

Научная статья

УДК 621.318

DOI: 10.55196/2411-3492-2022-1-35-128-136

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ПРОТИВОДЕЙСТВУЮЩЕГО УСИЛИЯ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОГО БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТА

Амур Григорьевич Фиапшев^{✉1}, Марат Мухамедович Хамоков²,
Олеся Хаутиевна Кильчукова³, Камила Султановна Розуматова⁴

^{1,2,3,4}Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова,
пр. Ленина, 1в, Нальчик, Россия, 360030

^{✉1}energo.kbr@rambler.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3080-0901>

²h-mm_1@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4736-1546>

³energo_80@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9796-3775>

⁴krozumatova@yandex.ru

Аннотация. В статье на основании анализа коммутационных аппаратов и различных электроустановок показано, что основным их элементом является быстродействующее электромагнитное устройство, осуществляющее функции реагирующего органа и привода. В качестве такого устройства может использоваться как поляризованный, так и нейтральный электромагнит. До настоящего времени наибольшее распространение получили поляризованные электромагниты, как наиболее быстродействующие. Однако существует ряд конструкций электромагнитов нейтрального типа, которые могут заменить поляризованные электромагниты, в частности, в автоматических выключателях электровозов. Анализ состояния проблемы показал, что методы расчета и исследования быстродействующих электромагнитных устройств требуют более строгих и точных математических расчетов, позволяющих заменить экспериментальные исследования в реальных аварийных режимах и одновременно автоматизировать труд исследователей путем широкого применения более точных расчетов. Приведены результаты теоретических исследований процессов, протекающих в быстродействующих электромагнитах, математические зависимости для расчета параметров и характеристик, как при статических, так и динамических режимах работы. Получено уравнение для определения оптимальной противодействующей силы, при которой время цикла минимально. Разработаны математические алгоритмы для расчета статических и динамических характеристик быстродействующих электромагнитов с учетом насыщения стали, потоков рассеяния, вихревых токов в массивных элементах магнитопроводов и токопроводах.

Ключевые слова: магнитная система, электромагнит, быстродействие электромагнита, магнитопровод, время срабатывания электромагнита, время отпускания электромагнита

Для цитирования. Фиапшев А.Г., Хамоков М.М., Кильчукова О.Х. и др. Выбор оптимального противодействующего усилия для достижения максимального быстродействия электромагнита // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова. 2022. 1(35). С. 128–136. DOI: 10.55196/2411-3492-2022-1-35-128-136

Research Article

SELECTION OF THE OPTIMAL REACTIVE FORCE TO ACHIEVE
THE MAXIMUM SPEED OF THE ELECTROMAGNET

Amur G. Fiapshev^{✉1}, Marat M. Khamokov², Olesya Kh. Kilchukova³, Kamila S. Rozumatova⁴
^{1,2,3,4}Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, Lenin Avenue,
1v, Nalchik, Russia, 360030
^{✉1}energo.kbr@rambler.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3080-0901>
²h-mm_1@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4736-1546>
³krozumatova@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4736-1546>
⁴krozumatova@yandex.ru

Abstract. Based on the analysis of switching devices and various electrical installations, the article shows that their main element is a high-speed electromagnetic device that performs the functions of a reacting organ and a drive. Both a polarized and a neutral electromagnet can be used as such a device. So far, polarized electromagnets have been most widely used as the fastest ones. However, there are a number of designs of neutral type electromagnets that can replace polarized electromagnets, in particular in electric locomotive circuit breakers. An analysis of the state of the problem showed that the methods for calculating and studying high-speed electromagnetic devices require more rigorous and accurate mathematical calculations that allow replacing experimental studies in real emergency conditions and at the same time automating the work of researchers through the widespread use of more accurate calculations. The results of theoretical studies of processes occurring in high-speed electromagnets, mathematical dependencies for calculating parameters and characteristics, both in static and dynamic modes of operation, are presented. An equation was obtained to determine the optimal counteracting force, at which the cycle time is minimal. Mathematical algorithms have been developed for calculating the static and dynamic characteristics of high-speed electromagnets, taking into account steel saturation, leakage fluxes, eddy currents in massive elements of magnetic circuits and current conductors.

Keywords: magnetic system, electromagnet, electromagnet speed, magnetic circuit, electromagnet response time, electromagnet release time

For citation. Fiapshev A.G., Khamokov M.M., Kilchukova O.Kh. et al. Selection of the optimal reactive force to achieve the maximum speed of the electromagnet. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta im. V.M. Kokova* [Izvestiya of the Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov]. 2022;1(35):128–136. (In Russ.).
DOI: 10.55196/2411-3492-2022-1-35-128-136

Введение. В ряде случаев практического применения электромагнитов требуется, чтобы время их срабатывания было возможно меньшим, т.е. чтобы они имели максимальное быстродействие.

Быстродействующие электромагниты применяются в самых различных случаях: для реле защиты, автоматики и контроля, для привода быстродействующих автоматических воздушных выключателей, для использования в электромеханических отбойных молотках, вибраторах и т.п.

В зависимости от области применения и назначения быстродействующего электромагнита время его срабатывания колеблется от единиц до десятков миллисекунд.

Получение увеличенной скорости срабатывания может быть достигнуто двумя путями:

1) когда требуемая скорость срабатывания обеспечивается самим электромагнитом, конструктивные и расчетные параметры которого обеспечивают быстродействие;

2) когда необходимую скорость срабатывания получают благодаря применению специальных схем, в то время как используемый

при этом электромагнит сам по себе не является быстродействующим.

Большое применение в качестве быстродействующего привода находят поляризованные электромагниты.

На скорость срабатывания непосредственно влияют основные параметры электромагнитов, их конструктивное выполнение и материал магнитной цепи. В быстродействующих электромагнитах наличие короткозамкнутых обмоток, металлических каркасов катушки и любых других путей для прохождения вихревых токов, образованных металлическими деталями электромагнитов, является недопустимым, так как влечет за собой увеличение его времени срабатывания.

При разработке конструкции магнитопровода электромагнита должны быть приняты меры, направленные к уменьшению влияния вихревых токов, которые противодействуют намагничиванию и размагничиванию стали магнитопровода и этим замедляют действие электромагнита. Целесообразно применять такие сорта стали, которые имеют меньший остаточный магнетизм.

Наиболее часто детали магнитопроводов быстродействующих электромагнитов выполняют из магнитных материалов с высоким удельным электрическим сопротивлением (от $4,5 \times 10^{-5}$ до 6×10^{-5} ом \times см), к которым относятся стали с примесью кремния (обычно около 4% Si). В некоторых случаях применяют никелевые стали (примерно с 50% содержанием никеля). Эти сплавы имеют высокую проницаемость и высокое удельное электрическое сопротивление.

Для снижения влияния вихревых токов часто магнитопроводы быстродействующих электромагнитов выполняют шихтованными, состоящими из отдельных стальных листов, изолированных друг от друга. Если это неудобно с конструктивной точки зрения (например, в электромагнитах клапанного типа с внешним якорем), то стремятся применять, возможно, более тонкие якоря, а в сердечниках делают специальные проточки для увеличения длины пути и повышения сопротивления вихревым токам. Следует также обращать внимание на трение в осях и опорах якоря, которое должно быть по возможности уменьшено.

Кроме того, для быстродействующих электромагнитов характерным является такой выбор параметров, при которых тяговая сила электромагнита при начальном зазоре и установившемся токе в несколько раз превосходит противодействующую силу.

Все эти вопросы относятся к общим принципам конструирования быстродействующих электромагнитов.

Цель исследования – разработать математические алгоритмы для расчёта статических и динамических характеристик быстродействующих электромагнитов с учётом насыщения стали, потоков рассеяния, вихревых токов в массивных элементах магнитопроводов и токопроводах.

Материалы, методы и объекты исследования. В ходе теоретических исследований переходных процессов в электромагнитной системе использовались методы конечных последовательных интервалов и совместного решения дифференциальных уравнений цепи и поля. При исследовании влияния быстродействующих электромагнитов приведены расчеты, и исследования переходных электромагнитных процессов в быстродействующих электромагнитах с учётом насыщения стали и вихревых токов в элементах магнитопроводов и токопроводах. Исследованы на основе численных экспериментов влияния различных факторов на быстродействие электромагнитов.

Результаты исследования. Создание быстродействующих электромагнитов постоянного тока является одной из важных задач электромеханики. Под быстродействием электромагнита в данном случае имеется в виду способность достаточно быстро срабатывать и возвращаться в исходное положение. Имеющиеся, например, рекомендации по повышению быстродействия электромагнитов [1, 2] относятся к способам уменьшения времени срабатывания или времени отпускания электромагнита. Однако все рекомендуемые меры, которые ведут к уменьшению времени срабатывания, одновременно приводят к увеличению времени отпускания и наоборот. Часто же бывает и необходимо уменьшение суммы времени срабатывания и времени отпускания (так называемого «цикла»). Одним из факторов, влияющих на вре-

мя цикла электромагнита, является величина противодействующей силы. Известно, что если противодействующая сила для данного электромагнита больше, чем электромагнитная сила при номинальном токе и начальном зазоре, то время срабатывания равно бесконечности. Если же противодействующая сила меньше, чем электромагнитная сила, обусловленная осадочной индукцией, то бесконечности равно время отпущения и, естественно, время цикла. Это значит, что для заданного электромагнита существует противодействующая сила, при которой время цикла минимально.

Время цикла $t_{\text{ц}}$ складывается из времени трогания при срабатывании t_1 , времени движения при срабатывании t_2 , времени трогания при отпущении t_3 и времени движения при отпущении t_4 . Определив производные каждого слагаемого при противодействующей силе P и, приравняв сумму этих производных нулю, получим уравнение, из которого можно определить $P_{\text{опт}}$ – оптимальную противодействующую силу, при которой время цикла минимально.

При этом будем считать противодействующую силу постоянной по ходу якоря. Будем также считать, что сечение магнитопровода на всех участках одинаково и магнитная система в процессе срабатывания не насыщена. Кроме того, не будем учитывать влияния вихревых токов, что справедливо в случае шихтованного магнитопровода.

Процесс включения электромагнита на постоянное напряжение описывается (до момента трогания) следующим дифференциальным уравнением:

$$u = iR + L_n \frac{di}{dt}, \quad (1)$$

где:

u – номинальное напряжение;

R – сопротивление цепи обмотки;

L_n – индуктивность электромагнита с учетом потоков выпучивания и утечки и магнитного сопротивления магнитопровода, подсчитанная при начальном зазоре и тоже, равно $0,5$ номинального;

i – мгновенное значение тока;

t – время, отсчитываемое от момента подачи напряжения u .

Определив из этого уравнения t_1 и взяв производную $\frac{dt_1}{dP}$, получим:

$$\frac{dt_1}{dP} = \frac{L_n}{4RF_n} = \frac{1}{x(1 - 0,5x)}, \quad (2)$$

где:

F_n – электромагнитная сила при начальном зазоре и токе, равном половине номинального, а

$$x = \sqrt{\frac{P}{F_n}}. \quad (3)$$

При определении $\frac{dt_2}{dP}$ будем считать, что соотношение магнитного потока, найденного без учета рассеяния и выпучивания, к потоку, определенному с учетом этих факторов, остается постоянным при перемещении якоря из начального положения в конечное. Это допущение справедливо, так как в течение большей части времени движения скорость якоря мала [3]. При этом процесс движения якоря при срабатывании следующей системой дифференциальных уравнений:

$$u = iR + k_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (4)$$

$$m \frac{d^2s}{dt^2} + P = k_2 \Phi^2, \quad (5)$$

$$i = (k_3 - k_4 s)\Phi, \quad (6)$$

где:

m – приведенная масса перемещающихся деталей;

s – перемещение якоря;

Φ – мгновенное значение магнитного потока в рабочем зазоре.

Коэффициенты k_1, k_2, k_3, k_4 во время движения якоря остаются постоянными и определяются для начального и конечного положения якоря при токе, равном $0,5$ номинального.

$$k_1 = \frac{\Psi_n}{\Phi_n}, \quad (7)$$

$$k_2 = \frac{F_n}{\Phi_n^2}, \quad (8)$$

$$k_3 = \frac{I_n}{\Phi_n}, \quad (9)$$

$$k_4 = \frac{\frac{I_H}{\Phi_H} - \frac{I_H}{\Phi_K}}{\delta}, \quad (10)$$

где:

I_H – ток, равный половине номинального;
 Ψ_H – потокоцепление при начальном зазоре и токе, равном I_H ;

Φ_H – поток при конечном зазоре и токе, равном I_H ;

δ – ход якоря.

Решая эту систему уравнений с помощью степенных рядов и, ограничиваясь первым членом ряда $s = f(t)$, подобно тому, как это сделано в [2], получаем формулу для t_2 :

$$t_2 = \sqrt[3]{\frac{3\delta L_H m}{R(2\sqrt{F_H P} - P)^*}}, \quad (11)$$

Беря производную по P , получаем:

$$\frac{dt_2}{dP} = -\sqrt[3]{\frac{3\delta L_H m}{144RF^4}} \sqrt[3]{\frac{1}{1 - 0,5x} \frac{1 - x}{1 - 0,5x^2(1 - 0,5x)}}. \quad (12)$$

Рассматривая процесс трогания якоря электромагнита при отпуске, надо учитывать следующие обстоятельства. Во-первых, современные быстродействующие электромагниты постоянного тока управляются обычно полупроводниковыми усилителями. В выходном каскаде такого усилителя всегда имеется диод, включенный параллельно цепи электромагнита. Этот диод нужен для снятия перенапряжений, возникающих при отключении электромагнита и опасных для транзистора выходного каскада усилителя. Поэтому отключение электромагнита можно рассматривать как закорачивание его цепи. Во-вторых, при притянутаом якоре можно пренебречь выпучиванием и рассеиванием, так как конечный зазор обычно гораздо меньше начального. В-третьих, в процессе спадания магнитного потока после закорачивания цепи сработавшего электромагнита нельзя считать систему ненасыщенной и пренебрегать гистерезисом. Поэтому зависимость между индукцией B и напряженность H_μ в стали будем выражать аналитически, формулой, приведенной в [1]:

$$H_\mu = \frac{B}{\alpha_\mu} \frac{1}{1 - \frac{B}{\beta_\mu}} H_c. \quad (13)$$

В этой формуле $\alpha_\mu, \beta_\mu, H_c$ – постоянные величины, которые определяются по кривой намагничивания для данного материала; H имеет размерность напряженности, β_μ – индукции, а α_μ – магнитной проницаемости. С учетом сказанного, используя закон полного тока для магнитной цепи электромагнита, можем записать дифференциальное уравнение, описывающее процесс спадания магнитного потока при закорачивании обмотки электромагнита:

$$0 = R \left\{ \frac{B}{\mu_0} \frac{1}{\omega} + \frac{l_M}{\omega} \left[\frac{B}{\alpha_\mu \left(1 - \frac{B}{\beta_\mu}\right)} - H_c \right] \right\} + \omega S + \frac{dB}{dt}, \quad (14)$$

где:

l – конечный зазор электромагнита;

l_M – длина средней линии магнитопровода;

ω – число витков обмотки;

S – сечение магнитопровода.

Разделяя переменные, получим:

$$dt = \frac{\beta_\mu - B}{aB^2 - bB + c} dB \quad (15)$$

$$a = \frac{1}{\mu_0} \frac{Rl}{\omega^2 S}, \quad (16)$$

$$b = \frac{Rl}{\omega^2 S} \left(H_c + \frac{\beta_\mu l_M}{\alpha_\mu l} + \frac{l_M \beta_\mu}{l \mu_0} \right), \quad (17)$$

$$c = \beta_{\mu 1} H_c \frac{Rl}{\omega S}. \quad (18)$$

Интегрируя это уравнение в пределах от $t = 0$ и $B = B_{\text{конеч}}$ до $t = t_3$ и $B = B_{\text{тр}}$, получаем выражение для t_3 . Продифференцируем полученное выражение по P , подставляя в него

$$B_{\text{тр}} = B_H \sqrt{\frac{P}{F_H}}, \quad (19)$$

где: B_H – индукция при начальном зазоре и токе, равном I_H .

В результате получим выражение для $\frac{dt_2}{dP}$:

$$\frac{dt_2}{dP} = \frac{\mu_0 \omega^2 S}{2F_H R l} \cdot \frac{1 - k_B x}{\left[\frac{k_{M^2}}{k_B} k_1 - \left(1 + \frac{k_1}{k_{M^1}} + k_1 k_{M^2} \right) x + k_B x^2 \right] x} \quad (20)$$

Здесь:

$$k_B = \frac{B_H}{\beta_\mu}, \quad (21)$$

$$k_{M^2} = \frac{H_c \mu_0}{\beta_\mu}, \quad k_{M^1} = \frac{\alpha_\mu}{\mu_0}, \quad (22)$$

$$k_1 = \frac{l_M}{l}. \quad (23)$$

После начала движения якоря электромагнита при отпуске электромагнитная сила резко падает. Поэтому можно считать, что движение якоря при отпуске определяется только противодействующей силой и приведенной массой перемещающихся деталей. Тогда:

$$t_4 = \sqrt{\frac{2m\delta}{P}}. \quad (24)$$

$$\frac{dt_4}{dP} = -\sqrt{\frac{m\delta}{2F_H^3 x^3}}. \quad (25)$$

Складывая первые части выражений (2), (12), (20) и (25) и приравняв сумму нулю, после преобразования получаем следующее уравнение:

$$\begin{aligned} & \frac{0,5x^2 + 0,5k_t x - k_t}{x^2(1 - 0,5x)} + \frac{1 - k_B x}{k_L \left[k_B x^2 - \left(1 + \frac{k_1}{k_{M^1}} + k_1 k_{M^2} \right) x + k_1 \frac{k_{M^2}}{k_B} \right] x + k_1 \frac{k_{M^2}}{k_B}} - \\ & - \sqrt{\frac{k_t^2}{36(1 - 0,5x)x(1 - 0,5x)}} = 0. \quad (26) \end{aligned}$$

В этом уравнении:

$$k_L = \frac{L_H}{L_K}, \quad (27)$$

$$k_t = \frac{t}{\tau_H}, \quad (28)$$

$$L_K = \frac{\mu_0 \omega^2 S}{l}, \quad (29)$$

$$t_H = \sqrt{\frac{2m\delta}{F_H}}, \quad (30)$$

$$\tau_H = \frac{L_H}{R}. \quad (31)$$

Определив из (26) $x_{\text{опт}}$, можно из (3) найти $P_{\text{опт}}$ — противодействующую силу, при которой время цикла данного электромагнита минимально. Уравнение (26) лучше всего решать графически, поэтому его преобразование к канонической форме не приводится. При решении уравнения (26) следует иметь в виду, что $x_{\text{опт}}$ может находиться в пределах от 0 до 2. Это следует из того, что противодействующая сила не может превышать F_H больше, чем в четыре раза, иначе электромагнит не сработает.

Выводы. Изложены результаты теоретического исследования процессов, протекающих в быстродействующих электромагнитах, приведены математические зависимости для расчета параметров и характеристик, как при статических, так и динамических режимах работы. Разработанные алгоритмы расчета позволяют учесть и рассчитать не только процессы, происходящие непосредственно в самом электромагнитном устройстве, но и учесть их влияние на выходные характеристики.

Полученные результаты могут служить теоретической базой при исследовании и разработке методики проектирования оптимальных быстродействующих электромагнитов.

Список источников литературы

1. Гордон А.В., Сливинская А.Г. Электромагниты постоянного тока. М.—Л.: Госэнергоиздат, 1960. 447 с.

2. Тер-Акопов А.К. Динамика быстродействующих электромагнитов. М.–Л.: Энергия, 1965. 167 с.
3. Савельев И.В., Курс общей физики. Том 2. Электричество и магнетизм. Учебное пособие для вузов. СПб: Лань, 2022. 344 с.
4. Пилипенко В.А. Метод производящего функционала в классической статистической физике // Естественные и математические науки в современном мире. № 11-12(35). 2015. С. 112–116.
5. Болюх В.Ф., Щукин И.С. Исследование тепловых процессов в линейном импульсно-индукционном электромеханическом преобразователе циклического типа // Электротехника и электромеханика. 2017. №5. С. 14–22.
6. Кузнецов М.И. Основы электротехники. М.: Высшая школа, 1970. 368 с.
7. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2 «Электричество и магнетизм. Волны. Оптика»: учебное пособие. СПб.: Лань, 2007. 496 с.
8. Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 319 с.
9. Старостин А.Г. Электромагниты постоянного тока. Lambert Academic Publishing: Germany. 2011. 160 с.

References

1. Gordon A.V., Slivinskaya A.G. *Elektromagnitny postoyannogo toka* [Direct current electromagnets]. М.–Л.: Gosenergoizdat. 1960; 447p. (In Russ.)
2. Ter-Akopov A.K. *Dinamika bystrodeystvuyushchih elektromagnitov* [Dynamics of high-speed electromagnets]. М.–Л.: Energiya. 1965, 167p. (In Russ.)
3. Savelyev I. V. *Kurs obshchej fiziki. Tom 2. Elektrichestvo i magnetizm. Uchebnoe posobie dlya vuzov* [Course of General Physics. Volume 2. Electricity and Magnetism. Textbook for universities]. SPb: Lan'. 2022, 344 p. (In Russ.)
4. Pilipenko V.A. Generating functional method in classical statistical physics. *Estestvennye i matematicheskie nauki v sovremennom mire* [Natural and Mathematical Sciences in the Modern World]. 2015;11-12(35):112–116. (In Russ.)
5. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. Study of thermal processes in a linear pulse-induction electromechanical converter of a cyclic type. *Elektrotehnika i elektromekhanika* [Electrical Engineering and Electromechanics]. 2017;5:14–22. (In Russ.)
6. Kuznetsov M.I. *Osnovy elektrotehniki* [Fundamentals of Electrical Engineering]. Moscow: Vysshaya shkola. 1970; 368 p. (In Russ.)
7. Savelyev I.V. *Kurs obshchej fiziki. T. 2 «Elektrichestvo i magnetizm. Volny. Optika»: uchebnoe posobie* [Course of General Physics. Vol. 2 Electricity and magnetism. Waves. Optics]. 2007;496p. (In Russ.)
8. Irodov I.E. *Elektromagnetizm. Osnovnye zakony* [Electromagnetism. Fundamental Laws]. Moscow: BINOM. Knowledge Laboratory. 2006, 319 p. (In Russ.)
9. Starostin A.G. *Elektromagnitny postoyannogo toka* [Direct current electromagnets]. Lambert Academic Publishing: Germania. 2011. 160 p.

Сведения об авторах

Фиापшев Амур Григорьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры энергообеспечения предприятий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный универ-

ситет имени В.М. Кокова», SPIN-код: 2111-4506, Author ID: 461209, Scopus Author ID: 57216563705, Researcher ID: AAE-4739-2019

Хамоков Марат Мухамедович – кандидат технических наук, доцент кафедры энергообеспечения предприятий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова», SPIN-код: 3572-1415, Author ID: 668303, Scopus Author ID: 57205019878

Кильчукова Олеся Хаутиевна – кандидат технических наук, доцент кафедры энергообеспечения предприятий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова», SPIN-код: 8968-0220, Author ID: 668616, Scopus Author ID: 57205027117

Розуматова Камила Султановна – студент кафедры энергообеспечения предприятий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова».

Information about the authors

Amur G. Fiapshev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Energy Supply of Enterprises, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov», SPIN-code: 2111-4506, Author ID: 461209, Scopus Author ID: 57216563705, Researcher ID: AAE-4739-2019

Marat M. Khamokov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Energy Supply of Enterprises, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov», SPIN-code: 3572-1415, Author ID: 668303, Scopus Author ID: 57205019878

Olesya Kh. Kilchukova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Energy Supply of Enterprises, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov», SPIN-code: 8968-0220, Author ID: 668616, Scopus Author ID: 57205027117

Kamila S. Rozumatova – student of the Department of Energy Supply of Enterprises, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov»

Авторский вклад. Все авторы принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Author's contribution. All authors were directly involved into the planning, execution and analysis of this study. All authors of this article have read and approved the submitted final version.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 16.02.2022; одобрена после рецензирования 03.03.2022; принята к публикации 09.03.2022.

The article was submitted 16.02.2022; approved after reviewing 03.03.2022; accepted for publication 09.03.2022.