

# Разработка математической модели электропривода стрелочного перевода для нейронной сети

А. Н. Ильюшина

Санкт-Петербургский технический колледж  
управления и коммерции  
bdbyu@mail.ru

Н. А. Шатилова

Санкт-Петербургский горный университет  
n\_a\_shatilova@mail.ru

И. М. Новожилов

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

**Аннотация.** Рыночные отношения, требуют повышения качества конечного продукта одновременно со снижением его себестоимости. Это возможно только в случае разработки принципиально новых подходов к анализу, обработки, и выдачи управленческих решений для автоматизации технологического процесса. В данной статье авторы анализируют новые подходы в измерениях физических величин. Рассматривают применение теории систем с распределенными параметрами для идентификации физических параметров технологических процессов. Рассматривают возможность применения интеллектуальных систем для идентификации этих объектов. В качестве объекта исследования авторы рассматривают добывающие отрасли минерально-сырьевого комплекса.

**Ключевые слова:** идентификация систем, измерения, анализ, датчики, нефть, газ, уголь

## I. ВВЕДЕНИЕ

В условиях постоянного растущего спроса остро встает вопрос повышения качества продукции, с одновременным снижением его себестоимости. По оценкам специалистов [1], последние несколько лет, наблюдается ежегодный 5–10 % рост покупательской способности конечного потребителя. Однако не наблюдается аналогичный рост производства. Во многих странах наблюдается падение или замедление роста ВВП. Это обусловлено множеством факторов [2, 3]. В условиях экономического кризиса огромную роль сыграло приостановка производства в 2019 году. Однако возобновление производства вышло на докризисный уровень уже к концу 2021 года. Воспользовавшись приостановкой производства, многие компании произвели модернизацию оборудования. Переведя решение транспортных задач на использование альтернативных источников энергии. Биотопливо для осуществления перевозок существенно снизило конечную стоимость продукта [4]. В решении задач минерально-сырьевого комплекса это позволило существенно сократить выбросы в атмосферу [5–8]. Таким образом, к концу 2022 года были исчерпаны основные экономические возможности повышения экономической эффективности производства.

Альтернативное направление повышения экономической эффективности это совершенствование технологической цепочки. Зачастую это достигается путем глубокого анализа существующего технического решения. Анализа закономерностей протекания процессов, выявления проблем, анализа путей решения выявленных проблем и выработки соответствующего технического решения. Современные технологии позволяют получать техническое решение множеством способов. Например, технические решения, основанные на введении в автоматику регуляторов, могут быть построены по технологиям, принятым в системах с сосредоточенными параметрами (такие системы обладают высокой скоростью реакции, но невысокой точностью регулирования) или распределенными параметрами (такие системы обладают высокой точностью, но низкой скоростью расчета, поэтому применяются совместно с нейронными сетями или параллельными алгоритмами). Так же для решения таких задач можно применять синергетические, стохастические и робастные методы. Таким образом, существует достаточно большое количество методов анализа и идентификации процессов и систем. Выбор оптимального метода решения не представляется возможным, ввиду большого количества положительных и отрицательных сторон у каждого метода.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В рамках данного исследования ставится задача обобщения существующих методов решения, задач анализа объекта управления. Обзор примеров применения данных методов. Решение технической задачи анализа объекта минерально-сырьевого комплекса с помощью теории систем с распределенными параметрами.

## III. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ РЕШЕНИЯ

Для описания объектов минерально-сырьевого комплекса чаще всего используют регрессионные (или основанные на них) методы [9, 10]. Технические решения, направленные на оптимизацию процесса добычи угля [11, 12], базируются на решении сеточными

методами. Объекты управления, таких методов представляются в виде множества точек, расположенных на поверхности исследуемого объекта. Чаще всего на решения анализа таких объектов используются программные продукты GEOVIA Surpac, GIM Suite, CGG GeoSoftware, CREDO, MIDAS Information Technology, DrillSite и др. [13]. Они обладают достаточным функционалом для решения большинства задач по разработке месторождения карьерным или шахтным способом. В случае применения модуля нейронной сети [14, 15] появляется возможность визуального отображения и построения более точных сеточных моделей. Для построения более точных моделей используют сеточные методы. Особенность таких методов заключается в рассмотрении объекта управления в сеточном виде. В работах А.В. Мартиросяна [16, 18] рассматриваются геологические объекты с учетом пространственной распределённости объекта. Такие модели обладают высокой точностью. Но достаточно низкой динамичностью построения. В работе [17] авторы применили для анализа таких полей гибридный суперкомпьютер, позволяющий применить теорию параллельных алгоритмов, для решения задач анализа больших объемов данных. Применение технологии Nvidia CUDA позволило представить геологический пласт как многослойный объект. В качестве векторов движения потоков выступали направления движения водоносных горизонтов. Таким образом, авторы сформировали достаточно большой объем данных описывающих не только структуру водоносного и водоупорного пласта, но позволили рассчитать коэффициенты водоотдачи. Аналогичную технологию применили авторы [19, 20] для повышения нефтеотдачи пласта сложной формы. Особенностью таких месторождений является наличие в нефти асфальтенов. Которые существенно снижают реологические свойства нефти в зависимости от температуры окружающей среды. В большинстве случаев такие месторождения закрываются после понижения пластового давления. Авторы в своем исследовании показывают, что при рациональном использовании пластового давления имеется возможность создания условий для поддержания пластового давления на заданном уровне. Необходимо отметить, что гидрогеологические параметры объекта в природе имеют многосвязную, многопараметрическую структуру. Описание таких объектов происходит за счет выявления пространственных вектор-функции оператора объекта. В работах [20–26] показано достаточно подробное построение таких функций. Необходимо отметить, что практическое применение этих функции осложнено достаточно громоздким математическим аппаратом. Поэтому моделирование таких объектов происходит чаще всего на суперкомпьютерах или высокопроизводительных системах. Применение данных методов на бортовых системах очень ограничено. Так как бортовые системы устанавливают жесткие массогабаритные ограничения. В этом случае приходится находить баланс между точностью и технической возможностью.

Таким образом, на основе проведенного анализа можно сделать вывод о широком спектре применения теории систем с распределенными параметрами. Однако, их применение данной теории возможно исключительно

совместно с теорией параллельных алгоритмов. В противном случае невозможно обеспечить высокую скорость вычислений.

#### IV. ЧИСЛЕННЫЙ ПРИМЕР

Рассмотрим математическую модель исполнительного механизма исследуемой системы – стрелочного перевода. Она представляет собой механическую и электромагнитную составляющие.

Наиболее целесообразным представляется рассмотрение механической части стрелочного перевода как трехмассовой системы с последовательным соединением упругих масс (рис. 1), где под первой массой  $J$  рассматриваются моменты инерции ротора  $J_{pm}$  и приведенный к валу двигателя момент инерции редуктора  $J_{po}$ . Второй и третьей массой являются первый  $m_2$  и второй  $m_3$  остяк стрелки соответственно [27]. Первой упругой связью рассмотрена рабочая тяга  $C_{yp}$ , приведенная от шибера к ближайшему остяку, дополнительной упругой связью одного остяка с другим рассмотрена  $C_{ум}$  межостряковая тяга.

Подход рассмотрения стрелочного перевода как трехмассовой системы можно выделить более целесообразным, ввиду оказания влияния упругих элементов связи на динамические процессы в стрелочном переводе.

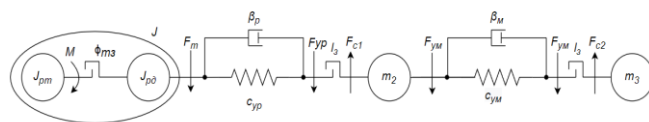


Рис. 1. Расчетная схема стрелочного перевода

На рисунке приняты следующие обозначения:  $M$  – электромагнитный момент,  $F_m$  – сила тяги двигателя,  $\varphi_{mz}$  – технологический зазор,  $l_3$  – зазор в креплениях тяг,  $F_{yp}$  – упругая сила в рабочей тяге,  $F_{ум}$  – упругая сила в межостряковой тяге,  $F_{c1}, F_{c2}$  – силы сопротивления первого и второго остяка соответственно;  $C_{yp}, C_{ум}$  – упругости рабочей и межостряковой тяг соответственно;  $\beta_p, \beta_m$  – коэффициенты внутреннего вязкого трения рабочей и межостряковой тяг соответственно;  $m_2, m_3$  – вторая и третья массы соответственно.

Подлежат учету при рассмотрении схемы технологический зазор и зазор в соединениях крепления тяги с шибером и остяком [27].

При переводе стрелки перемещаются ее остяки 2 и 7, межостряковая тяга 3 и рабочая 4 тяги. Усилие, затраченное на перевод стрелки, состоит в преодолении сопротивления перемещаемых частей по поверхностям перемещения, а также преодоления сопротивления в шарнирах.

Усилие, необходимое для преодоления сопротивления перемещаемых частей при переводе стрелок, определяется силой трения, возникающей при движении элементов. Величину силы трения можно определить, разделив стрелку на некоторое количество  $k$

равных элементов определенной длины  $l$  каждый. Вес каждого элемента обозначим  $q_1, q_2, \dots, q_k$ . Вес каждого элемента будет иметь отличное значение, ввиду изменения веса частей острияков 2 и 7, и за счет наличия или отсутствия перемещаемых частей в пределах элементов.

Используя общую формулу силы трения, запишем элементарные силы трения при перемещении подвижной части стрелки. В таком случае важно указать, что остряк лежит на сплошном горизонтальном основании и коэффициент трения между остряками и основанием одинаков по всей длине остряка и равен  $k_{mp}$ .

$$F_{mp1} = k_{mp} q_1, F_{mp2} = k_{mp} q_2, \dots, F_{mpk} = k_{mp} q_k.$$

Относительно корня острияков моменты запишутся следующим образом:

$$M_{mp1} = k_{mp} q_1 \frac{1}{2} l, M_{mp2} = k_{mp} q_2 \frac{1}{2} l, \dots, M_{mpk} = k_{mp} q_k \frac{2k-1}{2} l.$$

Суммарный момент силы трения определим как сумму моментов всех  $k$  элементов:

$$M_{mp} = \sum_{i=1}^k M_{mpi} = \frac{1}{2} k_{mp} l \sum_{i=1}^k q_i + 3q_2 + \dots + (2i-1)q_i.$$

Усилие  $F$  для преодоления сил трения при перемещении подвижных частей, приложенном на расстоянии  $L-a$  от корня остряка записывается в виде:

$$F = \frac{M_{mp}}{L-a} = \frac{1}{2} k_{mp} \frac{l}{L-a} \sum_{i=1}^k q_i + 3q_2 + \dots + (2i-1)q_i.$$

Преобразуя это уравнение в более общий вид, не подразумевая вес каждого участка как отличный от других участков вес, а именно принять допущение, что  $q_1, q_2, \dots, q_k = q$ , получим:

$$F = \frac{1}{2} k_{mp} \frac{l}{L-a} q \sum_{i=1}^k 1 + 3 + \dots + (2i-1) = \frac{1}{2} k_{mp} q k^2 \frac{l}{L-a}.$$

Так как общая длина остряка равна произведению количества одинаковых участков на их длину  $L=l*k$ , и общий вес остряка с принятым допущением равен произведению количества участков на вес участка  $Q=q*k$ , приведем выражение к другому виду:

$$F = \frac{1}{2} k_{mp} Q \frac{L}{L-a}. \quad (1)$$

Вывод усилия, затраченного на перемещение подвижных частей по единому горизонтальному основанию перемещения, приведен в выражении (1). Для получения общего усилия необходимо учесть влияние сил трения в шарнирах.

Коэффициент, учитывающий это влияние, обычно принимается равным 1,1. Вычислим расчетное усилие перевода стрелки.

$$F = 1,1 \cdot \frac{1}{2} k_{mp} Q \frac{L}{L-a} = 0,55 \cdot k_{mp} Q \frac{L}{L-a}.$$

Это выражение применяется для вычисления усилия перевода стрелки с вкладочно-накладочным креплением. Это крепление, также называемое корневым устройством, позволяет закрепить остряк в корне и обеспечить его подвижность в горизонтальной плоскости. Следовательно, при составлении выражения усилия перевода стрелки пренебречь данным коэффициентом нельзя.

Подводя промежуточный вывод по выведенным выражениям, можно сказать, что усилие перевода стрелки зависит от веса перемещаемых частей стрелки, реализации стыка корня стрелки и подводящего пути, протяженности остряка, расположения закрепления тяг перевода стрелки и коэффициента трения острияков о подушки. Подушка является тем местом, по которому перемещается стрелка при переводе. Следовательно, коэффициент трения зависит от состояния стрелки, смазки поверхности подушки, как и от состояния самой стрелочной подушки и других элементов перевода. Величина коэффициента может принимать значение от 0,05 до 0,3.

Роль технологического зазора и зазора в соединениях крепления тяги важна для обеспечения должного функционирования стрелочного перевода, а именно для безопасности перевода стрелок. Значение каждого зазора должно находиться в строго регламентированном диапазоне значений. В случае не поддержания зазоров вероятность врезания стрелки увеличивается, тем самым возможность схода рельсового транспорта с путей также повышается.

Для выбранного стрелочного перевода СП-6м характерна особенность технологического зазора между третьей и четвертой ступенью редуктора. Величина зазора составляет 46 градусов. Этот зазор необходим для облегчения разгона двигателя и запаса им некоторой кинетической энергии с целью срыва острияков в начале процесса перевода.

Определим упруго-вязкую силу в рабочей и межостряковой тяге. Силу вязкого трения по второму закону Ньютона можно записать как:

$$F_{sp} = \beta_{yp} S \frac{dv}{dt} - \text{сила вязкого трения в рабочей тяге;}$$

$$F_{am} = \beta_{ym} S \frac{dv}{dt} - \text{сила вязкого трения в } F_{12}$$

межостряковой тяге, где  $S$  – площадь перемещаемого тела,  $v$  – скорость перемещения;  $F_{yp} = -c_{yp} \Delta l_m$  – сила упругости в рабочей тяге;  $F_{ym} = -c_{ym} \Delta l_m$  – сила упругости в межостряковой тяге.

Упруго-вязкую силу запишем в следующем виде:

$$F_{sp} = \beta_{yp} S \frac{dv}{dt} - c_{yp} \Delta l_m - \text{упруго-вязкая сила в рабочей}$$

тяге;  $F_{am} = \beta_{ym} S \frac{dv}{dt} - c_{ym} \Delta l_m$  – упруго-вязкая сила в межостряковой тяге.

Для вычисления упругой силы необходимо вычисление упругости рабочей и межстряковой тяг, которая представляет собой стержень из металла, деформация которого происходит по продольной оси:

$$c_{ум} = c_{уп} = \frac{E\pi}{l_m} r_m^2,$$

где  $E$  – модуль упругости для стали,  $r_m$  – радиус рабочей тяги;  $l_m$  – длина рабочей тяги.

Жесткость рабочей тяги в модели принимается равной жесткости прямой связанной тяги в связи с тем, что эти тяги имеют одинаковый материал, длину и диаметр.

Численные значения моментов инерции ступеней редуктора рассчитываются исходя из их массы и размеров. Коэффициенты вязкого трения, исходя из результатов моделирования [2], принимаются равными от  $10^3$  до  $10^4$ .

Механическая часть стрелочного перевода рассмотрена. Далее приведем уравнения, которыми описываются электромагнитные процессы в двигателе постоянного тока последовательного возбуждения.

Математическая модель этих процессов, протекающих в цепи якоря, составляется по законам Кирхгофа. Ток якоря  $I_a$  сонаправлен с приложенным напряжением цепи.

Уравнение вращающего момента при установившемся режиме работы

$$M_e = M_a + M_0,$$

где  $M_a$  – электромагнитный момент, развиваемый якорем,  $M_0$  – момент, соответствующий различным потерям на трение и магнитным процессам.

При работе в неустановившемся режиме, следует учесть возникновение динамического момента вращения вследствие изменения скорости вращения.

$$M_{дин} = J \frac{dw}{dt},$$

где  $J$  – момент инерции вращающихся частей двигателя,  $w$  – скорость вращения двигателя. В общем случае уравнение моментов

$$M_e = M_a + M_0 + M_{дин} = M_{ст} + M_{дин},$$

где  $M_{ст}$  – момент статических сил. Уравнение моментов при неустановившемся режиме можно записать следующим образом:

$$M_e - M_{ст} = J \frac{dw}{dt}.$$

Это выражение является одним из системы уравнений, описывающих работу двигателя постоянного тока. Уравнение напряжения двигателя постоянного тока, также описывающее работу двигателя, принимает вид:

$$u = (L_a + L_e) \frac{di}{dt} + (r_a + r_e)i + e_a,$$

где  $L_a, L_e$  – самоиндуктивности и  $r_a, r_e$  – сопротивления обмоток якоря и возбуждения соответственно.

Второй и третий элемент суммы составляют уравнение напряжения в установившемся режиме работы. В неустановившемся режиме уравнение напряжения следует записывать с учетом ЭДС самоиндукции.

Так как рассматривается двигатель с последовательным возбуждением, ток  $i$  равен току якоря и току обмотки возбуждения. Также самоиндуктивности обмоток якоря и возбуждения суммируются в виду последовательного расположения. Сопротивления якоря и обмотки возбуждения аналогично суммируются.

Основой работы двигателя постоянного тока является явление электромагнитной индукции. Применительно к рассматриваемому двигателю закон электромагнитной индукции можно записать в следующем виде:

$$e_a = k_E w_m \Phi_e,$$

где  $k_E$  – коэффициент, зависящий от конструктивных элементов машины,  $\Phi_e$  – магнитный поток.

ЭДС (электродвижущая сила) якоря рассматривается в виду того, что при вращении якоря в его обмотке возникает ЭДС индукции, направленная навстречу току и приложенному напряжению питания.

Вследствие того, что ток якоря и ток возбуждения равны, и изменяются в широких пределах, магнитный поток изменяется вместе с ним. Магнитный поток можно записать для двигателя постоянного тока последовательного возбуждения:

$$\Phi_e = k_\phi i,$$

где  $k_\phi$  – коэффициент пропорциональности.

Таким образом, можно составить систему уравнений для стрелочного перевода СП-6м.

$$\left\{ \begin{array}{l} u = (L_a + L_e) \frac{di}{dt} + (r_a + r_e)i + e_a, \\ J \frac{dw}{dt} = M - M_n, \\ \Phi_e = k_\phi i, \\ e_a = k_E w_m \Phi_e, \\ F = 1,1 \cdot \frac{1}{2} k_{mp} Q \frac{L}{L-a} = 0,55 \cdot k_{mp} Q \frac{L}{L-a}, \\ F_{ep} = \beta_{yp} S \frac{dv}{dt} - c_{yp} \Delta l_m, \\ F_{ам} = \beta_{ум} S \frac{dv}{dt} - c_{ум} \Delta l_m. \end{array} \right.$$

Разработана математическая модели электропривода стрелочного перевода в виде трехмассовой электромеханической системы на основе двигателя постоянного тока, как основного исполнительного механизма системы автоматизации участка рельсового пути.

Для обучения нейронной сети используется следующий программный код:

```
#Функция обучения модели
def train_model(model, loss, optimizer, scheduler,
num_epochs):
    dataloader = train_dataloader
    *****
    running_loss = 0. #Зануление предыдущих
значений
    running_acc = 0.
    for inputs, labels in tqdm(dataloader):
        inputs = inputs.to(device)
        labels = labels.to(device)
        optimizer.zero_grad()
        *****
        preds = model(inputs).logits #Вычисление
предсказания нейронной сети
        loss_value = loss(preds, labels)
        *****
        preds_class = preds.argmax(dim=1)
#Уверенность в предсказании
    loss_value.backward()#Настройка параметров
    optimizer.step()
```

Влажность влияет на корректную работу всей системы в целом. От рассмотренного электропривода, до камеры. Так, при высокой влажности на камере образуется конденсат, поэтому система управления сработает некорректно, т. к. нейронная сеть не сможет распознать на изображении вагонетку и вместо того, чтобы определить корректное направление движения вагонетки, она будет направлена в ту сторону, в которую направлены острия стрелочного перевода. Датчик расстояния при высокой влажности будет работать на меньшее рабочее расстояние, т. к. при таких окружающих условиях пыль налипает на излучатель толстым слоем и/или затвердевает.

## В. ВЫВОДЫ

В рамках данного исследования получена математическая модель, позволяющая произвести обучение и настройку нейронной сети в режиме параллельного алгоритма. Важной особенностью данной системы уравнений является возможность параллельного расчета каждого уравнения на отдельном ядре процессора. В представленном случае разработана модель для 8-ядерного процессора. Однако представленная методика и анализ позволяет применять данную методику для любой задачи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] <https://www.finam.ru/international>
- [2] Radoushinsky D.A., Radushinskaya A.I., Khaykin M.M. Improving the quality of implementation of the container transportation project along the NSR based on the environmental and energy transition agenda // *Polar Science*. 2022. №2023. pp. 100923-100923. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2022.100923>
- [3] Nikiforov A.A., Nikiforova V.D., Khaikin M.M. Some aspects of the problem of energy efficiency and energy saving in Russia // *E3S Web of Conferences*, 2021, 311, 05002. DOI: 10.1051/e3sconf/202131105002
- [4] Smirnova O., Kharitonova E., Babkin I., Pulyaeva V., Haikin M. Small-Scale Biofuel Production: Assessment of Efficiency // *International Journal of Technology*, 2021, 12(7), pp. 1417–1426. DOI: 10.14716/IJTECH.V12I7.5401

- [5] Kondrasheva N.K., Ereemeeva A.M. (2023). Production of biodiesel fuel from vegetable raw materials // *Journal of Mining Institute*. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.15>
- [6] Korshunov G.I., Ereemeeva A.M., Drebenstedt C. Justification of the use of a vegetal additive to diesel fuel as a method of protecting underground personnel of coal mines from the impact of harmful emissions of diesel-hydraulic locomotives // *J. Min. Inst.* 2021, 247, 39–47. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.5>.
- [7] Коршунов Г.И., Еремеева А.М., Серегин А.С. Обоснование снижения требуемого расхода воздуха при проветривании горных выработок угольных шахт с работающими дизельными двигателями // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022. № 3. С. 47–59. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_3\_0\_47.
- [8] Ereemeeva A.M., Korshunov G.I., Kondrasheva N.K. Method to reduce harmful emissions when diesel locomotives operate in coal mines // *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources* 2019. 2020. №1. pp. 10-16. DOI: 10.1201/9781003014577-2
- [9] Kazanin O.I., Sidorenko A.A., Sidorenko S.A., Ivanov V.V., Mischo H. High productive longwall mining of multiple gassy seams: best practice and recommendations // *Acta Montanistica Slovaca* link is disabled. 2022. №27. pp. 152-162. <https://actamont.tuke.sk/pdf/2022/n1/11kazanin.pdf>
- [10] Sidorenko A.A., Sidorenko S.A., Ivanov V.V. Numerical modelling of multiple-seam coal mining at the Taldinskaya-Zapadnaya-2 mine ARPN // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2021. №5. pp. 568-574.
- [11] Сидоренко А.А., Мешков С.А. Обоснование параметров технологических схем интенсивной отработки склонных к самовозгоранию мощных угольных пластов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022. № 6–1. С. 83–99. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_61\_0\_83.
- [12] Казанин О.И., Мешков А.А., Сидоренко А.А. Перспективные направления развития технологической структуры угольных шахт // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022. № 6–1. С. 35–53. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_61\_0\_35.
- [13] Stark T.J. Unwrapping instantaneous phase to generate a relative geologic time. // 73rd Annual International Meeting, Seg Technical Program Expanded Abstracts, 1707–1710. DOI:10.1190/1.1844072
- [14] Wu X. and D. Hale, *Horizon volumes with interpreted constraints*, *Geophysics*, 2015, 80(2), IM21-IM33 <https://doi.org/10.1190/geo2014-0212.1>
- [15] Hongliu Zeng, Milo M. Backus, Kenneth T. Barrow, and Noel Tyler, (1998), “Stratal slicing, Part I: Realistic 3-D seismic model,” // *GEOPHYSICS* 63: 502-513. <https://doi.org/10.1190/1.1444351>
- [16] Martirosyan, A.V., Ilyushin, Y.V. The Development of the Toxic and Flammable Gases Concentration Monitoring System for Coalmines // *Energies* 2022, 15, 8917. <https://doi.org/10.3390/en15238917>
- [17] Martirosyan, A.V., Ilyushin, Y.V. Modeling of the Natural Objects Temperature Field Distribution Using a Supercomputer. *Informatics* 2022, 9,62. <https://doi.org/10.3390/informatics9030062>
- [18] Martirosyan A.V., Ilyushin Y.V., Afanaseva O.V. Development of a Distributed Mathematical Model and Control System for Reducing Pollution Risk in Mineral Water Aquifer Systems // *Water* 2022, 14(2), 151; <https://doi.org/10.3390/w14020151>
- [19] Ilyushin Y.V. Development of a Process Control System for the Production of High-Paraffin Oil. *Energies* 2022, 15, 6462. <https://doi.org/10.3390/en15176462>
- [20] Ilyushin Yury Valeryevich & Fetisov Vadym. (2022). Experience of virtual commissioning of a process control system for the production of high-paraffin oil. *Scientific Reports*. 12. 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21778-0>.
- [21] Kukharova T.V., Ilyukhina Y.A., Shestopalov M.Y. Development of a Methodology for Controlling the Process of Heating Metal Blanks in a Methodical Furnace // *Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus* 2022, 2022, pp. 718–721. DOI: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755574.
- [22] Kukharova T.V., Utkin V.A., Pershin I.M. Modeling of a Decision Support System for a Psychiatrist Based on the Dynamics of Electrical Conductivity Parameters // *Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus* 2021, 2021, pp. 975–978, 9396273. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396273.
- [23] Pershin I.M., Kukharova T.V., Tsapleva V.V. Designing of distributed systems of hydrolithosphere processes parameters control

- for the efficient extraction of hydromineral raw materials // Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1728(1), 012017. DOI 10.1088/1742-6596/1728/1/012017.
- [24] Фёдоров М.С., Мартиросян А.В., Кухарова Т.В. Исследование особенностей связи гидрогеологических объектов // Международная научная конференция по проблемам управления в технических системах, CTS 2021, 2021, pp. 34–38. DOI: 10.1109/CTS53513.2021.9562910.
- [25] Martirosyan K.V., Chernyshev A.B., Martirosyan A.V., Tatyana K.V. Formation of the Anterior Heating Function under the Action of Uniformly Distributed Sources // Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIconRus 2020, 2020, pp. 755–760, 9038947. DOI: 10.1109/EIconRus49466.2020.9038947.
- [26] Першин И.М., Папуш Е.Г., Малков А.В., Кухарова Т.В., Спивак А.О. Оперативное управление режимами эксплуатации подземных вод // III Международная научная конференция по проблемам управления в технических системах (CTS'2019): Сб. докладов. Санкт-Петербург. С.98–101.
- [27] Буряковский С.Г., Маслий А.С., Пасько О.В., Смирнов В.В. Математическое моделирование переходных процессов в электроприводе стрелочного перевода – основном исполнительном элементе железнодорожной автоматики // Электротехника и электромеханика. 2020. № 4. С. 17-23. DOI 10.20998/2074-272X.2020.4.03. EDN GBSMHA.