



Разработка комплексной математической модели получения алюминия в электролизере Содерберга

И. М. Новожилов^{1✉}, С. Е. Абрамкин², О. А. Беляевский², Е. И. Капостей³

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

² ООО «Техноавтоматика» ОП, г. Иркутск, Россия

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

✉ novozhilovim@list.ru

Аннотация. Технологический процесс электролиза алюминия – сложная научно-техническая задача. Это обусловлено большим количеством внутренних, внешних и результирующих факторов. Цель статьи заключается в анализе этих факторов, оценке их влияния на технологический процесс электролиза, разработке комплексной и математической моделей получения алюминия в электролизере Содерберга. В статье решены следующие задачи: изучены характеристики объекта и приведено технологическое описание процесса получения алюминия, рассмотрено построение концептуальной и математической моделей на основе корреляционного анализа и экспертной оценки. В заключении приведены результаты математического моделирования.

Ключевые слова: математическая модель, электролизер Содерберга, концептуальная модель получения алюминия, корреляционный анализ, экспертные оценки

Для цитирования: Разработка комплексной математической модели получения алюминия в электролизере Содерберга / И. М. Новожилов, С. Е. Абрамкин, О. А. Беляевский, Е. И. Капостей // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 9. С. 12–30. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-9-12-30.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Development of a Complex Mathematical Model of Aluminum Production in the Soderberg Electrolyzer

I. M. Novozhilov^{1✉}, S. E. Abramkin², O. A. Belyaevsky², E. I. Kapostey³

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

² ООО «Technoautomatika» OP, Irkutsk, Russia

³ Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

✉ novozhilovim@list.ru

Abstract. The technological process of aluminum electrolysis is a complex scientific and technical task. This is due to a large number of internal, external and resultant factors. The purpose of the work is to analyze these factors, assess their impact on the technological process of electrolysis, and develop a complex and mathematical model for obtaining aluminum in the Soderberg electrolyzer. The following tasks are solved in the work: the

characteristics of the object are studied and a technological description of the aluminum production process is given, the construction of a conceptual and mathematical model based on correlation analysis and expert evaluation is considered. In conclusion, the results of mathematical modeling are presented.

Keywords: mathematical model, Soderbergh electrolyzer, conceptual model of aluminum production, correlation analysis, expert assessments

For citation: Novozhilov I. M., Abramkin S. E., Belyaevsky O. A., Kapostey E. I. Development of a Complex Mathematical Model of Aluminum Production in the Soderberg Electrolyzer // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2022. Vol. 15, no. 9. P. 12–30. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-9-12-30.

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

Введение. На сегодняшний день производство алюминия занимает второе место в мире после стали. С каждым годом спрос на металл увеличивается, поскольку он востребован в разных областях промышленности и техники [1]. Рост производства обеспечивают, в первую очередь, страны Азии и ближнего Востока. С начала 2002 г. Китай лидирует по выплавке алюминия, сегодня его производство занимает более половины от мирового. Индия и Россия разделяют второе место и выплавляют примерно равное количество металла [2].

Значение алюминия и его сплавов в жизни современного человека невозможно недооценить. Прежде всего он используется в авиационной и автомобильной отрасли промышленности, а также нашел широкое применение в машиностроении, приборостроении, электротехнической и химической промышленности и т. д. [3].

В природе в чистом виде алюминий не встречается. Развитие науки и появление электричества позволило человеку открыть алюминий лишь в XIX в., поэтому этот металл можно считать молодым. Около 150 лет человечество производит алюминий электролитическим способом, и все это время добивается улучшений в технологии его производства.

Промышленное производство первичного алюминия осуществляется в электролизерах посредством электролиза металлургического глинозема в расплаве криолита. В течение многих лет производства менялось конструктивное исполнение анодов, которые могут быть как предварительно обожженные углеграфитовые блоки, так и самообжигающиеся. Вариант с самообжигающимися анодами был предложен инженером К. Содербергом в начале 1920-х гг. С тех пор на протяжении практически ста лет на всех алюминиевых заводах мира используется данная технология, так как ее применение существенно снижает себестоимость алюминия.

Технология процесса зависит от многих параметров, значимость которых определяется в ходе разработки комплексной математической модели получения алюминия. Понимание протекающих в аппарате физико-химических процессов и измерение большинства параметров позволит автоматизировать процесс в большей степени [4]. Мировая задача математического моделирования получения алюминия заключается в визуализации всех процессов, а так как наиболее простой способ восприятия информации для человека – зрительное восприятие, то, следовательно, математическая модель электролизера Содерберга способна отчасти упростить человеку работу с эксплуатацией аппарата.

Неотъемлемое свойство математической модели – ее адаптивность и способность к эволюции. Именно этот показатель и является качественным результатом моделирования в широком масштабе. Комплексное математическое моделирование отражает изменение параметров не только в зависимости от расположения в пространстве, но и отображает его перемену во времени.

Таким образом, для улучшения управления и создания новых алгоритмов необходимо смоделировать сложный технологический процесс, который поможет качественно и оптимально контролировать зависимости между параметрами. Электролизер Содерберга – основная конструкция, применяемая на всех алюминиевых заводах мира, поэтому разработка математической модели перспективна и актуальна как в российском, так и в мировом масштабе.

Описание технологического процесса. Алюминий – это металл, который не существует в природе в свободном состоянии, поэтому его получают электролизом криолит-глиноземных расплавов в плоских ваннах, которые футерованы углеродистыми материалами. Криолит Na_3AlF_6 – это комплексная соль, она составляет 80–90 % всей массы электролита и представляет собой расплавленный

криолит. В качестве сырья для процесса электролиза используется оксид алюминия Al_2O_3 – глинозем, занимающий не более 5–8 % массы расплава, его получение осуществляется посредством переработки алюминийсодержащих металлов гидрохимическими методами. Это количество глинозема хорошо растворяется в электролите. Кроме того, в состав электролита входят до 6–10 % различных добавок: AlF_3 , CaF_2 , MgF_2 , $NaCl$, LiF , а также с исходными продуктами ряд оксидов, позволяющие улучшить характеристики электролита.

Криолит-глиноземный расплав очень агрессивен. Химическое взаимодействие электролита происходит практически со всеми материалами, кроме некоторых углеродистых. Молекулярное отношение фтористого натрия к фтористому алюминию, так называемое криолитовое отношение, важная характеристика состава электролита, обычно $\frac{NaF}{AlF_3} = 2.6...2.8$. При его изменении

уменьшается выход алюминия по току, поэтому во время электролиза важно поддерживать стабильный состав электролита.

Рассмотрим механизм электролиза. Диссоциация расплавленного криолита происходит с образованием положительно заряженных катионов натрия и отрицательно заряженных комплексных анионов. При температуре, равной температуре плавления алюминия, связи между алюминием и фтором в комплексных ионах могут разрываться, после чего происходит частичный распад комплексного иона на более простые ионы. При введении глинозема в расплав структура электролита значительно усложняется. Растворение глинозема сопровождается образованием в электролите акцепторных комплексов. Ионы алюминия и кислорода – сильные комплексообразователи, поэтому их существование в расплаве в свободном виде маловероятно.

В упрощенном виде электролит состоит из катионов натрия и комплексных ионов. Наиболее подвижные ионы натрия осуществляют перенос тока в ходе процесса электролиза. В сравнении с другими катионами ионы алюминия имеют наиболее положительный потенциал выделения, поэтому их разряд на катоде будет быстрее, что приводит к восстановлению алюминия из комплексного иона, содержащего алюминий.

Алюминий как более тяжелый по сравнению с электролитом (плотность алюминия – 2.3 г/см^3 , электролита – 2.1 г/см^3) накапливается на дне электролизера. Явление, происходящее у анода,

можно описать следующим образом: отрицательно заряженные анионы мигрируют к аноду, но сначала происходит разряд кислородного иона из комплексного аниона, имеющего более отрицательный потенциал разрядов, в это же время образуются промежуточные окислы в ходе адсорбции атомарного кислорода углеродом. Их разложение и десорбция газообразной углекислоты с поверхности анода – наиболее замедленная стадия, определяющая значительное перенапряжение на аноде.

Для поддержания рабочей температуры, равной $950...965 \text{ }^\circ\text{C}$, и разложения глинозема теоретически в процессе электролиза расходуются глинозем, углеродистый анод, фтористые соли и электроэнергия. В среднем, на получение 1 т алюминия-сырца расходуется порядка $14\,500 \text{ кВт/ч}$ электроэнергии. Фторид натрия и алюминия – компоненты электролита – в некоторой степени воздействуют на образовавшийся в ванне электролизера алюминий: натрий, проникая через слой алюминия в угольную подину ванны, разрушает углеродистые материалы, субфторид алюминия в процессе окисления углекислым газом в прианодном пространстве влияет на снижение выхода металла по току до 85–87 %. Помимо всего, реакция взаимодействия алюминия с компонентами электролита увеличивает содержание окиси углерода в анодных газах. На выход алюминия по току влияет также температура электролита. Поддержанию ее способствуют бортовые настывы и гарниссаж, играющие роль футеровки и терморегуляторов электролизеров. Температурный режим во многом зависит от межполюсного расстояния (МПР), обычно оно колеблется в пределах $4...6 \text{ см}$. Если его уменьшить, то сразу уменьшится расход тока на тонну алюминия, однако при этом возрастет вероятность обратного окисления металла анодными газами. Увеличение же расстояния ведет к перегреву электролита и нарушению нормального хода электролиза.

Во время электролиза состав электролита корректируется фторосолями. Для этого рабочие периодически отбирают пробы, которые затем поступают в лабораторию для кристаллооптического анализа. Важное значение имеет содержание глинозема в электролите: если его достаточно, он хорошо смачивает анод. Напряжение на ванне $4...4.5 \text{ В}$, газообразные продукты не удерживаются на поверхности анода и выходят из электролита в виде мелких пузырьков. При значительном обеднении электролита глиноземом

поверхность анода пассивируется, потенциал его возрастает, что приводит к разряду фторсодержащих ионов. В итоге смачивание анода уменьшается, а на его поверхности пузырьки образуют сплошную газовую пленку. Электросопротивление на границе анод–электролит увеличивается, напряжение скачком возрастает в 10 и более раз. На подшве анода появляются сильные искровые разряды – так, на ванне возникает анодный эффект. Чтобы его ликвидировать, в ванну вводят глинозем, а электролит тщательно перемешивают газами от сухой перегонки древесины. После этого нормальный режим восстанавливается.

Рассмотрим, как устроен агрегат для получения алюминия – электролизер Содерберга С8БМ (рис. 1).

Катодное устройство электролизера – это металлический кожух жесткой конструкции, футерованный изнутри шамотным кирпичом. Изнутри кожух ванны защищен угольными плитами и блоками, которые представляют собой теплоизоляцию. Катодные блоки, скрепленные чугуном со стальными стержнями, образуют подовые секции, которые укладываются на подушки из угольной подовой массы, в ходе чего получается полностью смонтированная подина алюминиевой ванны. Выше угольной подины располагается расплавленный слой алюминия, его поверхность и есть катод.

Над расплавленным слоем алюминия находится электролит. Процесс электролиза происходит в очень высоких температурах, поэтому катодное устройство должно быть устойчиво к таким агрессивным условиям, а также обладать такими свойствами, как тепло- и токоизолирован-

ность, электропроводность, долговечность работы и мобильность.

Анодное устройство электролизера состоит из 20 и более анодов, каждый из которых монтируется из предварительно обожженных угольных блоков, которые заливают чугуном стальные ниппели анододержатели. Анодное устройство проводит ток в место протекания процесса электролиза. Особыми винтовыми зажимами анододержатели крепятся к анодным шинам, выполняющим одновременно роль несущей рамы. Рама изолирована от катодного кожуха. С помощью электродвигателя, редуктора и домкрата рама может перемещаться в вертикальной плоскости. Во время электролиза по мере сгорания анодов рама опускается вниз.

В устройство анода устанавливаются штыри, которые подводят ток, а также стабилизируют электромагнитное поле электролизера, поскольку они сделаны из стали с примесью алюминия, который не обладает магнитными свойствами. Сами штыри прикреплены к анодной раме, что позволяет им сохранять горизонтальное положение анода.

Для автоматического регулирования положения анодов служит система «Алюминий-3». В процессе электролиза электроды сгорают. Когда снизу до стального ниппеля остается слой углерода толщиной в 12...13 см, огарок анода удаляют, а на его место устанавливают новый анод. Установка анода по глубине его погружения в электролит выполняется с большой точностью, так как от этого во многом зависит нормальная работа ванны. При этом соблюдается шахматный порядок расположения анодов. Рядом с каждым новым анодом обязательно должен стоять огарок. Это необхо-

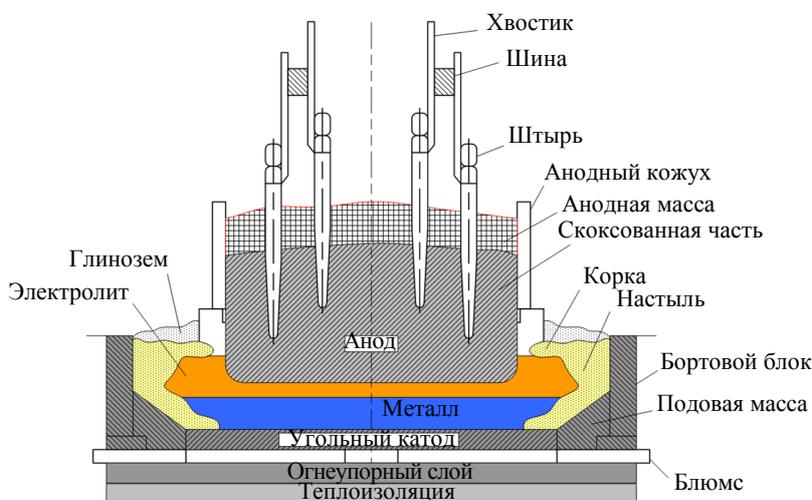


Рис. 1. Алюминиевый электролизер Содерберга С-8БМ с самообжигающимся анодом

Fig. 1. Soderbergh S-8BM aluminum electrolyzer with self-igniting anode

димо для равномерного распределения токовой нагрузки.

Выбор ошиновки очень важен, при одностороннем подводе тока магнитные поля создают перекося металла в ванне, что приводит к нарушению межполюсного расстояния и неравномерному сторанию анодов. Это снижает выход алюминия по току. Двусторонний подвод тока к аноду ослабляет магнитные поля, металл занимает горизонтальное положение, МПР не изменяется и процесс электролиза протекает нормально. Ошиновка электролизера выполнена следующим образом: сначала электрический ток идет по анодным стоякам к анодной шине и через анододержатели попадает в анодные блоки. С них ток проходит через электролит, нагревает его за счет джоулева тепла и осуществляет электролиз, а затем по катодной шине направляется к следующему электролизеру.

Металлоконструкция катодного кожуха отвечает за срок службы электролизера, и при ее разрушении электролизер подвергается капитальному ремонту, поэтому металлоконструкция должна компенсировать условия, возникающие в катодном устройстве.

Для того чтобы продлить срок службы электролизера, необходимо учитывать взаимодействие между отдельными его частями. Возникновение высоких напряжений приводит к образованию трещин в подине, поэтому важно с помощью компенсатора оставлять небольшое пространство для ее движения. Компенсатор – периферийные части футеровки и швов – заглушает усилия от катодного эффекта [5].

В процессе электролиза происходит выделение тепла в окружающую среду, в связи с этим расходуется электроэнергия. Теплоизоляционная футеровка катодного кожуха, обладающая конструкционной механической прочностью, помогает контролировать температуру расплава и противостоять воздействию компонентов расплава. Шамот, используемый как огнеупорный материал, препятствует попаданию электролита в пространство теплоизоляции.

Подовые блоки, изготавливаемые из углеродистых материалов и служащие катодом, монтируются в шахту электролизера. Они проводят ток и устойчивы к воздействию расплавленного алюминия и электролита.

Торцевые стороны электролизера имеют постоянную герметическую обшивку. Бортовые стенки обычно изготавливаются из таких же материалов,

что и подовые блоки, поэтому их свойства очень близки. Эффективность такого укрытия – 95 %.

Для защиты персонала от воздействия вредных газов электролизер имеет укрытие равносторчатого типа, закрепленного на шарнирах. При обработке электролизера створки укрытия электроприводом поднимаются и обеспечивают рабочим доступ к ванне. Обслуживание электролизеров включает ряд основных операций. Они ведутся строго регламентированно с помощью специальных машин и механизмов.

Анализ внешних и внутренних факторов. Объект исследования – электролизер Содерберга, сложная многосвязная система, поэтому все происходящие в нем и вне его процессы нельзя рассматривать обособленно.

Процесс получения алюминия можно рассматривать как стационарный, поэтому задачи управления решаются в установившемся режиме. Это связано с тем, что электролизер обладает свойствами инертности, а особенности технологического процесса (ТП) подразумевают постоянство состава сырья в течение определенного промежутка времени.

Условиями, в которых находится электролизер, нельзя пренебречь, так как они оказывают существенное влияние на конечный продукт.

В качестве основных параметров цеха, оказывающих влияние на электролизер, можно выделить следующие:

- влажность в цехе;
- пыль в цехе;
- температура воздуха в цехе;
- температура воздуха на улице, оказывающая влияние на температуру в цехе;
- уровень шума в цехе;
- уровень электромагнитного поля снаружи электролизера в отдельных точках;
- количество и расположение электролизеров в цехе.

Рассмотрим подробнее каждый из них.

В процессе работы в цехах алюминиевого производства происходит выделение сернистого газа и мельчайших частиц огарка. Побочные выделения при производстве алюминия негативно влияют на организм человека и окружающую среду [6]. Человек больше всего взаимодействует с глиноземом, криолитом, солями фтора, побочными выделениями и микроклиматом. Вследствие контакта с пылью от глинозема у человека развиваются хронические поражения дыхатель-

ных путей. Воздействие высоких температур и влажности усугубляется содержанием пыли в воздухе. Воздух электролизных цехов часто насыщен туманом серной кислоты и сульфата цинка.

Тепловое состояние электролизера зависит от потерь теплоты с его поверхностей в окружающую среду, суммарной теплоты, аккумулированной анодом и катодом в отдельности, а также от подведенной теплоты за счет сжигания топлива. Данное состояние описывается с помощью энергобаланса.

Тепловые потери на аноде и катоде при температуре воздуха на улице $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ стремительно увеличиваются, это доказано множеством экспериментов статического анализа теплового поля алюминиевого электролизера. При температуре окружающей среды $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ тепловые потери значительно уменьшаются. В связи с этим в зимний период увеличивается дополнительный расход топлива на каждом электролизере. Поддержание теплового и энергетического баланса способствует стабильной работе и долговременной эксплуатации электролизера.

Показатели температуры в основном незначительно влияют на качество готового продукта, но ими нельзя пренебречь, поскольку температура внутри электролизной ванны значительно выше температуры снаружи, и ее регулирование происходит за счет расплава и криолита.

Поскольку процесс получения алюминия еще не до конца автоматизирован, контроль и регулирование процесса осуществляется обслуживающим персоналом по результатам измерения параметров электролизера.

При использовании самообжигающихся анодов Содерберга уровень шума, вибрации и теплового излучения превышает гигиенические нормы. Такие условия труда соответствуют классам вредности 3.3–3.4, длительное нахождение на рабочем месте под негативным влиянием данных факторов может привести к непреднамеренным ошибкам и рискам [7].

При электролизном производстве алюминия ток по элементам электролизера течет вертикально вверх и вниз по анодам и стоякам, а также горизонтально вдоль и поперек ванны, поэтому магнитное поле в каждой точке ванны имеет сложную картину. Для электролиза алюминия необходимы высокие показатели силы тока, следовательно, элементы токоподвода настроены на высокоамперный ток и вокруг них создаются мощные магнитные поля. Направление электро-

магнитных сил зависит от направления токов при их взаимодействии, которое оказывает влияние на поверхность расплавленного металла и его направленное перемещение. Данный параметр значительно воздействует на конечный продукт, так как при больших показателях электромагнитного поля и источников его возникновения вращающий момент внутри электролизной ванны вызывает волнение металла [8].

Данные о конструкции электролизера с самообжигающимся анодом относятся к входным параметрам и являются константами в технологическом процессе.

В зависимости от размеров завода в электролизном цехе находится в среднем до 200 электролизеров, расположенных в два ряда. Длина и ширина одного корпуса достигает 700 и 27 м соответственно.

В средней части корпуса располагается транспортный соединительный коридор, через который осуществляются все транспортные технологические коммуникации, в том числе транспортировка металла, техники, сырья и других материалов. В торцевой части каждого цеха находятся площадки длиной до 35 м, называемые ремонтными технологическими зонами, где происходит ремонт основного и вспомогательного технологического оборудования. Внизу, на отметке «0» располагаются части основного оборудования, демонтированного, выведенного в ремонт или предназначенного к транспортировке. На отметке $+13.500\text{ м}$ расположены ремонтные зоны для технологического оборудования, обслуживающего электролизеры, – технологических грузоподъемных кранов-манипуляторов и монтажных кранов.

Особенности планировки электролизных цехов также влияют на качество технологического процесса и количество наработанного алюминия, поскольку количество и расположение соседних рядов электролизеров серии сказывается на значении и выраженном влиянии внешнего электромагнитного поля на магнитно-динамическую стабильность расплава в работающих соседних электролизерах серии.

Процесс электролиза внутри самого электролизера протекает под воздействием множества входных параметров, значения которых могут быть измерены, но возможность воздействовать на них есть не всегда. В процессе работы обслуживающий персонал выполняет технологические регламентные работы, определяя регламент об-

шего технологического процесса в корпусе и серии в целом. Все технологические манипуляции, совершаемые машинами и обслуживающим персоналом, относятся к управляющим воздействиям, определяющим обязательные регламентные работы в технологических циклах в рамках общего процесса электролиза.

Все измеряемые величины и параметры, полученные по математической модели: выход по току, расход энергии, количество выливаемого металла, рабочее напряжение, концентрация глинозема и т.п., – относятся к выходным (регулируемым) величинам. Также в ходе обслуживания и работы электролизера возникают случайные воздействия, к которым относятся загрузка сырья, выливка металла, смена анодных штыррей, корректировка процесса электролиза, замыкания и колебания: тока и температуры расплава, температуры наружного воздуха и химического состава сырья [9].

Основные показатели, отвечающие за эффективность ТП, – это выходы по току и по энергии [10]. Данные показатели определяются электроэнергетическими и не электроэнергетическими параметрами.

К неэлектроэнергетическим параметрам ТП относятся: глинозем, анодная масса, уровень и состав криолита, свойства и температура электролита, высота слоя технологического алюминия.

При электролитическом производстве алюминия в качестве основного сырья расходуется глинозем. Требования к его качеству достаточно высоки, поскольку он должен растворяться в расплавленном криолите и содержать как можно меньше электроположительных элементов, которые ухудшают качество конечного продукта. Глинозем подразделяется на несколько сортов, но в алюминиевой промышленности используется наиболее чистый состав, соответствующий первому сорту. Стоит также отметить, что частицы глинозема не должны быть слишком мелкими или крупными, так как во время загрузки мелкий глинозем сильно распыляется, а крупный слабо растворяется.

Криолит Na_3AlF_6 очень редко встречается в природе, поэтому на алюминиевых заводах используется искусственный технический криолит. Он состоит из фтористого натрия и избытка фтористого алюминия. Криолитовое отношение (КО) данной соли – основная характеристика состава электролита. В расплавленном состоянии при значении КО 2.6...2.8 наблюдаются наименьшие потери алюминия в электролите и наиболее вы-

сокие значения выхода по току (рис. 2). Добавление фтористого кальция и магния способствует снижению температуры плавления электролита, что, в свою очередь, позволяет уменьшить напряжение, поэтому их содержание в электролите не может быть более 10%. Содержание фтористых солей в расплавленном электролите не должно превышать допустимых значений, так как это может привести к нерастворенности глинозема [9].

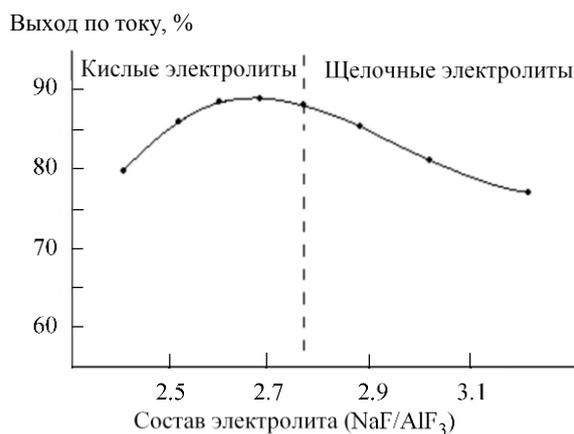


Рис. 2. Зависимость выхода по току от состава электролита

Fig. 2. Dependence of the current output on the composition of the electrolyte

Также фтористые соли повышают плотность электролита и расплавленного алюминия, что позволяет алюминию в процессе электролиза собираться на подине ванны под слоем электролита, так как плотность алюминия в расплавленном состоянии выше. Глинозем, содержащийся в электролите, а также фтористый кальций и магний повышают вязкость криолитовых расплавов, но CaF_2 и MgF_2 снижают его электропроводность. Температура ванны поддерживается благодаря джоулеву теплу, которое возникает при падении напряжения в слое электролита. Состав электролита корректируется содержанием фтористых солей.

Недостаточная концентрация в электролите глинозема и критическая плотность тока приводит к возникновению анодных эффектов (искровые разряды) на границе между электролитом и поверхностью погруженного в него анода. Но избыточное содержание глинозема в электролите (7–8%) приводит к образованию осадков. При частом возникновении анодного эффекта увеличивается расход электроэнергии и исходных материалов, поэтому необходимо контролировать их частоту.

На плотность тока влияют температура и природный характер солей, а также материал, из которого изготовлен анод. Температура плавления глинозема составляет 2050 °С, но применение добавок к электролиту позволило снизить температуру до 960 °С. Повышение температуры электролита уменьшает выход по току, но способствует растворению металла в расплавленном электролите (рис. 3) [10]. Поддержание нужной температуры необходимо для того, чтобы не нарушались плотности металла и электролита и картина процесса электролиза была стабильна.

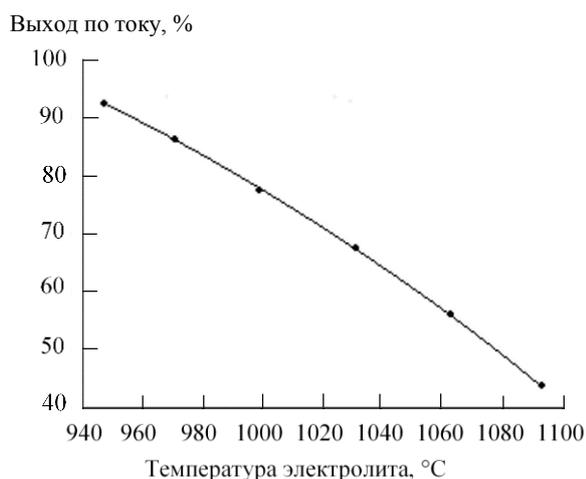


Рис. 3. Зависимость выхода по току от температуры электролита

Fig. 3. Dependence of the current output on the temperature of the electrolyte

Важно отметить, что температурные и механические возмущения приводят к разрушению подины и преждевременной поломке электролизера. Температурные колебания вызываются некачественным управлением тока серии и напряжением, а механические – некорректным проектированием электролизера.

Состав анодной массы на электролизерах Содерберга определяется требованиями для получения высоких технико-экономических показателей [5], поскольку напряжение, при котором происходит разложение глинозема, зависит от материала анода.

Выход по току – один из показателей, определяющих себестоимость конечного продукта. Высота слоя технического алюминия относится к факторам, оказывающим влияние на данный параметр, так как высота металла должна увеличиваться при повышении плотности тока. При снижении уровня металла анод погружается глубже и подвергается большей термической нагрузке, что способствует скорейшему расходу анодной массы. Обладая вы-

сокой теплопроводностью, алюминий отводит тепло через боковые стороны катодного кожуха, тем самым восстанавливая тепловое поле под анодом электролизера [6]–[9].

Энергетические входные параметры ТП – межполюсное расстояние (расстояние между электродами), напряжение на ванне электролизера, электромагнитное поле, вращающий момент, сила тока. Магнитное поле способно повлиять на результаты измерения, поэтому появляются погрешности. Эти параметры измеряются специальными приборами [10]–[13].

Для обеспечения необходимого межполюсного расстояния анод периодически опускают, так как в течение суток часть анода сгорает примерно на 2 см, окисление происходит из-за выделяющегося на поверхности анода кислорода. С помощью МПР и состава электролита регулируется падение рабочего напряжения на электролизере, качество выделенного тепла, скорость электрохимических процессов и т. п. Увеличение МПР приводит к возрастанию выхода по току и расходам электроэнергии, что влечет падение напряжения (рис. 4).

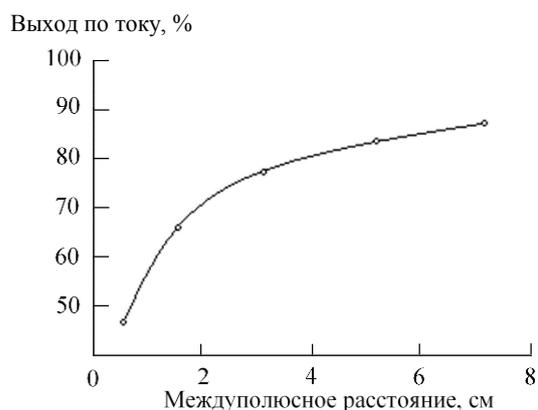


Рис. 4. Зависимость выхода

по току от межполюсного расстояния
Fig. 4. Dependence of the current output on the inter-pole distance

В цеху все электролизеры расположены последовательно, и регулирование тока на одном электролизере происходит с использованием подпиточных агрегатов. В течение ТП возникают анодные эффекты, колебание напряжения, происходит обработка электролизеров и т. д. – все это не позволяет силе тока оставаться постоянной. Выход по току напрямую зависит от плотности тока (рис. 5). При плотности тока выше допустимых значений наблюдается избыток содержания натрия в алюминии, а при уменьшении плотности может произойти полный или частичный разряд

катионов за счет уменьшения напряжения и обеднения электронов на катоде.

Экспертная оценка и обработка результатов методом корреляционного анализа. Взаимосвязь между параметрами объекта требует нового под-

хода в моделировании, так как данный процесс сложен и многосвязен, а многие предыдущие разработки разбивали систему на подпроцессы, для которых разрабатывались математические модели и затем связывались, поэтому синтезированная

Табл. 1. Технологические параметры электролизера и процесса производства алюминия
 Tab. 1. Technological parameters of the electrolyzer and the aluminum production process

Технологические параметры электролизера		Номер параметра		
Возмущающие воздействия и внешние параметры электролизера	Влажность в цехе	1		
	Температура воздуха в цехе	2		
	Температура воздуха на улице	3		
	Уровень шума в цехе	4		
	Флуктуации тока серии	5		
	Уровень электромагнитного поля снаружи электролизера в отдельных точках	6		
	Электромагнитное поле ошиновки соседних электролизеров цеха	7		
	Состав бригады, обслуживающей электролизер	8		
	Модель электролизера	9		
	Срок службы электролизера	10		
	Количество электролизеров в цехе	11		
	Расположение электролизеров в цехе	12		
	Конструктивные параметры электролизера	Глубина	13	
		Длина	14	
		Ширина	15	
Внутренние параметры электролизера и процесса электролиза	Электроэнергетические параметры электролизера	Сила тока электролизной серии	16	
		Токораспределение на отдельном электролизере	17	
		Плотность тока	18	
		Падение напряжения на отдельных элементах	в аноде	19
			в катоде	20
			в ошиновке	21
			в электролите	22
			в результате анодных эффектов	23
		Напряжение разложения	24	
		Мощность электролизной серии	25	
		Электромагнитное поле ошиновки электролизера	26	
		Электромагнитная сила, действующая на расплав	27	
	Вращающий момент, возникающий из-за перепада напряженности расплава	28		
	Характеристика глинозема	29		
	Характеристика анодной массы	30		
	Уровень криолита	31		
	Крилитовое отношение	32		
	Состав криолита (электролита)	33		
	Содержание фтористого алюминия в криолите	34		
	Содержание фтористого кальция в криолите	35		
	Физико-химические свойства электролита	36		
	Температура электролита	37		
	Однородность температурного поля подины	38		
	Высота слоя технологического алюминия	39		
	Удельные расходы сырья	Удельный расход глинозема	40	
		Удельный расход анодов/анодной массы	41	
		Удельный расход фтористых солей	42	

Технологические параметры электролизера				Номер параметра
Входные параметры	Окружающая среда и внешние факторы	Технико-экономические факторы	Уровень промышленного производства	43
			Состояние технологии производства	44
			Источники электроэнергии	45
			Затраты на электроэнергию	46
			Тарифы на электроэнергию	47
			Затраты на импорт сырья	48
			Затраты на экспорт конечного продукта	49
			Трудовые ресурсы	50
			Наличие рынков сбыта	51
			Развитость транспортной системы	52
		Природные ресурсы	Бокситные месторождения	53
			Запасы воды	54
			Экологическая безопасность	55
Управляющие воздействия	Расход загружаемого глинозема		56	
	Изменение положения анодов		57	
Выходные параметры электролизера	Производительность электролизера		58	
	Количество алюминия в электролизере		59	
	Количество электролита в электролизере		60	
	Концентрация глинозема в электролите		61	
	Межполюсное расстояние		62	
	Количество анодных эффектов на электролизере		63	
	Выход по току		64	
	Рабочее напряжение		65	
	Количество тепла в электролизере		66	

математическая модель должна в целом отображать все взаимосвязи, происходящие в электролизере. Для получения математической модели системы и дальнейшей ее реализации на базе технических средств разрабатывается концептуальная модель процесса получения алюминия в электролизере Содерберга.

Выход по току, %

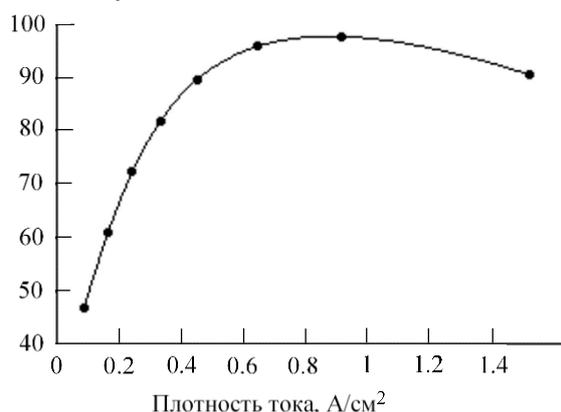


Рис. 5. Зависимость выхода по току от плотности тока
 Fig. 5. Dependence of the current output on the current density

Исходя из всех вышеперечисленных параметров, можно сделать результирующую таблицу (табл. 1), отображающую все параметры, влияющие

на КП электролиза алюминия, которая впоследствии будет отправлена на экспертную оценку.

Для построения концептуальной модели используется корреляционный анализ, он позволяет определить зависимость между переменными и их значимость. Оценки индивидуальны и основываются на мнении отдельных экспертов.

Принцип подбора экспертной комиссии следующий: эксперты, участвующие в оценке технологических параметров электролизера, должны обладать практическим и исследовательским опытом в сфере алюминиевой промышленности. При выборе экспертов важно учитывать их профессиональную компетентность, личную заинтересованность в результатах экспертной работы и конформность.

В качестве ответа от экспертов ожидается заполненная таблица и/или комментарии по проделанной работе. Проводя оценку степени значимости параметров, эксперт присваивает им ранговый номер по шкале от 1 до 10, где оценки имеют следующий смысл:

- незначительная важность 1–3;
- малозначительная важность 4–5;
- значимый 6–7;
- важный 8–10.

Таким образом, на основе полученных данных формируется сводная матрица (табл. 2), где x_i – порядковый номер параметра.

Табл. 2. Сводная таблица оценок экспертов
Tab. 2. Summary table of expert assessments

x_i	Эксперты				
	1	2	3	4	5
x_1	3	2	4	3	3
x_2	5	2	4	4	4
x_3	5	1	4	3	4
...
x_{67}	9	7	10	10	10

Всего заявлено 67 параметров, т. е. их идеальная сумма равна $2278 \left(\sum_{n=1}^{67} n \right)$. Переформиру-

ем ранги следующим образом: ранжируются снизу вверх согласно полученным оценкам, затем проводится поиск одинаковых оценок разных параметров. Далее складываются порядковые значения параметров (так, как они расположены по возрастанию, а не по нумерации) и делятся на количество параметров с одинаковым значением в этой категории (табл. 3):

$$\text{Ранг} = \frac{\sum(a_1, a_2, \dots, a_n)}{\sum(b_1, b_2, \dots, b_n)},$$

где a_n – порядковые номера по возрастанию значений; b_n – количество параметров с одинаковым значением в этой категории.

Данное значение считается рангом и присваивается всем параметрам в области одинаковой оценки. В табл. 3 приведено переформирование для одного эксперта, аналогичные вычисления производятся для остальных экспертов.

Подобным образом оценки переформируются в ранги для всех экспертов, а затем формируется сводная таблица рангов (табл. 4).

Табл. 3. Определение рангов, исходя из оценок
Tab. 3. Determination of ranks based on estimates

Параметр	x_i	Номер по возрастанию	Оценка эксперта	Ранг
Уровень шума в цехе	x_1	1	1	1.00
Количество электролизеров в цехе	x_2	2	2	2.00
Влажность в цехе	x_3	3	3	5.50
...
Температура электролита	x_{67}	67	9	64.00

Табл. 4. Сводная таблица рангов экспертов
Tab. 4. Summary table of expert ranks

x_i	Эксперты				
	1	2	3	4	5
x_1	5.5	4.5	8.5	6	4
x_2	14	4.5	8.5	11.5	8
x_3	14	1.5	8.5	6	8
...
x_{67}	64	56	52	58	64.5

Далее для каждого параметра высчитывается сумма рангов и рассчитывается коэффициент d (табл. 5):

$$d^2 = \left(R_i - \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (R_i)}{n} \right)^2 = \left(R_i - \frac{11\,390}{67} \right)^2 = (R_i - 170)^2,$$

где $d = (R_i - 170)$ – отклонение суммы рангов от средней арифметической суммы рангов; $n = 67$ – количество исследуемых параметров.

Расположение факторов по значимости осуществляется согласно суммарному рангу каждого параметра. Результат приведен в табл. 6.

Табл. 5. Расчет коэффициента d
Tab. 5. Calculation of the d coefficient

x_i	Эксперты					$\sum_{i=1}^{i=n} (R_i)$	d	d^2
	1	2	3	4	5			
x_1	5.5	4.5	8.5	6	4	28.5	-141.50	20 022.25
x_2	14	4.5	8.5	11.5	8	46.5	-123.50	15 252.25
x_3	14	1.5	8.5	6	8	38	-132.00	17 424.00
...
x_{67}	64	56	52	58	64.5	294.5	124.50	15 500.25
Σ	2278	2278	2278	2278	2278	11 390	0	357 322.50

Табл. 6. Расположение факторов по значимости
Tab. 6. Location of factors by importance

Номер по возрастанию суммы рангов	Параметр	x_i	$\sum_{i=n}^{i=1} (R_i)$
1	Влажность в цехе	x_1	28.5
2	Температура воздуха на улице	x_3	38
3	Количество электролизеров в цехе	x_{11}	39
...
67	Выход по току	x_{64}	305.5

Коэффициент конкордации:

$$W = \frac{S}{\frac{1}{12} m^2 (n^3 - n) - m \sum T_i},$$

где $S = \sum d_i^2 = 357\,322.5$ – суммирование квадратов отклонения суммы рангов от средней арифметической суммы рангов; $m = 5$ – количество экспертов;

$$T_i = \frac{1}{12} \sum (t_i^3 - t_i),$$

где T_i – число связей (видов повторяющихся элементов) в оценках i -го эксперта; t_i – количество элементов в одной связке для i -го эксперта (количество повторяющихся элементов);

$$T_1 = 1652; T_2 = 768; T_3 = 2700.5; T_4 = 1225.5;$$

$$T_5 = 879.5; \sum T_i = 7225.5;$$

$$W = \frac{357\,322.5}{\frac{1}{12} \cdot 5^2 \cdot (67^3 - 67) - 67 \cdot 7225.5} = 0.61.$$

При $W \geq 0.5$ существует согласованность мнений экспертов.

Далее оценивается значимость коэффициента конкордации, для чего исчисляется критерий согласованности Пирсона:

$$\chi^2 = \frac{S}{\frac{1}{12} mn(n+1) + \frac{1}{n-1} \sum T_i} =$$

$$= \frac{357\,322.5}{\frac{1}{12} \cdot 5 \cdot 67 \cdot (67+1) + \frac{1}{67-1} \cdot 7225.5} = 180.7.$$

Заданный уровень значимости α при числе выборки до 100 единиц равен 0.05.

Вычисленный χ^2 сравнивается с табличным значением для числа степеней свободы $K = n - 1 = 67 - 1 = 66$.

Расчетный $\chi^2 = 180.7$, он больше табличного (85.965), а значит, полученный коэффициент конкордации $W = 0.61$ – величина не случайная, поэтому полученные результаты имеют смысл и могут использоваться в дальнейших исследованиях.

Согласно табл. 6, вес (λ) каждого параметра рассчитывается, исходя из суммы рангов (R) всех экспертов. Для этого сумму сумм рангов примем за единицу и

$$\lambda_i = \frac{R_i}{\sum_{i=67}^{i=1} R_i}.$$

Далее рассчитан вес для первого параметра, остальные вычислены аналогично (табл. 7):

$$\lambda_i = \frac{28.5}{11\,390} = 0.00250219 \approx 0.003 = 0.3\%.$$

Согласно табл. 7, было принято решение взять в рассмотрение и считать значимыми только те параметры, которые, исходя из диаграммы Парето (рис. 6), имеют вес $\lambda \geq 0.0171$. Выбранные параметры представлены в табл. 8.

Табл. 7. Расчет весов параметров
Tab. 7. Calculation of parameter weights

Номер по возрастанию суммы рангов	Параметр	x_i	$\sum_{i=n}^{i=1} (R_i)$	λ_i
1	Влажность в цехе	x_1	28.5	0.0025
2	Температура воздуха на улице	x_3	38	0.0033
3	Количество электролизеров в цехе	x_{11}	39	0.0034
...
67	Выход по току	x_{64}	305.5	0.0268
	Σ		11 390	1

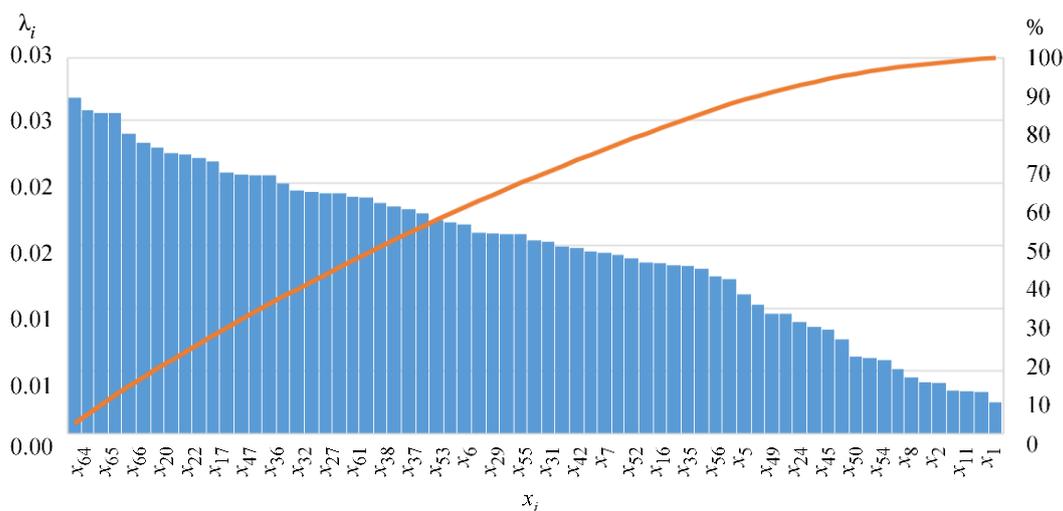


Рис. 6. Наиболее важные факторы, влияющие на эффективность технологического процесса
Fig. 6. The most important factors affecting the efficiency of the technological process

Табл. 8. Параметры, выбранные в качестве наиболее значимых для процесса электролиза
Tab. 8. The parameters selected as the most significant for the electrolysis process

Наименование параметра	x_i	$\sum_{i=n}^{i=1} (R_i)$	λ_i	Буквенное обозначение	Ед. изм.
Бокситные месторождения	x_{53}	192.5	0.0171	–	–
Затраты на электроэнергию	x_{46}	194.5	0.0173	C_p	р./МВт · ч
Температура электролита	x_{37}	200.5	0.0179	T_{elit}	°С
Количество алюминия в электролизере	x_{59}	204.5	0.0182	G_{Alt}	кг/с
Однородность температурного поля подины	x_{38}	207	0.0184	–	–
Удельный расход глинозема	x_{40}	210	0.0187	$g_{Al_2O_3}$	кг/кг _{Al}
Концентрация глинозема в электролите	x_{61}	215	0.0192	Al_2O_3	%
Состав криолита (электролита)	x_{33}	215.5	0.0192	$M_{доб}$	кг
Электромагнитная сила, действующая на расплав	x_{27}	218.5	0.0195	f	Н/см ³
Содержание фтористого алюминия в криолите	x_{34}	220	0.0196	AlF_3	%
Криолитовое отношение	x_{32}	221.5	0.0197	КО	–
Высота слоя технологического алюминия	x_{39}	227.5	0.0203	h_m	см
Физико-химические свойства электролита	x_{36}	235	0.0209	–	–
Плотность тока	x_{18}	235	0.0209	i	А/см ²
Тарифы на электроэнергию	x_{47}	236	0.0210	$Ц_{ээ}, Ц_p$	р./МВт · ч
Состояние технологии производства	x_{44}	237.5	0.0212	–	–
Токораспределение на отдельном электролизере	x_{17}	248	0.0221	K_H	–
Падение напряжения в аноде	x_{19}	251	0.0224	ΔU_{anode}	В
Падение напряжения в электролите	x_{22}	254	0.0226	ΔU_{elit}	В
Затраты на импорт сырья	x_{48}	255	0.0227	M	р./изд.
Падение напряжения в катоде	x_{20}	260.5	0.0232	ΔU_{cath}	В
Падение напряжения в ошиновке	x_{21}	265	0.0236	ΔU_{wire}	В
Количество тепла в электролизере	x_{66}	273	0.0243	Q'	Дж
Межполюсное расстояние	x_{62}	292	0.0260	L	см
Рабочее напряжение	x_{65}	292	0.0260	U_{work}	В
Температура электролита (на выходе)	x_{67}	294.5	0.0262	T_{elit}	°С
Выход по току	x_{64}	305.5	0.0272	η	мас. доли

На диаграмме Парето по оси ординат отложены веса параметров как в численном, так и в накопленном процентном выражении, а по оси абсцисс – сами параметры технологического процесса, расположенные в порядке убывания. Столбцы в начале диаграммы демонстрируют наиболее важные пара-

метры процесса, остальные, находящиеся за отделивающей кумулятивной кривой, остаются без изменений, поскольку их способность повлиять на итоги мала. Принимая во внимание важные факторы, можно сфокусировать внимание на устранении наиболее значимых проблем.

Построение концептуальной и математической моделей. Любое проектирование системы или написание программы начинается с этапа построения концептуальной модели объекта, которая представляет собой совокупность понятий, описывающих исследуемую область. При ее построении важен анализ научной литературы, который дает достаточно ясное представление о структуре объекта и элементах, находящихся во взаимосвязи.

Использование графического представления концептуальной модели более предпочтительно в сравнении с текстом, поскольку информация, выраженная диаграммой или схемой, наглядно демонстрирует направленность основных взаимосвязей.

Все входящие в концептуальную модель понятия конкретизируются и интерпретируются для того, чтобы построенная концептуальная модель могла служить основой для дальнейших разработок методик сбора данных и т. д. Некоторые термины используются в математических понятиях, что дает возможность описать их с помощью уравнений и формул.

Построение концептуальной модели основывается на данных, полученных на этапах экспертной оценки и формирования значимых параметров. Табл. 8 – результирующая и именно по ее выводам будет построена концептуальная модель. В качестве «центрального» объекта модели – рассматриваемый

процесс: электролиз алюминия, проходящий в электролизере Содерберга. В качестве важнейших параметров – параметры с наибольшим весом, приведенные в табл. 8 и относящиеся к группе входных и выходных параметров. Построенная концептуальная модель, отображающая значимые технологические параметры, представлена на рис. 7.

На основе вышепредставленного исследования по выявлению наиболее значимых параметров технологического процесса можно установить функциональные взаимосвязи между ними.

Стоит отметить, что большинство параметров имеют нелинейные связи, поэтому улучшение одного из них может привести к ухудшению другого. Не существует формулы, включающей одновременно все переменные ТП, но система из уравнений, описывающих отдельные показатели, способна отразить взаимосвязь между параметрами. Многие параметры описываются с помощью уже имеющихся законов и математических формул, но есть такая категория параметров, которая требует качественных описаний.

Математическая модель представляет собой систему уравнений, позволяющую оценивать и определять параметры технологического процесса, оказывающие влияние на основные показатели работы электролизера, а также устанавливать внутренние и внешние связи объекта:

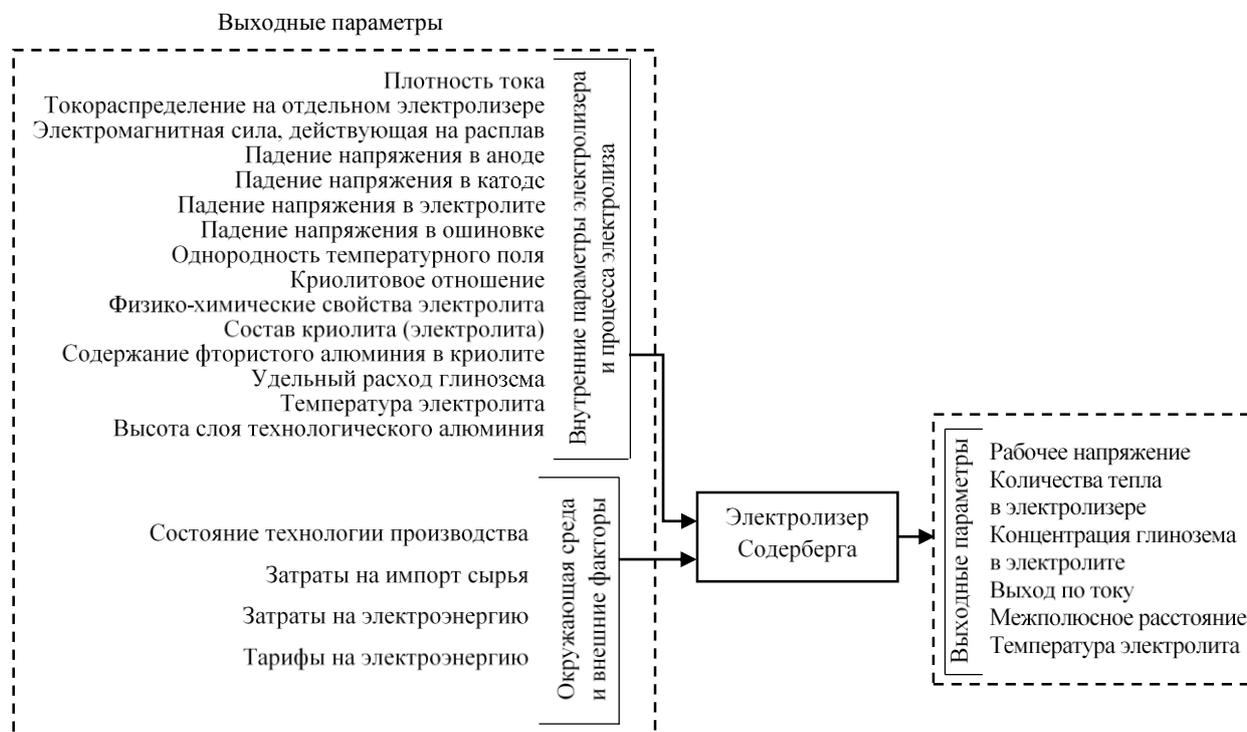


Рис. 7. Концептуальная модель получения алюминия
 Fig. 7. Conceptual model of aluminum production

$$\left. \begin{aligned}
 &1. M = \frac{H_p \Pi_M K_{T.3}}{1000}. \\
 &2. m_{\text{elit}} \frac{dC_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{dt} = \Delta G_{\text{Al}_2\text{O}_3} - k_{\text{Al}} G_{\text{Al}t}. \\
 &3. G_{\text{Al}t} = k_{\text{elchem}} I \eta. \\
 &4. \begin{cases} G_{\text{Al}_2\text{O}_3} = P_{\text{Al}} g_{\text{Al}_2\text{O}_3}; \\ G_a = P_{\text{Al}} g_a; \\ G_\phi = P_{\text{Al}} g_\phi. \end{cases} \\
 &5. M_{\text{доб}} = M_{\text{КО}} + M_{\text{ТЕМП}} + M_{\text{НОРМ}}. \\
 &6. h_m = X_{\text{ТФ-П}} - (X_{\text{ТФ-ТО}} + X_{\text{ТО-след}}). \\
 &7. \frac{dQ'}{dt} = Q_{\text{ener}} + \sum_i Q_{\text{in}} - \sum_j Q_{\text{out}} - Q_{\text{loss}} - Q_{\text{ch. eff}}. \\
 &8. m_{\text{elit}} c_{\text{elit}} \frac{dT_{\text{elit}}}{dt} = I^2 R - a_{\text{elit}} S_{\text{elit}} (T_{\text{elit}} - T_{\text{smelt}}) - \\
 &\quad - k_{\text{smelt}} S_{\text{elit}} S_{\text{bot}} (T_{\text{elit}} - T_0). \\
 &9. \begin{cases} f_x = 0.1 \cdot (i_y H_z - i_z H_y); \\ f_y = 0.1 \cdot (i_z H_x - i_x H_z); \\ f_z = 0.1 \cdot (i_x H_y - i_y H_x). \end{cases} \\
 &10. L = \frac{S_{\text{elit}} R_{\text{mpr}}}{\rho_{\text{elit}}}. \\
 &11. U_{\text{work}} = E + \Delta U_{\text{anode}} + \Delta U_{\text{cath}} + \Delta U_{\text{elit}} + \Delta U_{\text{wire}}. \\
 &12. \Delta U_{\text{anode}} = \left[26\,000 - \left(16\,000 - \frac{10.9 S_a}{n_{\text{pin}}} - 805 l_{\text{mid. pin}} - \frac{l_{\text{mid. pin}} S_a}{6.85 n_{\text{pin}}} \right) i_a \right] \rho_{\text{anode}} \cdot 10^{-3}. \\
 &13. \Delta U_{\text{cath}} = \frac{l_{\text{way}} \rho_{\text{block. kath}} \cdot 10^3 + (3.83 \cdot 10^{-2} b_{\text{cell}/2}^2 + 2.87 b_{\text{crust}}^{1/3}) b_{\text{block. kath}}}{S_{\text{kath. rod}}} i_a. \\
 &14. \Delta U_{\text{elit}} = \frac{I \rho_{\text{elit}} L}{S_a + 2(l_{\text{anode}} + b_{\text{anode}})(2.5 + L)}. \\
 &15. \Delta U_{\text{wire}} = \Delta U_{\text{a.wire}} + \Delta U_{\text{c.wire}} + \text{падение в контактах}. \\
 &16. i_{\text{a/ш/el}} = \frac{I}{S_{\text{a/o/Al}}}. \\
 &17. \eta = \frac{1 - 256\,700 S_a^{0.21}}{i_a^{0.58} L e^{1294/T_{\text{elit}}}}. \\
 &18. K_H = \frac{1}{I_{\text{cp}}} \sqrt{\left(\frac{1}{n}\right) \sum (I_i - I_{\text{cp}})^2}. \\
 &19. C_p = C_{\text{ээ}} + \left(\frac{\Pi_p}{24 N_d}\right),
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где M – затраты на импорт сырья, р./изд.; H_p – норма расхода материала на изделие, кг; Π_M – цена материала, р./т; $K_{T.3}$ – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы;

m_{elit} – масса расплава электролита, кг; $G_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ – концентрация глинозема в электролите, мас. доли; $\Delta G_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ – расход загружаемого глинозема, кг/с; k_{Al} – стехиометрический коэффициент реак-

ции разложения глинозема; G_{Al} – количество алюминия в электролизере, кг/с; $k_{elchem} = 0.009 \cdot 10^{-6}$ – электрохимический эквивалент алюминия, кг/А · с; I – сила тока на электролизере, А; η – выход по току, мас. доля; P_{Al} – производительность электролизера, кг/ч; $g_{Al_2O_3}$, g_a , $g_{ф}$ – удельный расход глинозема, анодной массы, фтористых солей, соответственно, кг/кг_{Al}; $G_{Al_2O_3}$, G_a , $G_{ф}$ – приход глинозема, анодной массы и фтористых солей соответственно, кг; $M_{доб}$ – общая (рассчитываемая) добавка фторосолей для коррекции КО и технологического состояния электролизера, кг; $M_{КО}$ – добавка по текущему КО (лабораторные данные), кг; $M_{темп}$ – добавка по температуре (измеренная величина), кг; $M_{норм}$ – добавка, учитывающая нормативный расход фторосолей, кг; h_m – высота слоя технологического алюминия, см; $X_{ТФ-П}$ – расстояние от точки фиксации до подины электролизера, см, определяется единожды при калибровке стержня, далее корректируется по мере износа подины электролизера не менее двух раз в год; $X_{ТФ-ТО}$ – расстояние от точки фиксации до точки отсчета, см, определяется единожды при калибровке стержня; $X_{ТО-след}$ – расстояние от точки отсчета до следа межфазной границы электролита с расплавленным алюминием, см, определяется при каждом замере высоты слоя расплавленного алюминия; Q' – количество тепла в электролизере, включая тепло плавления электролита, Дж; Q_{ener} – расход электроэнергии (электрическая мощность), Вт; Q_{in} , Q_{out} – тепло входных и выходных материальных потоков (глинозема, анода, углерода, алюминий, отходящие газы), Вт; Q_{loss} – поток теплотерь в окружающую среду, Вт; $Q_{ch.eff}$ – энергетический эффект всех химических реакций в электролизере (при реакционной температуре), Вт; k_{smelt} – коэффициент теплопередачи в зоне плавления, Вт/(м² · °С); S_{elit} – площадь контакта электролита с анодами, м²; T_{smelt} – температура в зоне плавления, °С; T_o – температура окружающей среды, °С; S_{bot} – суммарная площадь подины электролизера и анодов, м²; T_{elit} – температура электролита, °С; R – сопротивление

электролизера, Ом; a_{elit} – коэффициент теплоотдачи от электролита в зону плавления глинозема, Вт/(м² · °С); c_{elit} – теплоемкость электролита, Вт/(кг · °С); f_x, f_y, f_z – составляющие электромагнитной силы, действующей на расплав, Н/см³; i_x, i_y, i_z – составляющие плотности тока, А/см²; H_x, H_y, H_z – составляющие напряженности магнитного поля, А/м; L – межполюсное расстояние, см; S_{elit} – площадь сечения электролита, м²; R_{mpg} – сопротивление электролита в межполюсном расстоянии, Ом; ρ_{elit} – удельное сопротивление электролита, Ом · м; U_{work} – рабочее напряжение на электролизере, В; E – напряжение поляризации, В; ΔU_{anode} , ΔU_{elit} , ΔU_{cath} , ΔU_{wire} – падения напряжения в аноде, электролите, катоде и ошиновке соответственно, В; n_{pin} – количество токоведущих штырей, шт.; $l_{mid.pin}$ – среднее расстояние от всех токоведущих штырей до подошвы анода, м; ρ_{anode} – среднее удельное сопротивление анода, Ом · м; S_a – площадь анода, м²; l_{way} – длина пути тока по блоку, м; $\rho_{block.kath}$ – удельное электросопротивление катодного блока, Ом · м; $b_{cell/2}$ – половина ширины шахты ванны, м; b_{crust} – ширина настыва, м; $b_{block.kath}$ – ширина катодного блока с учетом шва, м; $S_{kath.rod}$ – площадь поперечного сечения катодного стержня с учетом чугуновой заливки, м²; $2(l_{anode} + b_{anode})$ – периметр анода, м; $\Delta U_{a.wire}$ – падение напряжения на анодной ошиновке, В; $\Delta U_{c.wire}$ – падение напряжения на катодной ошиновке, В; $i_{a/w/el}$ – анодная плотность тока, плотность тока в штырях и в электролите, А/м²; S_o – общая площадь штырей, мм²; S_{al} – площадь зеркала металла, см²; K_n – токораспределение на отдельном электролизере; I_i – текущее значение тока по i -му токопроводу, А; I_{cp} – среднее значение тока, А; n – количество ветвей; C_p – затраты на электроэнергию, р./МВт · ч; $N_d = 28, 29, 30, 31$ – число дней в месяце; $\Pi_{ээ}$ – цена электроэнергии, фиксируемой счетчиками, р./МВт · ч; Π_p – цена заявленной мощности, р./МВт · ч.

Наименования формул, входящих в математическую модель (1), приведены в табл. 9, описание переменных приведено в приложении. Получен-

Табл. 9. Название формул математической модели
Tab. 9. Name of mathematical model formulas

Номер формулы	Наименование формулы	Номер формулы	Наименование формулы
1	Затраты на сырье	11	Электрический баланс
2	Концентрация глинозема в электролите	12	Падение напряжения в анодах
3	Количество алюминия в электролизере	13	Падение напряжения в катоде
4	Приход материалов электролизную ванну	14	Падение напряжения в электролите
5	Контроль КО	15	Падение напряжения в ошиновке
6	Высота слоя расплав. Al	16	Плотность тока
7	Количество тепла в электролизере	17	Выход по току
8	Энергетический баланс	18	Коэффициент неравномерности распределения тока
9	Электромагнитные силы	19	Затраты на электроэнергию
10	Межполюсное расстояние	–	–

ные результаты могут быть использованы в качестве базы для разработки алгоритмов оптимального управления электролизером.

Обсуждение. Уровень технологического производства алюминия определяется областью совершенствования функционирования технологического процесса электролиза. Большинство методик оптимизации технологического процесса носят точечный локальный характер. В рамках данного исследования сделана попытка описания технологического процесса как динамического нестационарного процесса, имеющего большое количество возмущающих воздействий. Авторы, опираясь на работы в области пространственно-распределенных систем и теории системного анализа, проанализировали технологический процесс получения алюминия; достаточно подробно осветили входные, выходные и результирующие параметры электролизера с самообжигающимися анодами Содерберга; получили комплексную и математическую модели процесса электролиза.

Научный интерес данного исследования состоит в получении математической модели, отличающейся от существующих пространственной распределенностью, позволяющей определять технические параметры электролизера на любом этапе технологического процесса.

Производственный интерес исследования заключается в возможности технического контроля и прогнозирования развития технологического процесса. Современный электролизер – это очень динамический объект. Определение криалитового соотношения в лабораторных условиях занимает до 8 ч, а процесс наработки составляет 10...12 ч. Таким образом, результат определения теряет свою актуальность практически на этапе измерения. Косвенно о криолитовом соотношении можно судить по состоянию температурного поля. Но данный тип

измерения имеет большую погрешность. Представленная математическая модель уменьшает погрешность косвенного расчета на 7–10 %.

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

Заключение. Востребованность алюминия на современном рынке приводит к существенному росту производства. По оценке зарубежных экспертов, ежегодный прирост получения алюминия будет расти в среднем от 3–5 % ежегодно, что приведет к необходимости модернизации существующих производств. Эту задачу невозможно выполнить без комплексного понимания технологического процесса. В рамках данного исследования проведен анализ и разработана модель, позволяющая описывать каждый технологический процесс в связи с другими.

К основным результатам работы следует отнести следующее:

1. Приведено формализованное описание входных и выходных параметров, а также управляющих и возмущающих воздействий, на основании которых была сформирована результирующая таблица, отправленная на экспертную оценку. На основании полученных данных и результатов корреляционного анализа была построена концептуальная модель процесса получения алюминия в электролизере.

2. Построена математическая модель, которая основывается на ранее созданной концептуальной, что отражается в системе уравнений, которая позволяет определить степени влияния изменения отдельных параметров процесса на его конечные результаты и на качество получаемой продукции.

Таким образом, поставленные задачи были решены и цель работы была достигнута.

Список литературы

1. World Steel and Metal News, Prices and Market Analysis Since 1913 – Metall Bulletin. Информационный портал, посвященный анализу рынка металлов. URL: www.metalbulletin.com (дата обращения 16.03.2022).
2. Как устроен мировой рынок алюминия. Сайт об алюминии // Проект компании RUSAL, лидера мировой алюминиевой отрасли РУСАЛ. URL: https://aluminiumleader.ru/economics/how_aluminium_market_works/ (дата обращения 20.03.2022).
3. International Aluminium Institute. Информационный портал международного алюминиевого института, который посвящен производству технического и рафинированного алюминия. URL: <http://www.world-aluminium.org> (дата обращения 23.03.2022).
4. Минцис М. Я., Сиразудинов Г. А., Галевский Г. В. Электролизеры с анодом Содерберга и возможности их модернизации // Цветные металлы. 2010. № 12. С. 49–52.
5. Фитерман М. Я., Казаков Д. Р. Оперативное оценивание показателей процесса электролиза алюминия // Цветные металлы. 1990. № 12. С. 101–105.
6. Камкин В. А., Сафаров Р. З., Носенко Ю. Г. Проблема экологизации технологии получения алюминия электролизным способом // Материалы республиканской науч.-теор. конф. «Торайгыровские чтения». 2003. URL: <https://www.researchgate.net/publication/316511616> (дата обращения 15.03.22).
7. Гигиенические особенности химического загрязнения воздушной среды в производстве алюминия / Н. М. Мещакова, С. Ф. Шаяхметов, Л. Г. Лисецкая, А. В. Меринов, О. Л. Калинина // Бюл. Вост.-Сиб. науч. центра Сиб. отд-я Российской академии медицинских наук. 2016. Т. 1, № 3-1(109). С. 24–28.
8. Фитерман М. Я., Берх В. И., Локшин Р. Г. Пути повышения эффективности производства и улучшения организации труда при автоматизации предприятий алюминиевой подотрасли // Цветная металлургия. 1989. № 2. С. 1–11.
9. Петров П. А. Управление процессом электролитического получения алюминия с использованием алгоритма расчета ненаблюдаемых параметров. Дис. ... канд. техн. наук. СПб.: Гос. гор. ин-т им. Г. В. Плеханова, 2009. 190 с.
10. Гильдебрандт Э. М., Вершинина Е. П., Фризоргер В. К. Качество анодной массы в технологии электролиза алюминия с анодом Содерберга // Изв. вузов. Сер.: Цветная металлургия. 2014. № 1. С. 17–20.
11. Ильюшин Ю. В. Методы импульсного управления объектами с распределенными параметрами: специальность 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)»: дис. ... канд. техн. наук. Пенза: Юж. федер. ун-т, 2012. 170 с.
12. Анализ и идентификация тепловых полей пространственно распределенных систем управления / М. Ю. Шестопалов, И. М. Новожилов, А. Н. Ильюшина, Ю. В. Ильюшин // Изв. СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2021. № 9. С. 61–71.
13. Анализ и идентификация электромагнитных полей пространственно распределенных систем управления / И. М. Новожилов, О. А. Беляевский, Ю. В. Ильюшин и др. // Изв. СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2022. Т. 15, № 2. С. 41–50. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-2-41-50.

Информация об авторах

Новожилов Игорь Михайлович – канд. техн. наук, доцент СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: novozhilovim@list.ru

Абрамкин Сергей Евгеньевич – канд. техн. наук, СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: seabramkin@etu.ru

Беляевский Олег Александрович – ведущий инженер ООО «Техноавтоматика» ОП, стр. 20в, ул. Октябрьской Революции, г. Иркутск, Иркутская область, 664007, Россия.
E-mail: vost-sibenergo@yandex.ru

Капостей Екатерина Ивановна – магистрант Санкт-Петербургского горного университета.
E-mail: kapostey@yandex.ru

References

1. World Steel and Metal News, Prices and Market Analysis Since 1913 – Metall Bulletin. Informacionnyj portal, posvyashennyj analizu rynka metallov. URL: www.metalbulletin.com (data obrashcheniya 16.03.2022).
2. Kak ustroen mirovoj rynek alyuminiya. Sajt ob alyuminii // Proekt kompanii RUSAL, lidera mirovoj alyuminievoj otrasli RUSAL. URL: https://aluminiumleader.ru/economics/how_aluminium_market_works/ (data obrashcheniya 20.03.2022). (In Russ.).
3. International Aluminium Institute. Informacionnyj portal mezhdunarodnogo alyuminieвого instituta, kotoryj posvyashchen proizvodstvu tekhnicheskogo i rafinirovannogo alyuminiya. URL: <http://www.world-aluminium.org> (data obrashcheniya 23.03.2022). (In Russ.).

4. Mincis M. YA., Sirazutdinov G. A., Galevskij G. V. Elektrolizery s anodom Soderberga i vozmozhnosti ih modernizacii // Cvetnye metally. 2010. № 12. S. 49–52. (In Russ.).

5. Fiterman M. YA., Kazakov D. R. Operativnoe ocenivanie pokazatelej processa elektroliza alyuminiya // Cvetnye metally. 1990. № 12. S. 101–105. (In Russ.).

6. Kamkin V. A., Safarov R. Z., Nosenko YU. G. Problema ekologizacii tekhnologii polucheniya alyuminiya elektroliznym sposobom // Materialy respubl. nauch.-teor. konf. «Torajgyrovskie chteniya». 2003. URL: <https://www.researchgate.net/publication/316511616> (data obrashcheniya 15.03.22). (In Russ.).

7. Gigienicheskie osobennosti himicheskogo zagryazneniya vozdushnoj sredy v proizvodstve alyuminiya / N. M. Meshchakova, S. F. SHayahmetov, L. G. Li-seckaya, A. V. Merinov, O. L. Kalinina // Byul. Vost.-Sib. nauch. centra Sib. otd-ya Rossijskoj akademii medicinskih nauk. 2016. T. 1, № 3-1(109). S. 24–28. (In Russ.).

8. Fiterman M. YA., Berh V. I., Lokshin R. G. Puti povysheniya effektivnosti proizvodstva i uluchsheniya organizacii truda pri avtomatizacii predpriyatij alyuminievoj podotrasli // Cvetnaya metallurgiya. 1989. № 2. S. 1–11. (In Russ.).

9. Petrov P. A. Upravlenie processom elektroliticheskogo polucheniya alyuminiya s ispol'zovaniem algoritma rascheta nenablyudaemyh parametrov. Diss. na soiskanie uchenoj stepeni kand. tekhn. nauk. SPb.: Gos. gor. in-t im. G. V. Plekhanova, 2009. 190 s. (In Russ.).

10. Gil'debrandt E. M., Vershinina E. P., Frizorger V. K. Kachestvo anodnoj massy v tekhnologii elektroliza alyuminiya s anodom Soderberga // Izv. vuzov. Ser.: Cvetnaya metallurgiya. 2014. № 1. S. 17–20. (In Russ.).

11. Il'yushin YU. V. Metody impul'snogo upravleniya ob'ektami s raspredelennymi parametrami: special'nost' 05.13.01 «Sistemnyj analiz, upravlenie i obrabotka informacii (po otraslyam)»: dis. ... kand. tekhn. nauk. Pyatigorsk: YUzh. feder. un-t, 2012. 170 s. (In Russ.).

12. Analiz i identifikaciya teplovyh polej prostranstvenno raspredelennyh sistem upravleniya / M. YU. SHestopalov, I. M. Novozhilov, A. N. Il'yushina, YU. V. Il'yushin // Izv. SPbGETU LETI. 2021. № 9. S. 61–71. (In Russ.).

13. Novozhilov I. M., Belyaevskij O. A., Il'yushin YU. V. [i dr.] Analiz i identifikaciya elektromagnitnyh polej prostranstvenno raspredelennyh sistem upravleniya // 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

Igor M. Novozhilov – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor of Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: novozhilovim@list.ru

Sergey E. Abramkin – Cand. Sci. (Eng.), Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: seabramkin@etu.ru

Oleg A. Belyaevsky – Leading engineer of Technoautomatika LLC OP, p. 20v, Oktyabrskaya Revolyutsiya str., Irkutsk, Irkutsk region, 664007, Russia.
E-mail: vost-sibenergo@yandex.ru

Ekaterina I. Kapostey – master's student at St. Petersburg Mining University.
E-mail: kapostey@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 08.09.2022; принята к публикации после рецензирования 25.09.2022; опубликована онлайн 25.11.2022.

Submitted 08.09.2022; accepted 25.09.2022; published online 25.11.2022.
