

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. Расплавленный металл и расплавленный электролит разделены между собой границей, на которой 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 оказывает прямое влияние 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 рассмотрим формирование токов в трех электролизерах, последовательно подключенных 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 электролизной 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 токопровода), катодной ошиновкой предыдущего и последующего электролизеров, а также влиянием магнитного поля электролизеров соседнего ряда в корпусах с двухрядным расположением электролизеров. 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 электромагнитного поля позволяют производить непосредственный 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 является самостоятельным элементом, формирующим свое электромагнитное поле. Формируемые поля также оказывают влияние 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 большому количеству выделяемого тепла и повышению температуры электролита, к снижению выхода по току, увеличению расхода электроэнергии и фтористых солей.

Таким образом, задача идентификации и, по возможности, управления электромагнитными полями электролизера позволит существенно повысить наработку алюминия и увеличить срок службы электролизера.

Исходя из общей задачи исследования, сформируем перечень задач, подлежащих решению.

1. Анализ предметной области.
2. Анализ технических решений.
3. Построение аппаратной части и нейронной сети.
4. Эксперимент.

Результатом выполнения указанных задач является готовое аппаратно-программное решение.

III. МЕТОДОЛОГИЯ РЕШЕНИЯ

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:

$$E = \frac{\rho}{\varepsilon_0},$$

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

$$B = \mu_0 * J + \mu_0 * \varepsilon_0 * \frac{\partial E}{\partial t},$$

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

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} = \varepsilon \mu \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}.$$

где ε_0 – электрическая постоянная, μ_0 – магнитная постоянная. 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.

IV. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА

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 вектора 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. Плата подключается к персональному компьютеру в

среду MatLab. В среде создается сеть Кохонена которую чаще всего называют «самоорганизующейся картой признаков». Сеть такого типа рассчитана на самостоятельное обучение, во время обучения сообщать ей правильные ответы необязательно. В процессе обучения на вход сети подаются различные образцы. Сеть улавливает особенности их структуры и разделяет образцы на кластеры, а уже обученная сеть относит каждый вновь поступающий пример к одному из кластеров, руководствуясь некоторым критерием «близости».

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

```
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:=intostr(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 - LastDelimiter(':', datepack)));
napr := strtofloat(copy(datepack, LastDelimiter(':',
datepack) + 1, length(datepack) - 1 - LastDelimiter(':', 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, GLWin3DViewer. 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(GLSphere1.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.

V. ЧИСЛЕННЫЙ ПРИМЕР

В рамках проводимого исследования проведен ряд экспериментов для идентификации электромагнитного поля. В качестве генератора электромагнитного поля использовались реостат, дроссель и электромагнит. Методика эксперимента заключалась в определении уровня воздействия на датчик электромагнитного поля, графическом отображении структуры электромагнитного поля. 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. (табл. 1). Из таблицы 1 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. Проведем расчет падения токов и построим вектора напряженности электромагнитного поля. Результат построения векторов показывает направления перетекания положительного заряда. Вектора напряженности расположены не равномерно.

ТАБЛИЦА 1

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	-0,4	-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	0,1	0,33
5	0,08	0,31	0,2	0,38	0,05	0,04
6	0,05	0,21	0,32	0,26	0,04	0,03

Это говорит о неоднородности исследуемого объекта. Таким образом, гипотеза о возможности идентификации электромагнитного поля подтверждена. 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 сымитируем линейный (по площади) источник электромагнитного поля. Для наглядности эксперимента продемонстрируем результаты в табличном виде (табл. 2). Структура таблицы идентична табл. 1.

ТАБЛИЦА 2

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

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

Сформуем с помощью нейронной сети карту напряженности электромагнитного поля. Результат можно наблюдать на рис. 1.

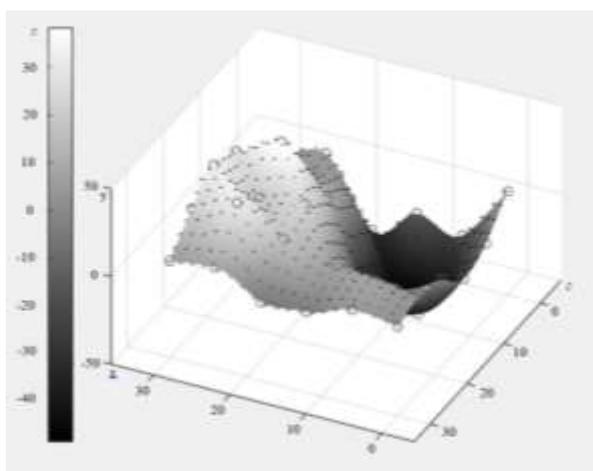


Рис. 1. Результат работы нейронной сети

Как видно из рис. 1 нейронная сеть позволила сформировать вектора напряженности электромагнитного поля.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данного исследования распространено применение нейронной сети для определения параметров электролизера (на примере электромагнитной составляющей). Нейронная сеть, в рамках данного

исследования, показала пространственное распределение электромагнитного поля. Что позволило определить вектора напряженности, а значит определять на каком из катодов идут токопотери. Важно понимать, что нейронная сеть смогла не только визуально отобразить текущее состояние электролизера, но и по векторам напряженности выдать рекомендации для дальнейшего устранения нарушений технологической схемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Андрейчиков А.В. Интеллектуальные информационные системы и методы искусственного интеллекта : учебник / А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова. Москва: ИНФРА-М, 2022. 530 с.
- [2] Pyushin Y.V., Afanaseva O.V. Development of scada-model for trunk gas pipeline's compressor station // Journal of Mining Institute, 2019, 240, стр. 686–693.
- [3] Пятаева А.В. Интеллектуальные системы и технологии : учеб. пособие / А.В. Пятаева, К.В. Раевич. Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2018. 144 с.
- [4] Nikolaev A.K., Dokoukin V.P., Lykov Y.V., Fetisov V.G. Research of processes of heat exchange in horizontal pipeline// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 327(3), 032041
- [5] Chernyshev A.B., Martirosyan K.V., Martirosyan A.V. Analysis of the nonlinear distributed control system's sustainability// Journal of Mathematics and Statistics, 2014, 10(3), стр. 316–321.
- [6] Martirosyan K.V., Chernyshev A.B., Martirosyan A.V., Tatyana K.V. Formation of the Anterior Heating Function under the Action of Uniformly Distributed Sources // Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2020, 2020, стр. 755–760, 9038947
- [7] Раннев Г.Г. Интеллектуальные средства измерений: учебник / Г.Г. Раннев, А.П. Тарасенко. Москва : КУРС : ИНФРА-М, 2020. 280 с.
- [8] Ereemeeva A., Kondrasheva N., Nelkenbaum K. Studying the possibility of improving the properties of environmentally friendly diesel fuels// Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues- Proceedings of the Russian- German Raw Materials Dialogue: A Collection of Young Scientists Papers and Discussion, 2019, 2020, стр. 108–113
- [9] Martirosyan A.V., Kukharova T.V., Fedorov M.S. Research of the hydrogeological objects' connection peculiarities// Proceedings of 2021 4th International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2021, 2021, стр. 34–38.
- [10] Kukharova T.V., Utkin V.A., Pershin I.M. Modeling of a Decision Support System for a Psychiatrist Based on the Dynamics of Electrical Conductivity Parameters// Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2021, 2021, стр. 975–978, 9396273
- [11] Plotnikova N.V., Skeeba V.Y., Martyushev N.V., Miller R.A., Rubtsova N.S. 2016 Formation of high-carbon abrasion-resistant surface layers when high-energy heating by high-frequency currents. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 156(1), 012022
- [12] Novoselov AG, Sorokin SA, Baranov IV, Martyushev NV, Rumiantceva ON, Fedorov AA. 2022 Comprehensive Studies of the Processes of the Molecular Transfer of the Momentum, Thermal Energy and Mass in the Nutrient Media of Biotechnological Industries, Bioengineering, 9(1), 18
- [13] Skeeba VY, Ivancivsky VV, Martyushev NV. 2021 Peculiarities of high-energy induction heating during surface hardening in hybrid processing conditions. // Metals, 11(9), 1354
- [14] Korshunov G.I., Ereemeeva A.M., & Drebenstedt C. (2021). Justification of the use of a vegetal additive to diesel fuel as a method of protecting underground personnel of coal mines from the impact of harmful emissions of diesel-hydraulic locomotives. Journal of Mining Institute, 247(1), 39-47. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.5>