

УДК 621.3.016.3: 621.311.212

*А.Б. Бакасова, bakasovaaina@mail.ru,*

*А.Р. Айдарова, aidarova\_2010@mail.ru*

*У.А. Калматов, ukalmatov@bk.ru*

*Т.К. Сатаркулов*

*Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова*

## **ЭЛЕКТРОКОТЕЛ НА ИНДУКЦИОННОМ СПОСОБЕ НАГРЕВА ВОДЫ КАК БАЛЛАСТНАЯ НАГРУЗКА ДЛЯ РЕГУЛИРОВКИ ЧАСТОТЫ МИКРО-ГЭС**

В статье в качестве вспомогательного способа стабилизации частоты предложена балластная нагрузка в виде электрокотла на индукционном способе нагрева, позволяющая плавную регулировку частоты микро-ГЭС в случае отказа основной. Работа электрокотла основана на запатентованном индукционном способе нагрева воды, находящейся в полости сплошного цилиндра из ферромагнитного материала, на который воздействует вращающееся магнитное поле, наводящее в нем вихревые электрические токи. Рассмотрены теоретико-методические основы исследования физических процессов в устройстве. Физические процессы в устройстве смоделированы с использованием студенческой версии пакета ELCUT. Представлен действующий макет системы отопления с использованием предложенного электрокотла.

**Ключевые слова:** электрокотел; индукционный способ нагрева; компьютерное моделирование; балластная нагрузка; стабилизации частоты микро-ГЭС.

### **Введение**

В работах [1, 2, 3] предложено устройство микро-ГЭС малой мощности с описанием нового способа, стабилизирующего частоту вращения гидротурбины. Основной способ стабилизации частоты (СЧ) опирается на использовании полого маховика с автоматически регулируемой массой, моментом инерции путем заполнения или удаления воды из полости и регулированием потока воды, который подается на вход гидротурбины. В работе [4] предложен вспомогательный способ СЧ путем использования дискретной балластной нагрузки в случае отказа основного способа СЧ. Недостатком предложенного способа является то, что для стабилизации требуется большое количество дозированных ступеней балластной нагрузки [5].

### **Постановка задачи**

Разработать электрокотел на индукционном способе нагрева воды (ИСНВ) в качестве балластной нагрузки для плавной регулировки частоты в случае отказа основной системы СЧ микро-ГЭС. Рассмотреть теоретико-методические основы исследования физических процессов в устройстве. На основе компьютерного моделирования исследовать электромагнитные и тепловые процессы и изготовить действующий макет электрокотла.

### **Описание конструкции электрокотла на ИСНВ и его положительные свойства**

Конструкция электрокотла показана рисунке 1, где 1 – теплоизолированный корпус; 2, 3 – соответственно втекающий и вытекающий из электрокотла поток воды; 4, 5, 6 – соответственно обмотки фаз *A, B, C*; 7 – магнитопровод (сердечник) для прохождения магнитного потока, возбуждаемого токами, протекающими в обмотках *A, B, C*; 8 – сплошной стальной ферромагнитный цилиндр; 9 – нагреваемая вода. На рисунке 2 показан действующий макет системы отопления на основе электрокотла с индукционным способом нагрева.

Работа электрокотла основана на запатентованном [6] индукционном способе нагрева воды, находящейся в полости сплошного цилиндра из ферромагнитного материала, на который воздействует вращающееся магнитное поле, наводящее в нем вихревые электрические токи.

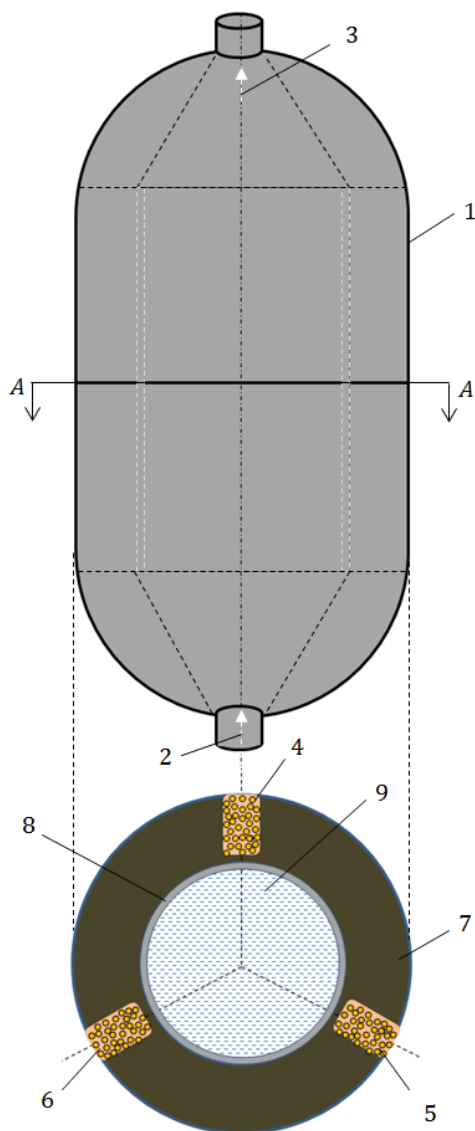


Рисунок 1 – Электрокотел

Для генерирования вращающегося магнитного поля используются три индуктора (многовитковые катушки) (4, 5, 6 рис.1), питающиеся от трехфазной сети.

Проходя через эти индукторы, переменный электрический ток создает переменное вращающееся магнитное поле, которое, воздействуя на сплошной железный цилиндр (СЖЦ), наводит в нем вихревые токи, нагревающие его. В результате теплопередачи нагревается вода, находящаяся в полости СЖЦ.

ИСНВ, кроме основного преимущества, заключающегося в возможности реализации плавности регулирования потребляемой мощности индуктором устройства, имеет следующие положительные свойства.

Преимущество ИСНВ заключается в разделении электрических питающих цепей и нагревательных элементов, в качестве которых обычно используют металлические стенки сосуда или трубопровода. При этом отсутствует электрическая коррозия нагревательных элементов, полная гальваническая развязка питающей электрической цепи от токопроводящего сосуда с водой гарантирует электробезопасность.

Большая поверхность теплопередачи создает большой поток мощности, относительно низкая температура нагревателя обеспечивает условия пожаробезопасности, исключает образование накипи. Сопутствующие индукционному нагреву магнитострикционные явления создают эффект самоочистения теплопередающей поверхности.



Рисунок 2 – Действующий макет системы отопления на основе электрокотла с индукционным способом нагрева

На рисунке 2 показаны элементы действующего макета системы отопления на основе электрокотла с индукционным способом нагрева, где 1 – индуктор; 2 – полый металлический (ферромагнитный) цилиндр, наполненный водой; 3 – чугунный радиатор отопления; 4 – расширительный бачок. Вода в этой системе является теплоносителем.

### **Теоретико-методические основы исследования физических процессов в устройстве**

Теория, положенная в основу анализа этих задач и их решения, изложена в [7, 8]. В основе решения электромагнитной задачи нагревательного устройства лежит система уравнений Максвелла:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho, \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0. \quad (4)$$

В этих уравнениях:

$\mathbf{H}$  – напряжённость магнитного поля;  $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} = \mathbf{J}_s + \mathbf{J}_e + \mathbf{J}_v$  – плотность тока проводимости, включающая в себя соответственно сторонние токи от источника, наведённые вихревые токи и токи, обусловленные движением тела в магнитном поле (плотность тока в нашей задаче состоит только из наведённых вихревых токов);

$\mathbf{B} = \mu\mu_0\mathbf{H}$  – магнитная индукция;

$\mathbf{E}$  – напряжённость электрического поля;

$\mathbf{D} = \varepsilon\varepsilon_0\mathbf{E}$  – электрическая индукция;

$\rho$  – плотность стороннего электрического заряда;

$\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума;

$\mu$  – относительная магнитная проницаемость, являющаяся в общем случае функцией от температуры и напряжённости поля;

$\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума;

$\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость;

$\sigma$  – удельная проводимость.

Ток смещения  $\partial\mathbf{D}/\partial t$  в проводниках отсутствует, тогда (3) исключается из рассмотрения, а (1) принимает следующий вид:

$$\operatorname{rot}\mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (5)$$

Аналитически решить эти уравнения для рассматриваемой конструкции очень трудно и даже невозможно в силу геометрической сложности объекта анализа, а также из-за нелинейных характеристик сердечника. Единственно возможными методами становятся численные методы. Для этого вводятся векторный магнитный потенциал  $\mathbf{A}$  и скалярный электрический потенциал  $V$ , удовлетворяющие следующим условиям:

$$\mathbf{B} = \operatorname{rot}\mathbf{A}, \quad (6)$$

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t} - \nabla V \quad (7)$$

Главным удобством в принятой двумерной осесимметричной постановке является то, что векторный магнитный потенциал имеет только одну составляющую  $A_z$ , нормальную к плоскости, в которой располагаются элементы. Вектора  $\mathbf{H}$  и  $\mathbf{B}$ , напротив, имеют в этой плоскости две составляющие – по  $x$  и  $y$ .

Из системы уравнений Максвелла с учётом принятых допущений и связей для проводящих областей можно записать следующую систему дифференциальных уравнений [8]:

$$\operatorname{rot} \frac{1}{\mu\mu_0} \operatorname{rot}\mathbf{A} - \nabla \frac{1}{\mu\mu_0} \operatorname{div}\mathbf{A} + \sigma \frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t} + \sigma\nabla V = 0, \quad (8)$$

$$\operatorname{div} \left[ \sigma \frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t} + \sigma\nabla V \right] = 0 \quad (9)$$

Отметим, что дальнейшие преобразования формул (8, 9) с целью их решения численным методом будем проводить в соответствии с [10] диссертацией Пищалева К.Е. «Технология высокочастотного индукционного нагрева насадных деталей роторов турбогенераторов и паровых турбин».

Для нахождения неизвестных в общем случае решается следующее дифференциальное уравнение:

$$\mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{g}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{g} = \mathbf{J}_i, \quad (10)$$

где  $\mathbf{g} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_e \\ v_e \end{bmatrix}$  – матрица степеней свободы;  $\mathbf{A}_e$  – магнитный векторный потенциал в узлах;  $v_e = \int V dt$  – интегрированный по времени скалярный электрический потенциал;  $\mathbf{C}$  и  $\mathbf{K}$  – матрицы коэффициентов;  $\mathbf{J}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{J}^A \\ \mathbf{I}^t \end{bmatrix}$  – матрица воздействий.

При синусоидальном характере воздействия (тока) в установившемся режиме можно перейти к гармоническому анализу, и тогда при нахождении неизвестных вместо (10) может быть использовано следующее уравнение:

$$[\mathbf{K} + j\omega\mathbf{C}]\mathbf{g} = \mathbf{J}_i \quad (11)$$

После решения дифференциального уравнения (10) или (11) с учётом граничных условий может быть найдена магнитная индукция:

$$\mathbf{B} = \text{rot} N_A^T \mathbf{A}_e, \quad (12)$$

где  $N_A$  – функция формы элемента. Далее может быть найдена и напряжённость магнитного поля:

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu\mu_0}. \quad (13)$$

Вихревая составляющая полного тока определяется как:

$$\mathbf{J}_e = -\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = -\sigma \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_A^T \mathbf{A}_e, \quad (14)$$

где  $n$  – количество точек интегрирования.

Для элементов, обладающих ненулевым сопротивлением и ненулевой плотностью протекающих через них токов, могут быть найдены потери в них по закону Джоуля-Ленца:

$$Q^j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{J}_{ti} \mathbf{J}_{ti}^* / \sigma, \quad (15)$$

где  $Q^j$  – мощность, выделяемая в объёме;  $\mathbf{J}_{ti}$  – полная плотность тока в точке интегрирования  $i$  (в нашем случае вихревая составляющая полного тока). Для анализа по первой гармонике (15) принимает следующий вид:

$$Q^j = \text{Re} \left( \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \mathbf{J}_{ti} \mathbf{J}_{ti}^* / \sigma \right). \quad (16)$$

Энергия магнитного поля в модели ( $W = Li^2/2$ ) определяется как:

$$W = \frac{1}{2} \int_V \mathbf{H} \mathbf{B} dV, \quad (17)$$

где  $V$  – объём, для которого считается запасенная энергия.

Решение тепловой задачи подчиняется закону теплопроводности Фурье:

$$c\rho \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_V(t), \quad (18)$$

в этом уравнении:

$c$  – теплоемкость;  $\rho$  – плотность;  $\lambda$  – теплопроводность;  $q_V$  – мощность объёмного тепловыделения.

Отметим, что для рассматриваемого круга задач явление тепломассопереноса не рассматривается, поэтому связанные с ним члены уравнения в общем виде исключены.

При определении расчётной области для моделирования применяются граничные условия второго и третьего родов:

$$P_{conv} = hS(T_m - T_c), \quad (19)$$

$$P_{rad} = \sigma \varepsilon S(T_m^4 - T_c^4), \quad (20)$$

где  $h$  – коэффициент конвективной теплоотдачи;  $S$  – площадь поверхности теплообмена;  $T_m$  – температура поверхности тела;  $T_c$  – температура среды;  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана,  $\varepsilon$  – коэффициент черноты [7].

Распределение внутренних источников теплоты является результатом электромагнитного анализа.

Как было отмечено выше, аналитически решить рассмотренные уравнения применительно к нашей задаче очень трудно и даже невозможно в силу геометрической сложности объекта анализа, а также из-за нелинейных характеристик сердечника. Единственно возможными методами становятся численные. В таких случаях совместное исследование электромагнитных и тепловых процессов, происходящих в нагревательном устройстве электродкотла, можно осуществить с помощью программных пакетов, в основе которых лежит метод конечных элементов.

## **Выбор программных пакетов для моделирования и исследования электромагнитного и теплового полей котла**

На рынке средств конечно-элементного моделирования ANSYS занимает лидирующие позиции, и имеется возможность решения поставленной нами задачи по анализу электромагнитных и тепловых процессов в электродоуле. При этом стоит отметить, что для решения нашей задачи можно использовать и другие программные пакеты.

COMSOL Multiphysics (Femlab) – имеет готовый модуль для расчёта индукционного нагрева по первой гармонике и теплового во временной области. Кроме того, возможно проведение анализа и решение контактных задач с учётом теплопроводности связанной задачи.

JMAG-Designer имеет возможности в итерационном режиме решать электромагнитные задачи, однако данный пакет не позволяет решать механическую задачу. Поэтому для получения решения комплексной задачи JMAG-Designer должен иметь двусторонние связи с пакетом Abaqus, имеющим возможность проведения теплового и механического анализов. Также в последних версиях Abaqus появились дополнительные возможности расчёта электромагнитных полей с учётом нелинейных магнитных свойств материалов.

Deform 2D/3D – пакет может быть использован для расчёта термического и механического воздействий на обрабатываемые металлы, учитывая как индукционный нагрев, так и посадку с натягом.

В Российской Федерации разработан пакет ELCUT [9], который имеет возможность решать в двумерной постановке электромагнитные, тепловые и механические задачи, однако только последовательно. Также в нем отсутствует возможность задания контакта, хотя разработчиком и предложена методика рассмотрения посадки с натягом.

Сравнительный анализ показывает, что решать поставленные задачи позволяют многие программные пакеты. Таким образом, для выбора среди них решающим становится вопрос доступности, поэтому, несмотря на то, что пакет ANSYS обладает необходимым для моделирования рассматриваемых процессов математическим аппаратом, в данной работе предпочтение отдано бесплатно-доступному программному комплексу ELCUT [9].

В основе всех вышеперечисленных пакетов лежит метод конечных элементов (МКЭ) [7, 8], обладающий большой гибкостью и пригодностью для описания устройств со сложной геометрией. Сущность МКЭ заключается в замене краевой задачи вариационной, при которой область  $D$  электромагнитного устройства разбивается на подобласти (элементы), и методом Рунца решается вариационная задача внутри каждого элемента. Иначе говоря, расчётная область разбивается на конечное число связанных между собой в узловых точках элементов для аппроксимации непрерывной функции дискретной моделью, строящейся на множестве кусочно-непрерывных функций (как правило, полиномов).

Задавая определенный контур, можно получить численные данные и графики изменения поля.

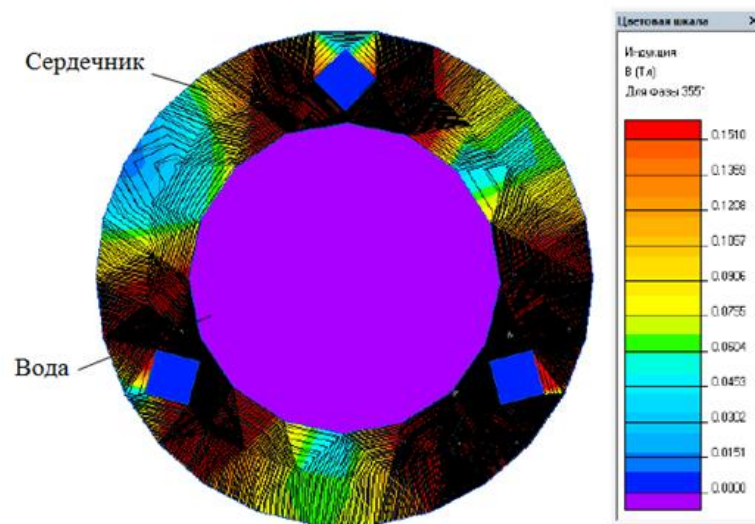


Рисунок 3 – Распределение индукции в сердечнике

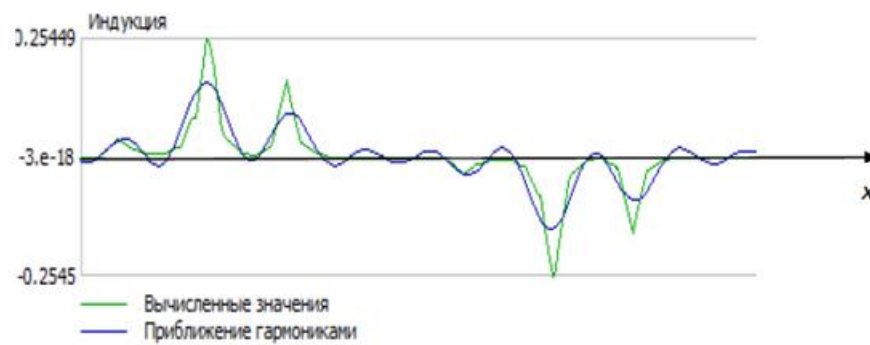


Рисунок 4 – Графики изменения электромагнитной индукции по оси  $x$

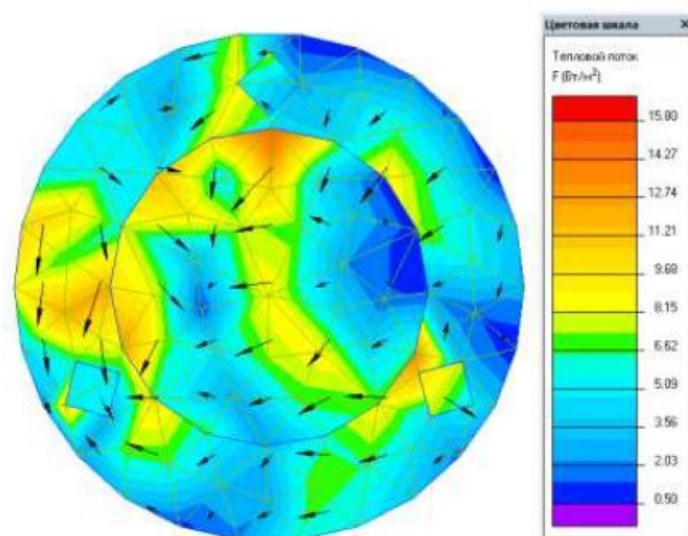


Рисунок 5 – Распределение теплового потока по всей конструкции

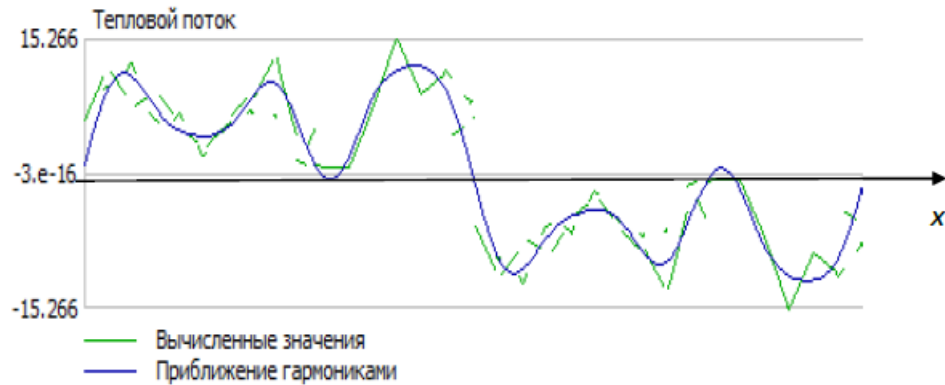


Рисунок 6 – Графики изменения теплового потока

На рисунке 3 и рисунке 4 представлены результаты моделирования по исследованию электромагнитного, а на рисунке 5 и рисунке 6 теплового полей предлагаемого электродкотла с применением студенческой версии ELCUT.

Компьютерная модель котла создана так, что магнитное поле сосредоточено в активном элементе (сердечнике), а тепловое поле – по всей конструкции.

Это реализуется соответствующим определением граничных условий. Кроме того, в программном пакете ELCUT при помощи связывания геометрической модели с электрической схемой получены картины изменения электромагнитного и теплового полей.

Результаты компьютерного моделирования показали эффективность работы предлагаемого устройства. Кроме того, результаты исследования на физической модели устройства подтвердили справедливость результатов компьютерного моделирования.

### **Заключение**

В работе предложена конструкция электродкотла на индукционном способе нагрева воды с возможностью использования его в качестве балластной нагрузки для вспомогательной регулировки частоты в случае отказа основной системы СЧ.

Для моделирования электротепловых процессов в электродкотле выбран программный пакет ELCUT, позволяющий решить поставленную задачу с учётом принятых допущений и доступный для использования.

Результаты компьютерного моделирования показали эффективность работы электродкотла. Кроме того, результаты исследования на физической модели устройства (рис.2) подтвердили справедливость результатов компьютерного моделирования.

### **Литература**

1. Бакасова А.Б. Моделирование микро-ГЭС малой мощности с маховиком, автоматически регулирующим момент инерции / А.Б.Бакасова, К.А. Сатаркулов, Г.Н. Ниязова, А.М.Яблочников, Г.К. Усубалиева // Информатика и системы управления. – 2019. – № 1 (59). – С. 36 – 45.
2. Ниязова, Г.Н. Разработка компьютерной модели системы стабилизации и управления частотой вращения турбины микро-ГЭС нового типа / Г.Н. Ниязова К.А. Сатаркулов З.С. – С. 43 – 51.
3. Сатаркулов, К.А. Способ стабилизации частоты автономной микро-ГЭС/ К.А.Сатаркулов А.Б. Бакасова Ж.С. Иманакунова Г.Н. Ниязова // Проблемы автоматизации и управления. – 2014. – №1 (26). – С. 20–23.
4. Бакасова, А.Б. Системы обеспечения электрической и тепловой энергией малого фермерского хозяйства в горных условиях / А.Б.Бакасова Т.К.



- Сатаркулов А.М. Яблочников // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. – 2023. – № 1 (65). – С. 796 – 803.
5. Яблочников, А.М. Обзор способов регулирования частоты вращения гидротурбин микро-ГЭС // Проблемы автоматизации и управления. – 2019. – №1(36). – С. 21– 29.
  6. Патент КР №683 С1. Индуктивный нагреватель жидкости / К. Сатаркулов и др.; Кыргызпатент. – №20020118.1.
  7. Сильвестер П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков. – М.: Мир. –1986.
  8. Кулон Ж.-Л., САПР в электротехнике /Ж.-Л., Кулон Ж.-К. Сабоннадьер// Пер. с франц. – М.: Мир, 1988. – 208 с. ил.
  9. ELCUT. – ООО "Тор". – Режим доступа: <http://elcut.ru/> – Электронный ресурс.
  10. Пищалева, К.Е.Технология высокочастотного индукционного нагрева насадных деталей роторов турбогенераторов и паровых турбин(диссертация).