

УДК 681.5.01+681.518

Обзорная статья

<https://doi.org/10.32603/2071-8985-2023-16-7-26-38>

## Аналитический обзор систем мониторинга электромагнитного поля установок получения первичного алюминия

И. М. Новожилов<sup>1✉</sup>, Е. А. Боронко<sup>2</sup>, Е. Б. Мазакон<sup>2</sup>,  
О. А. Беляевский<sup>3</sup>, В. С. Хлопонина<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> ООО «ТЕХНОАВТОМАТИКА», г. Иркутск, Россия

✉ novozhilovim@list.ru

**Аннотация.** Рассматриваются технологии, обеспечивающие подсистему АСУ ТП получения первичного алюминия. Представлен поэтапный анализ существующих технических решений, опирающихся на мировой и российский опыт эксплуатации электролизеров. Проведен анализ физических процессов работы электролизера, рассмотрено влияние физических процессов на химические. Проанализированы существующие датчики и системы мониторинга электромагнитного поля. Сформирован анализ воздействия электромагнитного поля на технологический процесс. Выявлены закономерности. Предложена методика оценки технического состояния электролизера по результатам диагностики электромагнитного поля. Представленное научное исследование является отчетной публикацией по программе «Философия науки».

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

**Для цитирования:** Аналитический обзор систем мониторинга электромагнитного поля установок получения первичного алюминия / И. М. Новожилов, Е. А. Боронко, Е. Б. Мазакон, О. А. Беляевский, В. С. Хлопонина // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 7. С. 26–38. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-7-26-38.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

## Analytical Review of Electromagnetic Field Monitoring Systems for Primary Aluminum Production Plants

И. М. Novozhilov<sup>1✉</sup>, Е. А. Boronko<sup>2</sup>, Е. В. Mazakov<sup>2</sup>,  
О. А. Belyaevsky<sup>3</sup>, V. S. Khloponina<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

<sup>3</sup> «Technoavtomatika» Ltd., Irkutsk, Russia

✉ novozhilovim@list.ru

**Abstract.** This article discusses technologies that provide subsystems of automated process control systems (APCS) for obtaining primary aluminum. The paper presents a step-by-step analysis of existing technical solutions based on the global and Russian experience in the operation of electrolyzers. The analysis included study-

ing the physical processes of the electrolyzer operation accounting for the influence of such physical processes on chemical processes. Attention is paid to the existing sensors and monitoring systems of the electromagnetic field. The analysis of the effect of the electromagnetic field on the technological process is formed. The results have revealed patterns of the studied effects. Thus, a method for assessing the technical condition of the electrolyzer based on the results of electromagnetic field diagnostics is proposed. The presented scientific research is a report published under the program «Philosophy of Science».

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

**For citation:** Analytical Review of Electromagnetic Field Monitoring Systems for Primary Aluminum Production Plants / I. M. Novozhilov, E. A. Boronko, E. B. Mazakov, O. A. Belyaevsky, V. S. Khloponina // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 7. P. 26–38. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-7-26-38.

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

**Введение.** В настоящее время спрос на продукцию алюминиевой промышленности все возрастает [1]. Данную тенденцию можно объяснить свойствами алюминия, среди которых высокая прочность при малом весе, а также высокая сопротивляемость коррозионным процессам [2]. Все это служит причиной использования алюминия в промышленности – от товаров потребительского использования до оборонной и аэрокосмической промышленности [2], [3].

Рост спроса на изготавливаемую из алюминия продукцию влечет за собой необходимость повышения эффективности процесса получения чистого алюминия, который чаще всего представляет собой плавку руды в индукционной металлургической печи или в электролизере. Таким образом, существует острая необходимость усовершенствования технологических процессов получения данного металла [4].

В данном обзоре представлен анализ как мирового, так и отечественного опыта решения данного вопроса. Целью статьи является исследование систем мониторинга электромагнитного поля, обеспечивающих повышение эффективности получения чистого металла.

**Получение металлов посредством применения на производстве индукционных металлургических печей.** К ключевым достоинствам индукционных печей относятся такие факторы, как отсутствие загрязнения расплава, достижимые высокие температуры и циркуляция расплавленной шихты за счет электромагнитных сил внутри нее. Стоит отметить широкое применение в металлургии данных установок почти сразу после их изобретения, данное наблюдение позволяет сделать вывод об актуальности инновационной на тот момент разработки [5].

Установки индукционного нагрева способны плавить как черные, так и цветные металлы. Уни-

версальность данных агрегатов способствовала их активному внедрению в процесс производства, что в свою очередь вело к постоянному совершенствованию конструкций данных печей для обеспечения более чистого расплава металла. Также особое внимание уделялось характеристикам топлива для различного рода металлургических установок и его экономичному использованию [6].

Индукционные установки имеют простое управление, более чистые условия работы, хорошее смешивание основных сплавов и сохранение металлургического состава. Для раскрытия данных преимуществ проводились работы по улучшению экономических аспектов печей, а также по повышению эффективности их эксплуатации. Изучались различные виды агрегатов, например, бестигельные и канальные печи. Последние обеспечивают короткое время плавки, легкую очистку, высокое качество металла и улучшенную экономичность по сравнению с мазутными печами или печами сопротивления [7].

Как упоминалось ранее, особое внимание уделялось такому конструкционному элементу металлургических агрегатов, как футеровка, поведение и свойства которой глубоко изучались. Свойства футеровки, особенно при рабочих температурах печи, связаны с химическим составом огнеупорной облицовки, поэтому было изучено влияние состава на срок службы футеровки. Помимо прочего изучалось влияние расплавов металлов и шлаков на различные теплоизоляционные материалы печей [8].

Прогресс не стоит на месте, поэтому не только совершенствовались отдельные узлы металлургических установок, но и разрабатывались новые агрегаты. В 1998 г. Д. Арведи, Д. Госо запатентовали индукционную печь, разработанную для обеспечения как первичного, так и вто-

ричного нагрева плоских изделий сталелитейной промышленности. Основное внимание в данной разработке уделялось концентратору потока, который позволял компенсировать снижение эффективности установок и помех в их работе, порождаемых значительной утечкой потока. Наиболее часто рассмотренные проблемы были замечены в процессах плавления изделий из металлического материала незначительной толщины. В [9] предложена конструкция концентратора потока, не препятствующая подаче изделий в металлургический агрегат, иными словами, был открыт канал подачи изделий.

Задачей патента на полезную модель В. В. Крымского стало упрощение конструкции установки для воздействия электромагнитным излучением на расплавленный металл при снижении ее стоимости и расширении эксплуатационных возможностей. Предложенная модель включает в себя средства изменения физической структуры металлов (черных и цветных), а также их сплавов. Модель описывает отличные от традиционных способы осуществления данного процесса. Вместо термообработки деформации предлагается воздействовать на металл электромагнитными полями [10].

Поддержание рабочего состояния как всей металлургической печи, так и отдельных ее словес, к примеру футеровки, является одной из основных задач производства. Контроль различных параметров для обеспечения поддержания правильной работы агрегатов, а также своевременного реагирования на возникающие неисправности позволяет реализовать система мониторинга.

Вопрос мониторинга индукционного нагрева в режиме реального времени поднимался еще в 1994 г. Был рассмотрен индукционный нагреватель, представляющий собой трансформатор, выполняющий вихретоковый процесс и имеющий нагрузку. Изучалась возможность мониторинга информации его электромагнитного поля. В случае индукционного нагрева, особенно поверхностного упрочнения, электрическая информация, полученная от простых измерительных трансформаторов, позволяет анализировать металлургические изменения деталей, что делает возможным контроль производственного процесса. Исследованный компьютеризированный прибор, основанный на технологии вихретокового неразрушающего контроля, предоставлял полезные признаки изменений в реальном времени, которые непосредственно связаны с тем, что про-

исходит внутри металла. В то время уровень техники, рассматривавшийся более 40 лет, по сути представлял собой сочетание двух вихретоковых технологий с уникальными металлургическими значениями. Однако он мало что мог предложить до появления ЭВМ. Распределительные и коленчатые валы, прошедшие индукционную закалку, подвергались контролю как при производстве, так и в лаборатории. Детали, подверженные сильной усталости при изгибе, также контролировались в процессе производства. Предлагалось определять индуцированный ток или энергию переменного тока через змеевик с водяным охлаждением, поскольку это может быть выполнено в агрессивной среде, что предполагало использование такого метода мониторинга для тепловых процессов, происходящих в других типах нагревательного оборудования. Предлагался контроль сварочных процессов, а также процессов закалки пламенем и нагрева печи с применением энергии переменного тока соответствующей частоты. Данная технология также могла обнаруживать изменяющиеся электрические условия металла, когда он затвердевает из расплавленного состояния, для идентификации сплавов и прогнозирования структуры отливок [11].

Помимо мониторинга электромагнитного поля металлургических индукционных печей проводились исследования в области мониторинга состояния футеровки данных агрегатов, поскольку при разрушении огнеупорного слоя его частицы загрязняли металлический расплав. Несмотря на многочисленные технические разработки, в 1996 г. огнеупорная футеровка металлургического комбината все еще оставалась расходным материалом. Невидимый износ и неконтролируемое проникновение расплава в огнеупорный материал наносили большой ущерб установке, что провоцировало остановку производственного процесса и создавало опасность для обслуживающего персонала. В связи с этим была разработана система контроля износа футеровки, работу которой изучали в течение пяти лет, и в то время в эксплуатации находилось около 54 систем, в основном на литейных заводах. Помимо тигельных индукционных печей открылись и другие области применения. Постоянная индикация любого износа футеровки, надежная регистрация проникновения даже самых малых количеств металла, а также оптимальное использование огнеупорной футеровки без какого-либо риска заметно выделялись на фоне прежних инженерных решений [12].

Проблемы оценки параметров магнитной составляющей электромагнитного поля, их контроля и мониторинга поднимались и среди смежных с металлургией сфер деятельности человека, например в энергетике. В данной области широко применяются различного рода технические объекты, которые можно назвать источниками, порождающими электромагнитное поле. Так, в статье И. В. Белицина [13] представлены электрическая и блок-схема прибора, осуществляющего мониторинг электромагнитного поля.

Во многих сферах применения индукционного нагрева нередко встречаются случаи, когда нагрузкой служит многослойное токопроводящее тело. Наиболее распространена плавка металлов и сплавов с достаточно низкими параметрами удельного сопротивления в индукционной тигельной печи с проводящим ферромагнитным тиглем. В такой печи происходит нагрев и тигля, и расплава посредством электромагнитного поля, когда ток проникает на глубину, превышающую толщину стенки тигля. Расчет данной печи представляет собой решение сложной нелинейной задачи, поскольку существует зависимость между электрическими характеристиками материала шихты (тигля), температурой и напряженностью магнитного поля [14].

В данный момент в небольших литейных цехах все чаще используются металлургические печи с индуктором для плавления металлического лома. В таком случае за техническим состоянием установки следит человек, делающий заключение о ее безопасности и работоспособности, исходя из личного опыта и основываясь на эмпирических показателях. Человеческий фактор нередко приводит к возникновению аварийных ситуаций, поскольку на глаз корректно оценить состояние такого сложного агрегата невозможно [15]. Работы по созданию объективных методов технического осмотра печи ведутся по сей день, поскольку существует необходимость своевременного технического обслуживания для предупреждения внештатных ситуаций, останавливающих производство и создающих опасность для рабочего персонала.

Большое внимание уделяется исследованию энергетических характеристик тигельных печей индукционной плавки, поскольку невозможно оставить без внимания такие преимущества тигельных агрегатов плавки индукционным методом, как оптимальное управление процессом, ре-

гулирование эффективности выпуска металлической продукции (производительности), а также не стоит забывать про высокие показатели качества технического оснащения установок плавки металлов. Не стоит забывать, что от качества сырья зависит и качество продукции, а в случае рассматриваемых печей свойства расплавов зависят еще и от качественных показателей потребляемой металлургической установкой энергии. В настоящее время А. П. Кислов и О. М. Талипов занимаются изучением данного вопроса для выработки оптимальных конструкций магнитопроводов [16]. Был разработан метод расчета энергии электромагнитного поля перед конструкционной сборкой индукционной печи (установкой магнитных проводов), обеспечивающий повышение эксплуатационных и энергетических показателей при сборке установок плавки металлов.

**Получение металлов посредством применения на производстве электролизеров.** Как упоминалось ранее, к металлургическим печам также относятся и электролизеры, рассматриваемые здесь. Электролизером служит установка, в которой протекает процесс электролиза – один из промышленных способов получения алюминия и меди.

К актуальным проблемам получения алюминия электролитическим способом относится и проблема электролиза. Была разработана математическая модель промышленного электролизера, основная идея которой заключается в несмешиваемости двух сред – электролита и металлической среды. Данная модель обеспечивает возможность исследования влияния различной формы, количества анодов и их размеров на процесс электролиза. Все это становится осуществимым благодаря трехмерной нестационарной нелинейной системе уравнений магнитной гидродинамики, лежащей в основе описанной математической формы объекта, отражающей геометрический учет срастания стенок и расположения анодов как в алюминиевой среде, так и в среде электролита. Также с помощью данной разработки допускается проведение исследований поведения среды при длительном анодном эффекте, возникающем вследствие стремительного снижения электропроводности электролита, сопровождающегося стремительным возрастанием напряженности электрического поля [17].

Распределение и оптимизация поля потока – один из ключевых моментов при масштабировании магниевого электролизера. Распределение

поля потока в магниево-электролизере при воздействии электромагнитного поля изучено методом вычислительной гидродинамической стимуляции. Между отсеками электролиза и сбора существует большая циркуляция электролита, которая может транспортировать жидкий магний из отсека электролиза в отсек сбора. Во время электролиза из-за незначительной циркуляции электролита в области задней стенки устройства его аноды повреждаются [18].

В этом заключается одна из проблем алюминиевых электролизеров. Приблизить решение данного вопроса можно, изучая схемы течения в плоском резервуаре электролизера, содержащего проводящую жидкость, через которую ток протекает поперек слоя (площадь поперечного сечения анода на верхней границе меньше площади резервуара) [19]. Расчет уравнений, описывающих данный процесс, позволил обнаружить зависимость формы и скорости движения от формы анодного сечения и формы резервуара. Информация о том, как организовано течение в резервуаре электролизера, а также зависимость формы и скорости движения от формы резервуара могут стать подспорьем в решении обозначенной проблемы.

Математические модели активно используются для изучения процесса электролиза. Так, М. С. Чистяков, А. Н. Лосев, С. В. Шамина, А. Л. Золкин, Г. В. Рябкова поднимают вопрос разработки цифровой модели режимов электролиза алюминия [20]. В публикации представлены целевые гипотезы, которые, по мнению авторов, наиболее приоритетны. Для описанных гипотез построены модели, а также проведены исследования с широким охватом данных. Созданы прототипы систем управления для инструментов воздействия, определены параметры управления. Определены и описаны сценарии использования моделей в реальном производстве. На основе полученных данных возможно проведение полноценного производственного эксперимента, позволяющего определить параметры внедрения моделей в производственные процессы.

**Информационная система мониторинга электромагнитного поля металлургического агрегата.** Решение ранее описанных проблем связано с мониторингом электромагнитного поля металлургической печи, будь то электролизер или индукционная металлургическая печь. Специализированная система мониторинга такого поля позволит эффективно и своевременно вмешиваться в процесс плавки металлов, поскольку такая систе-

ма подразумевает контроль над технологическими параметрами в режиме реального времени.

Модернизация способов извлечения и переработки сырья представляет особую проблему в области производства алюминия, поскольку он относится к наиболее востребованным металлам на потребительском рынке, так как из него изготавливается широкий спектр различных товаров – от корпусов бытовых устройств до узлов летательных аппаратов. Таким образом, усовершенствование производственного процесса алюминия занимает важное место в промышленности, и один из методов модернизации данного процесса заключается в мониторинге электромагнитного поля в темпе, соизмеримом со скоростью плавки металлов [21].

Рассматриваемые в данном обзоре технические устройства предназначены для плавки металлов, а значит, существует необходимость изучения взаимного влияния электромагнитного и тепловых полей. В. М. Золотарев, М. А. Щерба, Р. В. Белянин, Р. П. Мыгущенко, О. Ю. Кропачек разработали способ мониторинга состояния огнеупорного слоя индукционных печей, используемых для плавления не содержащей кислород меди [22]. Данный способ заключается в контроле отклонений в распределении теплового поля; помимо прочего организован сравнительный анализ методик: предложенной и заключающейся в мониторинге электрического сопротивления плавильного канала печи. В публикации представлена методика определения состояния футеровки индукционной установки канального типа, способная установить как место, так и размер пробоев, т. е. протёков расплавленного металла. Данный способ представляет собой анализ распространения температуры по поверхности индуктора и самой печи. Также была установлена взаимосвязь между распределением температурного поля, местом пробоя и его размерами, что благотворно сказывается на расчетах оставшегося ресурса работы агрегата.

Для анализа взаимодействия электромагнитного и температурного полей необходимо изучить их поведение по отдельности, поскольку невозможно установить влияние одного поля на другое, не имея данных о том, как каждое из них проявляет себя в различных условиях. Для повышения экономической эффективности электролиза активно ведется анализ температурных полей

электролизеров, что подкрепляет важность изучения их электромагнитного поля и взаимного влияния таких полей. Процесс электролиза связан с переходом электрической энергии в тепловую. Предупредить пробой днища, ведущий к выводу из строя установки, можно посредством анализа температурных полей агрегата для определения места перегрева, влекущего за собой пробой [23], [24].

Y. Zhang, F. Yu, Z. Ma, J. Li, J. Qian, X. Liang, J. Zhang, M. Zhang в своей статье исследуют взаимодействие теплового и электромагнитного полей. С использованием программного обеспечения для анализа методом конечных элементов COMSOL создана модель анализа электромагнитно-тепловой связи высоковольтного кабеля 110 кВ. Будучи ключевым параметром состояния высоковольтных кабелей, температура проводника служит важным фактором, определяющим пропускную способность кабелей по току, но на практике это трудно измерить непосредственно во время эксплуатации высоковольтных кабелей. Анализируя закон распределения температуры высоковольтных кабелей, авторы обнаружили зависимость между температурами проводника и поверхности высоковольтного кабеля, что позволило выработать методику контроля температуры кабеля, допускающую отклонения от реального показателя в 2 °С. Помимо точности данный метод обеспечивает проведение замеров температуры без нарушения целостности корпуса высоковольтного кабеля [25].

Д. Н. Кирсанов поднимает проблему сложности контроля и удержания определенного уровня магнитного поля в рабочей области процесса полимеризации магнитного композиционного материала. В качестве решения выявленной задачи была предложена система контроля напряженности постоянного магнитного поля в воздушном зазоре постоянных электромагнитов [26].

Контроль электромагнитного поля электролизера очень важен в процессе промышленного производства алюминия. Так, И. М. Новожилов и О. А. Беляевский анализируют электромагнитные поля ошиновки, гибких стояков и электролизера в целом. Авторами были проведены опыты, целью которых служила оценка воздействия показателей тока на возбуждение электромагнитного поля, что позволило определить точное местоположение точек концентрации электромагнитных полей. Наконец, на основании собранных данных был разработан способ идентификации интересующего исследователей поля [27].

Мониторинг электромагнитного поля необходимо осуществлять не только при плавке металлов, но и в энергетической области. Систему мониторинга в энергетике можно применять, например, для контроля электромагнитной обстановки на подстанциях. Р. К. Борисова, С. С. Жуликова, М. Н. Смирнова, Ю. С. Турчанинова, С. И. Хренова, М. А. Кошелева, Н. Л. Аграпонова в своем исследовании разработали мобильную систему мониторинга электромагнитной обстановки (ЭМО) на электроподстанциях. Система предназначена для регистрации в режиме реального времени уровней электромагнитных воздействий, которые могут ухудшить качество функционирования технических средств, с целью выявления систематических нарушений электромагнитной совместимости и установления причин этих нарушений. Такие воздействия включают импульсный шум, возникающий при ударах молнии, коротком замыкании и включении основного оборудования; перенапряжение, влияющее на цепи вторичного оборудования; провалы напряжения и перебои в системах электроснабжения постоянного и переменного тока напряжением 0.4 кВ для вспомогательных нужд; магнитные поля в помещениях с технологическими системами управления. Архитектура системы позволяет быстро транспортировать и устанавливать ее на существующих подстанциях, которые представляют наибольший интерес с точки зрения управления ЭМО. Ключевые функции системы мониторинга реализуются с помощью цифровых регистраторов (ЦР) параметров ЭМО и подключенных к ним первичных преобразователей (датчиков) измерительной информации. ЦР представляет собой цифровой многоканальный осциллограф, оснащенный твердотельным накопителем измерительной информации и беспроводным интерфейсом, который обеспечивает доступ к этой информации с компьютера более высокого уровня. Система мониторинга позволит предотвратить крупные аварии на электроподстанциях за счет своевременного выявления ухудшения электромагнитной обстановки и устранения нарушений требований по электромагнитной совместимости, а также сбора объективных данных для анализа причин их возникновения [28].

Любая система мониторинга должна иметь четкую организацию. Так, в публикации Д. А. Трокоза и Е. В. Трусова описывается структура систем мониторинга. В статье представлена упрощенная модель системы, описаны основные ком-

поненты системы и их функции. Помимо прочего, авторы привели собственные предложения по разработке и обозначили основные достоинства предложенного исполнения системы [29].

Системы мониторинга представляют собой не что иное, как аппаратно-программный комплекс контроля [30]. От назначения системы, условий ее эксплуатации зависит состав ее аппаратной части, для управления которым разрабатывается программный код. Один из ключевых элементов, без которых невозможен мониторинг, – это датчик. Существует огромное количество датчиков, отличающихся по назначению, измеряющих различные величины в разнообразных условиях той или иной среды. Итак, контроль параметров осуществляется непосредственно в установках с участием датчиков [28], [29], [31]. Таким образом, существует проблема агрессивности среды плавки металлов и помех в работе датчиков, порождаемых самими датчиками электромагнитного поля [32].

В настоящее время системы мониторинга активно применяются на различных производствах, также на их основе разрабатываются автоматизированные системы управления различными процессами [33]. Так, Y. J. Hou, H. M. Tian, X. D. Qu, J. Z. Teng, G. X. Liu, Y. Li [34] утверждают, что традиционная среднечастотная индукционная печь обычно использует аналоговую схему, в которой используется теория фазовой автоподстройки частоты для синхронизации управляющего сигнала с сигналом индуцированного тока, так что верхние и нижние устройства каждой фазы могут быть включены одновременно. Кроме того, впоследствии возникают некоторые проблемы, например соответствие сложности отладки и высокой частоты отказов. В этой публикации описывается влияние нагрузки на резонансное электромагнитное поле и резонансную частоту посредством теоретического анализа и моделирования магнитного поля. Исходя из этого, предлагается система управления и контроля, выполненная по цифровой пассивной триггерной архитектуре, фазовая синхронизация которой осуществляется по частоте самой системы, полностью гарантируя, что тиристор не будет одновременным. Для повышения стабильности системы в этой статье оптимизируется процесс управления выходным сигналом инвертора. В то же время разработана удобная платформа взаимодействия человека и компьютера, которая может обеспечить распре-

ленный анализ данных, улучшить качество продукта и найти в продукте общие проблемы.

Электролитический способ получения алюминия напрямую связан с проблемой необходимости мониторинга электромагнитного поля. И. М. Новожилов, О. А. Беляевский, Ю. В. Илюшин, Т. В. Кухарова, Е. М. Михайлова [35] проводили исследования способов идентификации и последующего анализа такого поля. Коллектив авторов проанализировал технологии получения алюминия посредством электролизеров, благодаря чему были обнаружены местоположения порождения поля, очаг и области скопления электромагнитных напряжений. Также в данной статье был предложен программно-аппаратный комплекс, позволяющий идентифицировать электромагнитное поле и проводить дальнейшие исследования в данной области.

Проблема идентификации излучения электромагнитного поля поднимается в [36]. В этом исследовании подробно описывается система обнаружения излучения электромагнитного поля, которая была разработана для применения низкочастотной энергии поля. Прототип подразумевает использование двухдиапазонной антенной системы в качестве зонда вместе со схемой обнаружения. Кроме того, прототип был оснащен качественным блоком индикации интенсивности электромагнитного излучения на своем выходном каскаде. Для подтверждения концепции обнаруживающий зонд был реализован на печатной плате. Идентификатор электромагнитного поля предназначен для одновременного обнаружения любых потенциальных источников электромагнитного излучения от мобильных телефонов, а также точек доступа Wi-Fi, что достигается с помощью двухдиапазонной антенной системы. Такой чувствительный детектор имеет полезное применение в качестве автономного контрольного зонда для устранения неполадок, а также для выявления источников помех электромагнитного излучения для промышленных высокоскоростных электронных устройств. Также представлены другие прототипы, иллюстрирующие полезность таких детекторов в некоторых из вышеуказанных применений.

Как упоминалось ранее, в системе мониторинга должны использоваться датчики, в данном случае – датчики электромагнитного поля. Одна-

ко у этих датчиков существует проблема погрешности измерения, порождаемая самими датчиками при их взаимодействии с электромагнитным полем. Р. Хартански, В. Смешко, М. Биттера, Л. Маршалка, О. Чичакова, Л. Летановска в [32] представили аналитический расчет, а также численное моделирование интерактивного воздействия электромагнитных датчиков. Помимо прочего были представлены конструкционные рекомендации по изготовке зонда электромагнитного поля, которые обеспечивают сведение к минимуму взаимодействие с самим датчиком и погрешности измерения.

Датчики электромагнитного поля широко применяются в промышленности, с их помощью можно определить скорость передвижения, частоту вращения, угол поворота различных объектов и, что самое главное для изучаемой системы мониторинга, – уровень электромагнитного поля. Однако данные сенсоры считывают искаженные показания поля из-за металлических и электронных устройств в окружающей среде. Системе мониторинга, на базе которой в дальнейшем может быть разработана система управления электролитическим процессом производства алюминия, необходима высокая точность измерений, поэтому в последние годы многие работы были сосредоточены на методах калибровки датчиков. Разрабатывались различные методики снятия показаний и их обработки, что позволило снизить влияние ошибок на показания считывающих устройств [37]. Эта проблема поднимается также в [38].

**Обсуждение.** На основании проведенного в данной статье анализа различных источников мировой и отечественной литературы, подкрепляющих актуальность основной выявленной в обзоре проблемы, можно сделать вывод, что в настоящее время нет необходимой системы мониторинга, обеспечивающей должную эффективность процесса плавки алюминиевой руды. Существующие решения косвенно затрагивают представленную проблему, а именно неравномерность нагрева расплава металла при преобразовании электрической энергии в тепловую посредством различных металлургических установок, поскольку в них решаются вопросы иного характера, оказывающие влияние на данный вопрос, но в недостаточной мере. Одним из ярких примеров попыток разрешения трудностей производственного про-

цесса служит его математическое моделирование, однако оно не способно в режиме реального времени предоставлять достоверные результаты, на основе которых могло бы в дальнейшем осуществляться управление производством алюминия без участия человека или с минимальным его участием. Но стоит отметить, что в настоящее время, в отличие от системы мониторинга электромагнитного поля, математическое моделирование активно применяется на предприятиях. Данный парадокс можно объяснить тем, что в настоящее время для системы мониторинга не существует датчиков, способных снимать показания с необходимой точностью и выдерживающих воздействие поля, порождаемого индуктором металлургической печи или электролизером. Разработка датчиков, без которых не способна функционировать вышеописанная система, позволит также разработать систему мониторинга, что приблизит решения выявленной в данной статье проблемы производственного процесса алюминия, а также повысит эффективность этого процесса.

**Заключение.** Проведя анализ предметной области получения алюминия посредством рассмотренных металлургических агрегатов, можно сделать вывод, что необходимость решения проблемы неравномерного нагрева металлов в таких установках будет расти. Система мониторинга электромагнитного поля позволит приблизить решение данного вопроса, поскольку с ее помощью станет возможным контроль, обоснованный непосредственными показаниями датчиков системы мониторинга в режиме реального времени производственного процесса. Мониторинг основных показателей производственного процесса позволит повысить его эффективность, чему также уделяется немало внимания на любом предприятии, особенно на предприятиях минерально-сырьевого комплекса [39]. Помимо прочего разработка такой системы позволит в будущем на ее основе синтезировать систему управления, в работу которой человек будет вмешиваться только при необходимости или не будет принимать в ней участие вовсе [40]. Такая система управления позволит снизить влияние человеческого фактора или исключить его, что приведет к уменьшению числа аварийных ситуаций, например пробоев футеровки и попадания расплавленного металла из металлургического агрегата во внешнюю среду.



Список литературы

1. Хазанов Л. Алюминий: сплавы, прокат и профили для промышленности и строительства: конференция // *Металлург*. 2015. № 9. С. 102–105.
2. Боровик Д. А. Перспективы использования алюминия в автомобильной промышленности // *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура*. 2022. № 1(31).
3. Иванков С. И., Троицкий А. В. Использование отходов производства алюминия в различных отраслях промышленности // *Научные и технические аспекты охраны окружающей среды*. 2020. № 3. С. 27–37. doi: 10.36535/0869-1002-2020-03-2.
4. An experimental and numerical study on aluminum alloy tailor heat treated blanks / R. Pereira, N. Peixinho, V. Carneiro, D. Soares, S. Cortez, S. L. Costa, V. Blanco // *J. Manuf. Mater. Process*. 2023. № 7(1). P. 16. doi: 10.3390/jmmp7010016.
5. Adams C. A., Hodge J. C., Mackusick M. H. High frequency induction furnaces // *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*. 1934. Vol. 53, no. 1. P. 194–205. doi: 10.1109/T-AIEE.1934.5056506.
6. Henson C. G. Furnace technology – 1. Metal melting // *Metallurgia*. 1973. № 7. P. 208–209.
7. Schaub H. P. Induction furnaces for melting and holding aluminum // *Foundry Trade J*. 1973. Vol. 134, № 2936. P. 331–342.
8. Bakker W. T. Properties and behavior of refractories in induction furnaces // *Giessereipraxis*. 1976. № 1–2. P. 4–15.
9. Пат. 2105434С1 (RU). Индукционная печь / А. Джованни, Г. Джованни. Заявл. 17.12.1992; опубл. 20.02.1998.
10. Пат. 118310U1 (RU). Установка для воздействия электромагнитным излучением на расплавленный металл / В. В. Крымский. Заявл. 02.04.2012; опубл. 20.07.2012.
11. Hassell P. A. Potential of monitoring induction heating in real time // *Industrial Heating*. 1994. Vol. 61, № 1. P. 42–45.
12. Hopf I. M. Five years operational experience of lining wear monitoring // *Foundry Trade J*. 1996. Vol. 170, № 3524. P. 527–529.
13. Белицын И. В. Информационно-измерительная система мониторинга электромагнитного поля объектов энергетики // *Электронный физико-технический журн*. 2011. Т. 6. С. 1–12.
14. Исследование параметров электромагнитного поля в многослойной проводящей среде при индукционном нагреве / М. А. Федин, А. Б. Кувалдин, А. О. Кулешов, С. В. Ахметьянов, С. С. Кондрашов, Б. Чэнь // *Сб. матер. XVII междунар. науч.-практ. конф. «Энерго- и ресурсосбережение – XXI век»*. Орел: ОГУ им. И. С. Тургенева, 2019. С. 103–108.
15. Residual life prediction for induction furnace by sequential encoder with s-convolutional LSTM / Y. Choi, H. Kwun, D. Kim, E. Lee, H. Bae // *Processes*. 2021. Vol. 9, № 7. P. 1121. doi: 10.3390/pr9071121.
16. Кислов А. П., Талипов О. М. Исследование энергетических характеристик тигельных печей индукционной плавки // *Сб. статей II Всерос. с междунар. участием в науч.-практ. конф. «Проблемы электроэнергетики и телекоммуникаций Севера России – 2021»*, Сургут. М.: Изд-во «Знание-М», 2021. С. 129–136.
17. Kuz'min R. N., Savenkova N. P., Mokin A. Y. Mathematical modeling of industrial aluminum electrolysis // *J. of Mathematical Sci*. 2011. № 172(6). P. 794–801. doi: 10.1007/s10958-011-0223-z.
18. Coupled analysis of flow field in magnesium electrolyzer under electromagnetic field. Huadong Ligong Daxue Xuebao / Z. Sun, G.-M. Lu, B. Li, X.-F. Song, J.-G. Yu // *J. of East China University of Science and Technology*. 2010. № 36(2). P. 187–191.
19. Al'mukhametov V. F., Khripchenko S. Yu. Electro-vortex flow mechanics for an electrolyzer containing a solid anode // *Magnetohydrodynamics New York, N. Y.* 1988. № 23(3). P. 317–320.
20. Optimization of the aluminum electrolysis process by mathematical modeling of process algorithms on cleaned data / M. S. Chistyakov, A. N. Losev, S. V. Shamina, A. L. Zolkin, G. V. Ryabkova // *J. of Physics: Conf. Series*. 2021. 1889(2). doi: 10.1088/1742-6596/1889/2/022004.
21. Polekhina V. S., Shestopalov M. Y., Ilyushin Y. Y. Identification of magnetic field strength realisation as a necessary solution for high-quality metal synthesis // *Proc. of the 2022 Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. IEEE: ElConRus 2022*. 831–833. doi: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755649.
22. Comparative analysis of electrical and thermal control of the lining state of induction apparatus of copper wire manufacture / V. M. Zolotaryov, M. A. Shcherba, R. V. Belyanin, R. P. Mygushchenko, O. Yu. Kropachek // *Электротехника и электромеханика*. 2018. № 1. С. 35–40. doi: 10.20998/2074-272X.2018.1.05.
23. Kukharova T. V., Ilyushin Y. V., Asadulagi M.-A. M. Investigation of the OA-300M Electrolysis Cell Temperature Field of Metallurgical Production // *Energies*. 2022. № 15(23). P. 9001. doi: 10.3390/en15239001.
24. Ильюшин Ю. В., Кравцова А. Л., Мардоян М. М. Устойчивость температурного поля распределенной системы управления // *Научное обозрение*. 2012. № 2. С. 189–197.
25. Conductor temperature monitoring of high-voltage cables based on electromagnetic-thermal coupling temperature analysis / Y. Zhang, F. Yu, Z. Ma, J. Li, J. Qian, X. Liang, J. Zhang, M. Zhang // *Energies*. 2022. № 15(23). P. 525. doi: 10.3390/en15020525.
26. Кирсанов Д. Н. Создание прототипа системы контроля величины напряженности постоянного магнитного поля в воздушном зазоре постоянных электромагнитов // *Восемнадцатая Всерос. студентеских науч.-исслед. инкубаторов*. Томск: ООО «СТТ», 2021. С. 36–42.

27. Новожилов И. М., Беляевский О. А. Разработка информационной системы мониторинга электромагнитных полей электролизера Содерберга // Сб. докл. междунар. конф. «Проектирование и обеспечение качества информационных процессов и систем». СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2022. С. 37–39.

28. Система мониторинга электромагнитной обстановки на подстанциях / Р. К. Борисов, С. С. Жуликов, М. Н. Смирнов, Ю. С. Турчанинова, С. И. Хренов, М. А. Кошелев, Н. Л. Аграпонова // Электротехника. 2021. № 8. С. 35–40.

29. Трокоз Д. А., Трусов Е. В. Система мониторинга. Структура и основные компоненты // Тр. междунар. симп. «Надежность и качество». Пенза: ПГУ, 2018. Т. 1. С. 214–215.

30. Средства мониторинга удаленных объектов контроля состояния изделий электронной техники и среды / Д. А. Разумов, Д. М. Орешкин, Никита Н. Давыдов, В. А. Ефимов, С. Ю. Данилов, Николай Н. Давыдов // Проектирование и технология электронных средств. 2014. № 3. С. 48–54.

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

32. Sensor interaction as a source of the electromagnetic field measurement error / R. Harťanský, V. Smieško, M. Bittera, L. Maršálka, O. Čičáková, L. Letanovská // Measurement Sci. Rev. 2014. № 14 (6). P. 337–342. doi: 10.2478/msr-2014-0046.

33. Ильющин Ю. В. Методы импульсного управления объектами с распределенными параметрами: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / Южный федер. ун-т. Пятигорск, 2012. 170 с.

34. Development of digital control system for medium frequency induction furnaces / Y. J. Hou, H. M. Tian, X. D. Qu, J. Z. Teng, G. X. Liu, Y. Li // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sci. Institute of Physics Publishing. 2018. Vol. 188, № 1. P. 012005. doi: 10.1088/1755-1315/188/1/012005.

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

36. Bait-Suwailam M. Electromagnetic field detector circuit for low-frequency energy applications // J. of Engin. Research. 2015. Vol. 12, № 1. P. 69–80. doi: 10.24200/tjer.vol12iss1pp69-80.

37. Wang H., Jiang G. Study on sensor array applied in electromagnetic tracking system // 2007 IEEE/ICME Intern. Conf. on Complex Medical Engineering. IEEE: Beijing, China, 2007. P. 189–192. doi: 10.1109/ICME.2007.4381719.

38. Suo Chun Guang, Shi Su, Wen Bin Zhang. The analysis on the tracking characteristics of electromagnetic sensor // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 694–697. P. 1039–1042. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.694-697.1039.

39. Хлопонина В. С. Анализ современного состояния и пути повышения эффективности процесса воспроизводства минерально-сырьевой базы Российской Федерации // Зап. Горного института. 2012. Т. 195. С. 216–221.

40. Ilyushin Yu. V., Afanaseva O. V. Development of Scada-model for trunk gas pipeline's compressor station // J. of Mining Institute. 2019. Vol. 240. P. 686–693. doi: 10.31897/PMI.2019.6.686.

#### Информация об авторах

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

E-mail: [novozhilovim@list.ru](mailto:novozhilovim@list.ru)

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

**Боронко Егор Андреевич** – магистрант Санкт-Петербургского горного университета, 21-я линия, д. 2, В.О., Санкт-Петербург, 199106, Россия.

E-mail: [egor.boronko@mail.ru](mailto:egor.boronko@mail.ru)

**Мазиков Евгений Борисович** – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой Информационных систем и вычислительной техники Санкт-Петербургского горного университета, 21-я линия, д. 2, В.О., Санкт-Петербург, 199106, Россия.

E-mail: [mazakov\\_eb@pers.spmi.ru](mailto:mazakov_eb@pers.spmi.ru)

<https://orcid.org/0000-0003-4837-3191>

**Беляевский Олег Александрович** – ведущий инженер ООО «ТЕХНОАВТОМАТИКА», ул. Октябрьской Революции, стр. 20в, Иркутск, 664007, Россия.

E-mail: [vost-sibenergo@yandex.ru](mailto:vost-sibenergo@yandex.ru)

**Хлопонина Вера Сергеевна** – канд. экон. наук, главный ученый секретарь Санкт-Петербургского горного университета, 21-я линия, д. 2, В.О., 199106, Санкт-Петербург, Россия.  
E-mail: [Khloponina\\_VS@pers.spmi.ru](mailto:Khloponina_VS@pers.spmi.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-9029-2788>

## References

1. Hazanov L. Aljuminij: splavy, prokat i profili dlja promyshlennosti i stroitel'stva: konferencija // Metallurg. 2015. № 9. S. 102–105. (In Russ.).
2. Borovik D. A. Perspektivy ispol'zovanija aljuminija v avtomobil'noj promyshlennosti // Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura. 2022. № 1(31). (In Russ.).
3. Ivankov S. I., Troickij A. V. Ispol'zovanie othodov proizvodstva aljuminija v razlichnyh otrasljah promyshlennosti // Nauchnye i tehnicheckie aspekty ohrany okruzhajushhej sredy. 2020. № 3. S. 27–37. doi: 10.36535/0869-1002-2020-03-2. (In Russ.).
4. An experimental and numerical study on aluminum alloy tailor heat treated blanks / R. Pereira, N. Peixinho, V. Carneiro, D. Soares, S. Cortez, S. L. Costa, V. Blanco // J. Manuf. Mater. Process. 2023. № 7(1). P. 16. doi: 10.3390/jmmp7010016.
5. Adams C. A., Hodge J. C., Mackusick M. H. High frequency induction furnaces // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. 1934. Vol. 53, no. 1. P. 194–205. doi: 10.1109/T-AIEE.1934.5056506.
6. Henson C. G. Furnace technology – 1. Metal melting // Metallurgia. 1973. № 7. P. 208–209.
7. Schaub H. P. Induction furnaces for melting and holding aluminum // Foundry Trade J. 1973. Vol. 134, № 2936. P. 331–342.
8. Bakker W. T. Properties and behavior of refractories in induction furnaces // Giesserei. 1976. № 1–2. P. 4–15.
9. Pat. 2105434C1 (RU). Indukcionnaja pech' / A. Dzhovanni, G. Dzhovanni. Zajavl. 17.12.1992; opubl. 20.02.1998. (In Russ.).
10. Pat. 118310U1 (RU). Ustanovka dlja vozdeystvija jelektromagnitnym izlucheniem na rasplavlennyj metall / V. V. Krymskij. Zajavl. 02.04.2012; opubl. 20.07.2012. (In Russ.).
11. Hassell P. A. Potential of monitoring induction heating in real time // Industrial Heating. 1994. Vol. 61, № 1. P. 42–45.
12. Hopf I. M. Five years operational experience of lining wear monitoring // Foundry Trade J. 1996. Vol. 170, № 3524. P. 527–529.
13. Belicyn I. V. Informacionno-izmeritel'naja sistema monitoringa jelektromagnitnogo polja ob#ektov jenergetiki // Jelektronnyj fiziko-tehnicheckij zhurn. 2011. T. 6. S. 1–12. (In Russ.).
14. Issledovanie parametrov jelektromagnitnogo polja v mnogoslojnoj provodjashhej srede pri indukcionnom nagreve / M. A. Fedin, A. B. Kuvaldin, A. O. Kuleshov, S. V. Ahmet'janov, S. S. Kondrashov, B. Chjen' // Sb. mater. XVII mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Jenergo- i resursosberezhenie – XXI vek». Orjol: OGU im. I. S. Turge-neva, 2019. S. 103–108. (In Russ.).
15. Residual life prediction for induction furnace by sequential encoder with s-convolutional LSTM / Y. Choi, H. Kwun, D. Kim, E. Lee, H. Bae // Processes. 2021. Vol. 9, № 7. P. 1121. doi: 10.3390/pr9071121.
16. Kislov A. P., Talipov O. M. Issledovanie jenergeticheskikh harakteristik tigel'nyh pechej indukcionnoj plavki // Sb. statej II Vseros. s mezhdunar. uchastiem nauch.-prakt. konf. «Problemy jelektrojenergetiki i telekommunikacij Severa Rossii – 2021», Surgut. M.: Izd-vo «Znanie-M», 2021. S. 129–136. (In Russ.).
17. Kuz'min R. N., Savenkova N. P., Mokin A. Y. Mathematical modeling of industrial aluminum electrolysis // J. of Mathematical Sci. 2011. № 172(6). P. 794–801. doi: 10.1007/s10958-011-0223-z.
18. Coupled analysis of flow field in magnesium electrolyzer under electromagnetic field. Huadong Ligong Daxue Xuebao / Z. Sun, G.-M. Lu, B. Li, X.-F. Song, J.-G. Yu // J. of East China University of Science and Technology. 2010. № 36(2). P. 187–191.
19. Al'mukhametov V. F., Khripchenko S. Yu. Electro-vortex flow mechanics for an electrolyzer containing a solid anode // Magnetohydrodynamics New York, N. Y. 1988. № 23(3). P. 317–320.
20. Optimization of the aluminum electrolysis process by mathematical modeling of process algorithms on cleaned data / M. S. Chistyakov, A. N. Losev, S. V. Shamina, A. L. Zolkin, G. V. Ryabkova // J. of Physics: Conference Series. 2021. 1889(2). doi: 10.1088/1742-6596/1889/2/022004.
21. Polekhina V. S., Shestopalov M. Y., Ilyushin Y. Y. Identification of magnetic field strength realisation as a necessary solution for high-quality metal synthesis // Proc. of the 2022 Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. IEEE: ElConRus 2022. 831–833. doi: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755649.
22. Comparative analysis of electrical and thermal control of the lining state of induction apparatus of copper wire manufacture / V. M. Zolotaryov, M. A. Shcherba, R. V. Belyanin, R. P. Mygushchenko, O. Yu. Kropachek // Электротехника и электромеханика. 2018. № 1. С. 35–40. doi: 10.20998/2074-272X.2018.1.05.
23. Kukharova T. V., Ilyushin Y. V., Asadulagi M.-A. M. Investigation of the OA-300M Electrolysis Cell Temperature Field of Metallurgical Production // Energies. 2022. № 15(23). P. 9001. doi: 10.3390/en15239001.
24. Il'jushin Ju. V., Kravcova A. L., Mardojan M. M. Ustojchivost' temperaturnogo polja raspredelennoj sistemy upravlenija // Nauchnoe obozrenie. 2012. № 2. S. 189–197. (In Russ.).
25. Conductor temperature monitoring of high-voltage cables based on electromagnetic-thermal coupling temperature analysis / Y. Zhang, F. Yu, Z. Ma, J. Li,

J. Qian, X. Liang, J. Zhang, M. Zhang // *Energies*. 2022. № 15(23). P. 525. doi: 10.3390/en15020525.

26. Kirsanov D. N. Sozdanie prototipa sistemy kontrolja velichiny naprjazhennosti postojannogo magnitnogo polja v vozdušnom zazore postojannyh jelektromagnitov // *Vosemnadcataja Vseros. konf. studentcheskih nauch.-issled. inkubatorov*. Tomsk: OOO «STT», 2021. S. 36–42. (In Russ.).

27. Novozhilov I. M., Beljaevskij O. A. Razrabotka informacionnoj sistemy monitoringa jelektromagnitnyh polej jelektrolizera Soderberga // *Sb. dokl. Mezhdunar. konf. «Proektirovanie i obespechenie kachestva informacionnyh processov i sistem»*. SPb.: SPbGETU «LETI», 2022. S. 37–39. (In Russ.).

28. Sistema monitoringa jelektromagnitnoj obstanovki na podstancijah / R. K. Borisov, S. S. Zhulikov, M. N. Smirnov, Ju. S. Turchaninova, S. I. Hrenov, M. A. Koshelev, N. L. Agraponova // *Jelektrotehnika*. 2021. № 8. S. 35–40. (In Russ.).

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

30. Sredstva monitoringa udalennyh ob#ektov kontrolja sostojanija izdelij jelektronnoj tehniki i sredy / D. A. Razumov, D. M. Oreshkin, Nikita N. Davydov, V. A. Efimov, S. Ju. Danilov, Nikolaj N. Davydov // *Proektirovanie i tehnologija jelektronnyh sredstv*. 2014. № 3. S. 48–54. (In Russ.).

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

32. Sensor interaction as a source of the electromagnetic field measurement error / R. Harťanský, V. Smieško, M. Bittera, L. Maršálka, O. Čičáková, L. Letanovská // *Measurement Sci. Rev*. 2014. № 14(6). P. 337–342. doi: 10.2478/msr-2014-0046.

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

34. Development of digital control system for medium frequency induction furnaces / Y. J. Hou, H. M. Tian, X. D. Qu, J. Z. Teng, G. X. Liu, Y. Li // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sci. Institute of Physics Publishing*. 2018. Vol. 188, № 1. P. 012005.

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

36. Bait-Suwallam M. Electromagnetic field detector circuit for low-frequency energy applications // *J. of Engin. Research*. 2015. Vol. 12, № 1. P. 69–80. doi: 10.24200/tjer.vol12iss1pp69-80.

37. Wang H., Jiang G. Study on Sensor Array Applied in Electromagnetic Tracking System // *2007 IEEE/ICME Intern. Conf. on Complex Medical Engineering*. IEEE: Beijing, China, 2007. P. 189–192. doi: 10.1109/ICME.2007.4381719.

38. Suo Chun Guang, Shi Su, Wen Bin Zhang. The analysis on the tracking characteristics of electromagnetic sensor // *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 694–697. P. 1039–1042. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.694-697.1039.

39. Hloponina V. S. Analiz sovremennogo sostojanija i puti povyšeniya jeffektivnosti processa vosproizvodstva mineral'no-syr'evoj bazy Rossijskoj Federacii // *Zap. Gornogo instituta*. 2012. T. 195. S. 216–221. (In Russ.).

40. Ilyushin Yu. V., Afanaseva O. V. Development of Scada-model for trunk gas pipeline's compressor station // *J. of Mining Institute*. 2019. Vol. 240. P. 686–693. doi: 10.31897/PMI.2019.6.686.

#### Information about the authors

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

E-mail: novozhilovim@list.ru

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

**Egor A. Boronko** – master's student of Saint Petersburg Mining University, 21<sup>st</sup> line, 2, Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: egor.boronko@mail.ru

**Evgeniy B. Mazakov** – Cand. Sci. (Eng.), Associate professor, Head of the Department of Information Systems and Computer Engineering of Saint Petersburg Mining University, 21<sup>st</sup> line, 2, Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: mazakov\_eb@pers.spmi.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4837-3191>

**Oleg A. Belyaevsky** – Leading Engineer of «TECHNOAUTOMATICS» LLC, Oktyabrskaya Revolyutsiya st., 20b, Irkutsk, 664007, Russia.

E-mail: vost-sibenergo@yandex.ru

**Vera S. Khloponina** – Cand. Sci. (Econ.), Chief Scientific Secretary of Saint Petersburg Mining University, 21<sup>st</sup> line, 2, Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: [Khloponina\\_VS@pers.spmi.ru](mailto:Khloponina_VS@pers.spmi.ru)

<https://orcid.org/0000-0001-9029-2788>

Статья поступила в редакцию 11.05.2022; принята к публикации после рецензирования 23.05.2023; опубликована онлайн 26.09.2023.

Submitted 11.05.2022; accepted 23.05.2023; published online 26.09.2023.

---