ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ. АГРОИНЖЕНЕРИЯ

DOI: 10.32786/2071-9485-2020-04-34

CALCULATION AND MODELING OF THE PARAMETERS OF THE INDUCTOR OF THE ELECTRIC APPARATUS WITH THE UNCOORDINATED MOVABLE PART

N. V. Byshov¹, I. A. Uspensky¹, I. A. Yukhin¹, N. V. Limarenko^{1, 2}

¹Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev (Ryazan, Russia)

²Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russia)

Received 05.09.2020

Submitted 25.11.2020

Summary

A method for calculating the electromagnetic parameters of electrical devices with an uncoordinated moving part is proposed, modeling is carried out, the dependences characterizing the energy parameters of the inductor and working elements are determined.

Abstract

Introduction. The energy efficiency of electrical devices is largely determined by the optimality of the chosen electromagnetic configuration. Electrical devices that implement technological electromechanical action are a category of devices that require the adaptation of calculation methods in each specific case. One of the factors hindering the massive use of electrical devices with an uncoordinated moving part is the lack of formalized methods for calculating electromagnetic parameters and their relationship with mechanical parameters, respectively, the development of such a technique is an urgent task. In general, the device of these technical systems can be represented as a fixed and moving part. The stationary part is an electromagnetic inductor required to create a rotating magnetic flux, the inner bore of which is a working area that acts on the technological material. The fixed part includes a protective paramagnetic pipe sleeve. Moving part – working elements made of ferromagnetic material that directly transform and enhance the direct effect of an electromagnetic field of a wave nature on the technological material. Depending on the properties of the material being processed, the elements are made in the form of balls, rods or a discretely movable working body of a rotary type. Regardless of the version, the working elements, under the action of a rotating variable magnetic flux, reach technical saturation and make a chaotic movement from pole to pole. Accordingly, the moving part has an inconsistent character with respect to the rotating magnetic flux of the inductor. The purpose of the research is to develop a method for calculating the electromagnetic characteristics of an inductor, their modeling, which determines the basic laws of energy and mechanical parameters. **Object.** The object of the study is the inductor of an electrical apparatus, which has an unmatched moving part and an unsteady air gap, the subject is the laws of mechanical and electromagnetic parameters that characterize the energy efficiency of the device. **Materials and methods.** In the course of the study, a method was developed for calculating the electromagnetic parameters of an inductor of an electric apparatus with an uncoordinated moving part, using the method of electrical states, the electromagnetic characteristics of an inductor of an electric apparatus and its uncoordinated moving part were simulated in the *NI Multisim 14.2* environment. The simulation result is a family of characteristics $m = f(I_{ph}, I_c, \cos \varphi, P, Q, S, B)$. Statistical processing of simulation results was carried out in the course of which mathematical models were obtained in the form of quadratic polynomials (30-32). A technique is proposed for approximating the electromagnetic characteristics of the magnetic circuit material, which significantly increases the accuracy of calculations and the possibility of automating this operation and determining the energy characteristics of the inductor. **Results and conclusions.** The energy characteristics of the inductor of an electric apparatus with an uncoordinated moving part were modeled, mathematical models were obtained (30-32), on the basis of which an extrapolation estimate of their influence was made. A mathematical model (34) was obtained that determines the dependence of the electromagnetic and mechanical parameters of the uncoordinated moving part of the inductor of an electric apparatus. The results of modeling their statistical processing and extrapolation can be used to calculate the parameters of technological processes and operations implemented in inductors of electrical devices that have an uncoordinated moving part when implementing complex electromechanical effects, for example, intensifying the disinfection of liquid media. The development of the results obtained is the experimental

assessment of the reliability of the data obtained during modeling and extrapolation on the corresponding experimental bench when solving various technological problems.

Key words: *technological electromechanical action, electrical apparatus, inductor, inductor calculation method, simulation of electromagnetic and energy characteristics.*

Citation. Byshov N.V., Uspensky I.A., Yukhin I.A., Limarenko N.V. Calculation and modeling of the parameters of the inductor of the electric apparatus with the uncoordinated movable part. *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp.* 2020. 4 (60). 350-369 (in Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2020-04-34.

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

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

УДК 621.3.04

РАСЧЁТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИНДУКТОРА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО АППАРАТА С НЕСОГЛАСОВАННОЙ ПОДВИЖНОЙ ЧАСТЬЮ

Н. В. Бышов¹, доктор технических наук, профессор

И. А. Успенский¹, доктор технических наук, профессор

И. А. Юхин¹, доктор технических наук, профессор

Н. В. Лимаренко^{1,2}, кандидат технических наук, доцент

¹ФГБОУ ВО Рязанский агротехнологический университет имени П. А. Костычева, г. Рязань

²ФГБОУ ВО Донской государственный технический университет, г. Ростов на Дону

Дата поступления в редакцию 05.09.2020

Дата принятия к печати 25.11.2020

Актуальность. Энергетическая эффективность электрических аппаратов во многом определяется оптимальностью выбранной электромагнитной конфигурации. Электрические аппараты, реализующие технологическое электромеханическое воздействие, являются категорией устройств, требующих адаптации расчётных методов в каждом конкретном случае. Одним из факторов, сдерживающих массовое применение электрических аппаратов с несогласованной подвижной частью является отсутствие формализованных методов расчёта электромагнитных параметров и их связи с механическими параметрами, соответственно, разработка подобной методики является актуальной задачей. В общем виде устройство данных технических систем можно представить как неподвижную и подвижную часть. Неподвижная часть – электромагнитный индуктор, необходимый для создания вращающегося магнитного потока, внутренняя расточка которого является рабочей зоной, реализующей воздействие на технологический материал. К неподвижной части относится защитная парамагнитная втулка трубы. Подвижная часть – рабочие элементы, выполненные из ферромагнитного материала, осуществляющие непосредственное преобразование и усиление прямого воздействия электромагнитного поля волновой природы на технологический материал. В зависимости от свойств обрабатываемого материала элементы выполняют в виде шаров, стержней или дискретно-подвижного рабочего органа роторного типа. Вне зависимости от исполнения, рабочие элементы под действием вращающегося переменного магнитного потока достигают технического насыщения и совершают хаотичное движение от полюса к полюсу. Соответственно подвижная часть носит несогласованный характер относительно вращающегося магнитного потока индуктора. Цель исследования – разработка методики расчёта электромагнитных характеристик индуктора, их моделирование, определяющее основные закономерности энергетических и механических параметров. **Объект.** Объектом исследования является индуктор электрического аппарата, имеющий несогласованную подвижную часть и нестационарный воздушный зазор, предметом – закономерности механических и электромагнитных параметров, характеризующие энергетическую эффективность устройства. **Материалы и методы.** В ходе проведённого исследования разработана методика расчёта электромагнитных параметров индуктора электрического аппарата с несогласованной подвижной частью с применением метода электрических состояний произведено моделирование электромаг-

нитных характеристик индуктора электрического аппарата и его несогласованной подвижной части в среде NI Multisim 14.2. Результатом моделирования явилось семейство характеристик $m = f(I_\phi, I_c, \cos \varphi, P, Q, S, B)$. Произведена статистическая обработка результатов моделирования, в ходе которой получены математические модели в виде квадратичных полиномов (30-32). Предложена методика аппроксимации электромагнитных характеристик материала магнитопровода, существенно повышающая точность расчётов и возможность автоматизации данной операции и определения энергетических характеристик индуктора. **Результаты и выводы.** Смоделированы энергетические характеристики индуктора электрического аппарата с несогласованной подвижной частью, получены математические модели (30-32), на основании которых произведена экстраполяционная оценка их влияния. Получена математическая модель (34), определяющая зависимость электромагнитных и механических параметров несогласованной подвижной части индуктора электрического аппарата. Результаты моделирования их статистической обработки и экстраполяции могут быть использованы при расчёте параметров технологических процессов и операций, реализуемых в индукторах электрических аппаратов, имеющих несогласованную подвижную часть при реализации комплексных электромеханических воздействий, например, интенсификация обеззараживания жидких сред. Развитиём полученных результатов является экспериментальная оценка достоверности данных, полученных при моделировании и экстраполяции на соответствующем экспериментальном стенде при решении различных технологических задач.

Ключевые слова: технологическое электромеханическое воздействие, электрические аппараты, индуктор электрического аппарата, методика расчёта индуктора, моделирование электромагнитных характеристик.

Цитирование. Бышов Н. В., Успенский И. А., Юхин И. А., Лимаренко Н. В. Расчёт и моделирование параметров индуктора электрического аппарата с несогласованной подвижной частью. *Известия НВ АУК*. 2020. 4(60). 350-369. DOI: 10.32786/2071-9485-2020-04-34.

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

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение. Эффективное функционирование электрических аппаратов определяется оптимальностью выбранной конфигурации электромагнитных параметров. Особенно актуальным данный вопрос является для аппаратов, реализующих технологическое воздействие электромагнитного поля на различные среды. Условно технологические электрические аппараты в зависимости от способа воздействия электромагнитного поля на среду можно разделить на прямые и косвенные. К прямым относят непосредственные воздействия электромагнитными колебаниями волновой природы, к косвенным – комплексные физические воздействия, включающие первый тип и дополненные техническими средствами, позволяющими усилить эффекты прямых волновых воздействий за счёт образования новых эффектов. Второй тип технологических электрических аппаратов относится к наиболее динамично развивающимся техническим средствам, для которых традиционные методики определения оптимальных электромагнитных параметров являются применимыми в недостаточной степени, поскольку существенное влияние на них оказывают физико-химические свойства сред, для работы с которыми они предназначены. Наиболее перспективным и широко применяемым примером данного типа устройств являются аппараты с несогласованной подвижной частью, к которым в разные периоды времени применялись термины: аппараты вихревого слоя, технологические индукторы, установки активации процессов, электромагнитные активаторы, вихрекамерные аппараты, аппараты с вращающимся электромагнитным полем и т. д. [5, 6, 17, 18]. Широкий спектр применимых терминов можно объяснить попытками использовать данные системы в различных областях, но наиболее существенны успехи, которые были достигнуты в химии, водоподготовке и сельском хозяйстве, при ин-

тенсификации тепло-массообменных процессов [15, 16, 19, 21]. Сдерживающим фактором массового применения электрических аппаратов данного типа является отсутствие отработанных конструктивно-режимных параметров и методик расчёта электромагнитных параметров, адаптированных под области применения. Как показал анализ информационных источников и результаты предварительных исследований [4, 9, 14, 15, 18, 20], наибольший интерес представляет использование подобных систем при интенсификации тепло-массообменных процессов обеззараживания жидких сред в сельском хозяйстве, в частности, бесподстилочного навоза. Поскольку утилизация патогенных энергоносителей со сложными фазовыми портретами, к которым относится бесподстилочный навоз, является длительным, энергоёмким и опасным с санитарно-эпидемиологической точки зрения процессом, то разработка энергоэффективных технических средств, минимизирующих их негативное антропогенное влияние является важным для науки и техники. Вне зависимости от области применения, с физической точки зрения данные аппараты представляют активатор процессов, состоящий из неподвижной и подвижной частей. Неподвижная часть представляет собой электромагнитный индуктор, создающий переменный вращающийся магнитный поток, обмотки фаз которого питаются от трёхфазной цепи переменного синусоидального тока промышленной частоты и соединены в треугольник, а внутренняя расточка является рабочей зоной, в которой происходит воздействие на технологический материал. К неподвижной части также относится втулка трубы из парамагнитного материала, защищающая индуктор от внешних воздействий. Подвижная часть представляет собой рабочие элементы, выполненные из ферромагнитного материала, осуществляющие непосредственное преобразование и усиление прямого воздействия электромагнитного поля волновой природы на технологический материал. В зависимости от свойств обрабатываемого материала элементы могут быть выполнены в виде шаров, стержней или дискретно-подвижного рабочего органа. Вне зависимости от исполнения, рабочие элементы под действием вращающегося переменного магнитного потока достигают технического насыщения и совершают хаотичное движение от полюса к полюсу в соответствии с используемым чередованием фаз. Рассмотрим случай прямого чередования фаз, который в комплексно-векторной форме представляется следующими соотношениями:

$$\sum \vec{E}_i = \vec{E}_A + \vec{E}_B + \vec{E}_C = 0;$$

где E_A, E_B, E_C – э.д.с. фазных обмоток индуктора, В:

$$\begin{aligned}\vec{E}_A &= \dot{E}e^{j0^\circ}; \\ \vec{E}_B &= \dot{E}e^{-120^\circ j}; \\ \vec{E}_C &= \dot{E}e^{120^\circ j}.\end{aligned}$$

Ниже на рисунке 1 представлено графическое изображение перемещения, вращающегося переменного магнитного потока в рабочей зоне индуктора при прямом чередовании фаз. Установлено [9], что условием энергетически эффективного функционирования подобной системы является обеспечение соответствующего уровня магнитной индукции в воздушном зазоре, которая в свою очередь зависит от массы рабочих элементов, уровня заполненности ими объёма расточки индуктора и их геометрии, при этом величина скольжения, характеризующая разность частот вращения вращающегося переменного магнитного потока индуктора и частоты вращения рабочих элементов, также будет зависеть от этих параметров. Как показал анализ, выполненный в [14], традиционные подходы к проектированию и расчёту асинхронных электродвигателей являются мало применимыми, поскольку не позволяют учесть переменную составляющую воздушного зазора и её зависимость от механических параметров. Соответственно, задача разработки методики расчё-

та параметров электрического индуктора аппарата с несогласованной подвижной частью и нестационарным воздушным зазором является актуальной.

Рисунок 1 – Схема распределения и переключения магнитных потоков между полюсами индуктора в его рабочей зоне

Figure 1 – Scheme of distribution and switching of magnetic fluxes between the poles of the inductor in its working area

Целью настоящего исследования является разработка методики расчёта электромагнитных характеристик индуктора, их моделирование, определяющее основные закономерности энергетических и механических параметров.

Материалы и методы. Объектом исследования является индуктор электрического аппарата, который имеет несогласованную подвижную часть и нестационарный воздушный зазор, предметом – закономерности механических и электромагнитных параметров, характеризующие энергетическую эффективность устройства. Поскольку определение энергетической эффективности невозможно без знания удельной энергоёмкости операционного воздействия, необходимо рассмотреть параметры, составляющие её. В общем виде суть оценки удельной энергоёмкости заключается в измерении амплитудных значений силы тока, напряжения и угла сдвига фаз в единицу времени на единицу объёма, что можно представить аналитически в виде формулы:

$$N_{yz} = \frac{\left(U_m I_m \sin^2 \left(\omega t + \frac{\frac{1}{T} \int_0^T p dt}{\sqrt{\left(\frac{1}{T} \int_0^T p dt \right)^2 + \left(\int_0^T q dt \right)^2}} \right) \right) \cdot t}{\frac{\pi \cdot D_{pz}^2 \cdot l_{pz}}{4}}, \quad (1)$$

где U_m – амплитудное значение напряжения питающей сети, В; I_m – амплитудное значение силы тока питающей сети, В; ω – угловая частота колебаний электрического тока питающей сети, Гц; T – время одного полного цикла колебания, сек; p – мгновенная активная мощность, передаваемая полюсам индуктора, Вт; q – мгновенная реактивная мощность, циркулирующая в контуре, ВАр; φ – угол сдвига фаз амплитудных значений напряжения и силы тока питающей сети, °; t – продолжительность операционного воздействия, сек; D_{pz} – диаметр рабочей зоны индуктора, мм; l_{pz} – длина рабочей зоны цилиндра, реализующего системное физико-химическое воздействие, мм.

На основании анализа источников, результатов экспериментальных исследований [9, 7, 8, 10, 11, 22] сформулированы следующие исходные данные, необходимые для расчёта электромагнитных параметров индуктора:

- магнитная индукция в рабочей зоне B , мТл;
- производительность Q , м³/час;
- число пар полюсов p .

Поскольку устройство реализует операционное воздействие на электромеханические и электромагнитные параметры, то энергетическая эффективность функционирования в каждом конкретном случае будет характеризовать совокупность качественных параметров, определяющих свойства технологического материала на выходе, и его соответствие нормативным документам.

Длина рабочей зоны $l_{p.з.}$ выбирается с учётом производительности и продолжительности операционного воздействия в рабочей зоне. Задавшись длиной, определим скорость движения технологического материала в рабочей зоне, м/с:

$$V_{p.з.} = \frac{l_{p.з.}}{t}, \quad (2)$$

где $l_{p.з.}$ – длина рабочей зоны, м.

Затем определим площадь поперечного сечения рабочей зоны, м²:

$$S_{p.з.} = \frac{V_{p.з.}}{Q}. \quad (3)$$

Исходя из выражений (1-3), диаметр поперечного сечения рабочей зоны, м:

$$D_{\phi}^p = \sqrt{\frac{4S_{p.з.}}{\pi}}. \quad (4)$$

Для осуществления технологического операционного воздействия в рабочей зоне и защиты обмоток и магнитопровода от внешних воздействий агрессивных сред используется труба, устанавливаемая в расточку индуктора. Помимо защитной функции, материал трубы должен обеспечивать максимальную проводимость вращающегося переменного магнитного потока, т.е. быть парамагнетиком. На основании этого можно сформулировать следующие требования к материалу трубы: парамагнитный; нагревостойкий; износостойкий; коррозионная устойчивость (стойкость к коррозии в агрессивных средах, хромоникелевые аустенитные стали ГОСТ 5632-72). На основании анализа [1-3, 13] установлено, что наиболее рационально использовать аустенитные нержавеющие стали, аустенито-ферритные и аустенито-мартенситные стали. Конструктивные параметры парамагнитной защитной втулки определяются следующим образом: полученное расчётное значение D_{ϕ}^p округляется до ближайшего большего в соответствии с ГОСТ 5632-72 (хромоникелевые аустенитные стали), ГОСТ 9940-81, ГОСТ 9941-81 (трубы бесшовные, холодно- и тепло- деформируемые, из коррозионностойкой стали), таким образом определяется внутренний диаметр рабочей зоны D_{ϕ} .

Определив конструктивные параметры рабочей зоны индуктора электрического аппарата, перейдём к определению электромагнитных параметров. Поскольку форма питающего напряжения индуктора является синусоидальной и соответствует промышленной частоте, то примем допущение, что основной магнитный поток волны Φ_I будет равным действительному потоку Φ , Вб:

$$\Phi \approx \Phi_1 = \frac{2}{\pi} \tau \cdot l_i \cdot B_{\delta 1} \quad (5)$$

где τ – полюсное деление; l_i – расчётная длина рабочей зоны, м; $B_{\delta 1}$ – амплитудное значение магнитной индукции, Тл.

Зная величины магнитного потока, определим магнитную индукцию в его элементах. На рисунке 2 представлено изображение магнитопровода индуктора электрического аппарата.

Рисунок 2 – Магнитопровод индуктора электрического аппарата:
а) Схема; б) Магнитная индукция элементов магнитопровода

Figure 2 – Magnetic core of an inductor of an electrical apparatus:
a) Scheme; b) Magnetic induction of magnetic circuit elements

Магнитная индукция в зубцах магнитопровода индуктора будет равна, Тл:

$$B_{zi} = \frac{\Phi}{S_z}, \quad (6)$$

где Φ – магнитный поток, Вб; S_z – площадь сечения магнитопровода, м².

Магнитная индукция в ярме магнитопровода индуктора будет равна, Тл:

$$B_{j2} = \frac{\Phi_{\sigma}}{2S_{j2}}, \quad (7)$$

где Φ_{σ} – магнитный поток в ярме, Вб; S_{j2} – площадь сечения ярма, м.

Определим площадь сечения магнитопровода S_z , м²:

$$S_z = \frac{U_2 \cdot 10^4}{4,44 \cdot f \cdot \omega \cdot B_m}, \quad (8)$$

где U_2 – выходное напряжение холостого хода, ($U_2 \approx U_1$ напряжение питающей сети, В); f – частота колебаний электрического тока питающей сети, Гц; ω – количество витков обмотки (при расчёте трансформатора, здесь ставится коэффициент трансформации, т.е. отношение числа витков первичной обмотки ко вторичной); B_m – индукция магнитного поля в магнитопроводе полюсов индуктора, Тл (для трансформаторной стали индукция может быть принята $B_m=1,5-2,18$ Тл, рекомендуется принимать значение ближе к нижнему порогу диапазона).

Общая площадь сечения стационарного ферромагнитного участка магнитопровода индуктора S_o с учётом дискретно распределённых воздушных зазоров между пла-

стинами электротехнической стали будет равна, м²:

$$S_o = \frac{S}{k_c}, \quad (9)$$

где k_c – коэффициент заполнения стали ($k_c=0,95\dots0,97$).

Магнитная индукция в магнитопроводе полюсов индуктора будет равна, Тл:

$$B_m = \frac{\Phi + \Phi_{s2}}{S_m} = \frac{\Phi(1 + \frac{\Phi_{s2}}{\Phi})}{S_m} = \frac{\Phi_\sigma}{S_m}, \quad (10)$$

где Φ_σ – магнитный поток в магнитопроводе полюса, Вб; S_m – площадь сечения магнитопровода полюса, м².

Зная величины магнитных потоков, определим напряжённость магнитного поля H , в рабочей зоне индуктора. Напряжённость магнитного поля определяется в соответствии с полученными значениями магнитной индукции для каждого участка магнитопровода, по кривым намагниченности, соответствующим выбранному материалу, А/м:

$$B = f(H). \quad (11)$$

Определим магнитодвижущую силу F , А (м. д. с.):

$$F = \sum_k H_k l_k, \quad (12)$$

где k – номер участка магнитопровода.

Определив электромагнитные параметры индуктора, определим конструктивные параметры рабочей зоны, необходимые для обеспечения выполнения операционного воздействия с требуемыми производительностью и качественными показателями. Полученное расчётное значение D_e^p по зависимости (4) округляется до ближайшего большего в соответствии с ГОСТ 5632-72 (хромоникелевые аустенитные стали), ГОСТ 9940-81 или ГОСТ 9941-81 (трубы бесшовные холодно- и тепло- деформируемые из коррозионнотойкой стали), таким образом определяется внутренний диаметр рабочей зоны D_e . На рисунке 3 представлено схематическое изображение продольного вида индуктора электрического аппарата без подвижной части.

Рисунок 3 – Схема продольного вида индуктора электрического аппарата

Figure 3 – Longitudinal view of the inductor of an electrical apparatus

Рассчитав параметры рабочей зоны, необходимые для обеспечения заданной производительности, определим конструктивные параметры магнитопровода, способного обеспечить заданный уровень магнитной индукции. Согласно результатам исследований [12], наиболее рациональным вариантом материала магнитопровода является электротехническая сталь 2013. Для автоматизации, повышения точности и оценки соответствия электромагнитных свойств материала при его выборе используем метод аппроксимирующих функций. Данным методом опишем зависимость электромагнитной индукции от напряженности магнитного потока $B = f(H_{МП})$, в результате чего получим математическую модель вида, позволяющую определить любое значение B внутри исследуемой области с коэффициентом корреляции $r = 0,9105$:

$$B = 0,195 \ln(H_{МП}) - 0,003, \text{ Тл.} \quad (13)$$

Далее определим напряжённость магнитного поля в рабочей зоне, А/м:

$$H_{pz} = \frac{B}{\mu_0}. \quad (14)$$

При этом максимальный магнитный поток полюса $\Phi_{П}$ будет равен, Вб:

$$\Phi_{П} = B \cdot S_z. \quad (15)$$

Полюсное деление τ , м:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_{pz}}{2 \cdot p'}. \quad (16)$$

Для определения коэффициента полюсного перекрытия λ необходимо принять число пар полюсов p' :

$$\lambda = \frac{l_{расч}}{\tau}. \quad (17)$$

Расчётная длина магнитопровода индуктора электрического аппарата при этом будет равняться, м:

$$l_{расч} = \frac{\pi \cdot D_{pz}}{2 \cdot p'} \cdot \lambda. \quad (18)$$

Активное сопротивление магнитопровода электрическому току R_{pz} , Ом:

$$R_{pz} = \rho_{пров} \cdot \frac{l_{расч}}{S_{p.з.}}, \quad (19)$$

где $\rho_{пров}$ – удельное сопротивление проводника (материала обмотки), Ом.

Фазное значение тока полюсов индуктора электрического аппарата:

$$I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\phi}} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{R^2 + X^2}}, \quad (20)$$

где X – реактивная составляющая полного сопротивления полюсов индуктора электрического аппарата, обусловленная скольжением подвижной части и её геометрией, Ом.

Амплитудное значение силы фазного тока, А:

$$I_m = I_\phi \sqrt{3}. \quad (21)$$

Число витков фазной обмотки, шт.:

$$\omega_{\phi o}^{\text{витков}} = \frac{H_{p3}}{I_m}. \quad (22)$$

Площадь сечения ярма магнитопровода индуктора, м²:

$$S_{mn} = \frac{\Phi_{\Pi}}{2 \cdot B_{cp}}, \quad (23)$$

где B_{cp} – среднее значение электромагнитной индукции в ярме магнитопровода, Тл.

Зная число полюсов, зададим количество пазов магнитопровода индуктора z , шагом обмотки y (обычно принимается равным τ), обмоточным коэффициентом $K_{об}$.

Ширина паза магнитопровода индуктора определяется, м:

$$b = \frac{\pi \cdot D_{p3}}{3 \cdot z}. \quad (24)$$

Высота зубцов паза магнитопровода индуктора определяется как $h=2b$, толщина спинки магнитопровода – $b/2$. Обмоточный коэффициент определяется исходя из соотношения:

$$K_{об} = \sin \left(\frac{y}{\tau} 90 \right)^{\frac{\sin \frac{\alpha q}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}}}, \quad (25)$$

где q – число пазов в магнитопроводе на полюс и фазу, шт.:

$$q = \frac{z}{2p'm}, \quad (26)$$

где m – число фаз, шт.; α_{30} – электрический угол приходящийся на одно зубцовое деление;

$$\alpha = \frac{360 p'}{z}. \quad (27)$$

При этом число эффективных проводников в пазах магнитопровода, шт.:

$$n_{эф} = \frac{2 \cdot m \cdot \omega_{\phi o}^{\text{витков}} \cdot a_n}{z}, \quad (28)$$

где a_n – число параллельных ветвей (задаётся исходя из технологических соображений).

Эффективное сечение проводника, м²:

$$S_{\text{эф}} = \frac{k_3 \cdot S_{\text{мп}}}{n_n}, \quad (29)$$

где k_3 – коэффициент заполнения паза магнитопровода медью; n_n – число эффективных проводников в пазах, шт.

Определив зависимости основных электромагнитных параметров индуктора электрического аппарата, перейдём к их моделированию, используя метод электрических состояний с целью определения энергетических характеристик устройства, и влияния на них механических параметров рабочих элементов.

Составим схему замещения индуктора электрического аппарата. Известно [2, 9, 10], что индуктор статора электрического аппарата с несогласованной подвижной частью соответствует статору асинхронных электрических машин при условии функционирования с промышленной частотой колебаний электрического тока $f = 50$ Гц и без учёта подвижной электромеханической части, соответственно для описания электромагнитных процессов в фазных полюсах приемлемо использовать приведённую схему замещения однофазного трансформатора. Адаптируем приведённую схему замещения однофазного трансформатора с учётом специфики исследуемого устройства и представим её на рисунке 4.

Рисунок 4 – Схема замещения индуктора электрического аппарата

Figure 4 – Equivalent circuit of the inductor of an electrical apparatus

Рассмотрим свойства, представленные на рисунке 4, и их соответствие реальным элементам устройства. Резистивное сопротивление R_1 и индуктивный элемент X_1 характеризуют фазную обмотку полюса индуктора статора, резистивное сопротивление R_0 и индуктивный элемент X_0 характеризуют потери энергии, связанные с нагревом обмоток и их гистерезисом, резистивное сопротивление R_2' и индуктивный элемент X_2' характеризуют постоянную электромагнитную составляющую электромагнитных параметров подвижной части электрического аппарата, переменный резистивный элемент $R_{нч}$ характеризует сопротивление воздушного зазора. E_1 представляет собой э.д.с. фазных обмоток полюсов индуктора, а E_2 – э.д.с. несогласованной подвижной части.

Рассмотрим более подробно подвижную часть электрического аппарата, имеющую несогласованность положений магнитных потоков, которая будет определяться геометрическими параметрами рабочих элементов, их массой, коэрцитивными свойствами материала, магнитной проницаемостью, обрабатываемой ими среды и других факторов [1, 7, 12]. Для описания электромагнитных характеристик воздушного зазора индуктора электрического аппарата с несогласованной подвижной частью преобразуем схему замещения, представленную на рисунке 4 методом обратных эквивалентных преобразований, т.е. методом развёртки. Рассмотрим ветвь цепи, свойства которой характеризуют переменную природу сопротивления воздушного зазора $R_{нч}$. Преобразуем схему замещения с учётом факторов, оказывающих влияние на величину сопротивления воздушного зазора. На основании результатов исследований [7, 9] в качестве наиболее существенных факторов примем массу рабочих элементов R_n^I , уровень за-

полноты рабочей зоны R_n^2 , характеризующий их геометрию, и магнитную проницаемость обрабатываемой среды R_n^3 . Примем допущение, что реактивные составляющие элементов подвижной части не оказывают существенного влияния на энергетическую эффективность аппарата и представим данные факторы в виде последовательно соединённых переменных активных сопротивлений, обладающих резистивными свойствами. Преобразованная схема замещения представлена на рисунке 5.

Рисунок 5 – Схема замещения индуктора электрического аппарата с учётом несогласованности подвижной части

Figure 5 – Equivalent circuit of the inductor of an electrical apparatus taking into account the inconsistency of the moving part

Зная общую методику определения электромагнитных параметров индуктора электрического аппарата и факторы, оказывающие влияние на величину воздушного зазора, осуществим моделирование электромагнитных и энергетических характеристик исследуемого устройства в программном комплексе *NI Multisim 14.2*. На рисунке 6 представлен один из этапов моделирования схемы замещения (рисунок 5) индуктора электрического аппарата с учётом несогласованности подвижной части. В качестве условий моделирования примем число пар полюсов индуктора $p' = 1$, промышленную циклическую частоту колебаний тока питающей сети $f = 50$ Гц, ферромагнитный материал рабочих элементов с высокой коэрцитивной силой, стержневую геометрию, магнитную проницаемость обрабатываемой среды, соответствующую жидкости.

Рисунок 6 – Моделирование электромагнитных и энергетических характеристик индуктора электрического аппарата с учётом несогласованности подвижной части в среде *NI Multisim 14.2*

Figure 6 – Simulation of the electromagnetic and energy characteristics of the inductor of an electric apparatus, taking into account the inconsistency of the moving part in the environment *NI Multisim 14.2*

Результаты и обсуждение. Результаты проведённого моделирования электромагнитных и энергетических характеристик индуктора электрического аппарата с несогласованной подвижной частью в заданных условиях в программном комплексе *NI Multisim 14.2* представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчёта электромагнитных параметров индуктора электрического аппарата с несогласованной подвижной частью

Table 1 – The results of calculating the electromagnetic parameters of the inductor of an electric apparatus with an uncoordinated moving part

№	Масса стержней <i>m</i> , г / Weight rods <i>m</i> , gr	Сила тока, А / Current strength, A		Сдвиг фаз между <i>I</i> и <i>U</i> cos φ / Phase shift between <i>I</i> and <i>U</i> cos φ	Активная мощность <i>P</i> , кВт / Active power <i>P</i> , kW	Реактивная мощность <i>Q</i> , кВАр / Reactive power <i>Q</i> , kVAr	Полная мощность <i>S</i> , кВА / Full power <i>S</i> , kVA	Магнитная индукция <i>B</i> , мТл / Magnetic induction <i>B</i> , mT
		фазовая / phase	суммарная / total					
		<i>I</i> φ	<i>I</i> c					
1	0	72,9	218,7	0,262	4,79	17,41	18,04	59,4
2	200	68,2	204,6	0,268	4,62	16,53	17,15	57,7
3	400	64,8	194,4	0,273	4,41	15,77	16,38	52,5
4	600	61,5	184,5	0,274	4,31	14,94	15,44	49,5
5	800	59,3	177,9	0,27	4,06	14,46	14,98	42,4
6	1 000	55,7	167,1	0,267	3,5	13,25	13,75	37,6
7	1 200	52,7	158,1	0,258	3,31	12,61	13,06	35,1
8	1 400	50,5	151,5	0,254	3,18	12,1	12,5	28,2

После статистической обработки результатов моделирования электромагнитных и энергетических характеристик индуктора электрического аппарата с несогласованной подвижной частью, представленных в таблице 1, с целью возможности их экстраполяции были получены математические модели, позволяющие оценить влияние параметров, оказывающих наиболее существенное влияние на эффективность функционирования:

– влияние полной мощности и массы рабочих элементов на суммарно потребляемую силу тока индуктором электрического аппарата с несогласованной подвижной частью:

$$I_c = 280,780 - 3,785 \cdot S - 0,202 \cdot m + 0,014 \cdot S^2 + 3,6858 e^{-5} m^2 + 0,007 \cdot S \cdot m ; \quad (30)$$

– влияние массы рабочих элементов и величины магнитной индукции на суммарно потребляемую силу тока индуктором электрического аппарата с несогласованной подвижной частью:

$$I_c = 266,099 - 0,119 \cdot m + 0,227 \cdot B + 2,2133 e^{-5} \cdot m^2 - 0,017 \cdot B^2 + 0,0004 \cdot m \cdot B ; \quad (31)$$

– влияние суммарно потребляемой индуктором электрического аппарата с несогласованной подвижной частью силы тока и реактивной мощности на массу рабочих элементов:

$$m = 7393,3654 - 44,8577 \cdot I_C - 95,8244 \cdot S + 0,0361 \cdot I_C^2 + 0,0318 \cdot S^2 + 0,6131 \cdot I_C \cdot S. \quad (32)$$

Полученные в ходе статистической обработки результатов моделирования (таблица 1), математические модели (30-32) расчётным путём позволяют определить значения числа зависимых переменных от независимых в заданной области моделирования, а также осуществить экстраполяцию результатов. На основании результатов моделирования электромагнитных и энергетических характеристик индуктора электрического аппарата в среде *NI Multisim 14.2* (таблица 1), математических моделей (30-32) построены графические зависимости, представленные на рисунках 7-9.

Рисунок 7 – Зависимость суммарной фазной силы тока от массы рабочих элементов и полной мощности индуктора

Figure 7 – Dependence of the total phase current from the mass of the working elements and the total power of the inductor

Рисунок 8 – Зависимость суммарной фазной силы тока от массы рабочих элементов и магнитной индукции индуктора

Figure 8 – Dependence of the total phase current from the mass of the working elements and the magnetic induction of the inductor

Рисунок 9 – Зависимость массы рабочих элементов от суммарной фазной силы тока и реактивной мощности индуктора

Figure 9 – Dependence of the mass of working elements from the total phase current and reactive power of the inductor

Анализ результатов моделирования электромагнитных и энергетических характеристик индуктора электрического аппарата с несогласованной подвижной частью

(таблица 1), результатов их статистической обработки (30-32) и графической их интерпретацией (рисунки 7-9) позволяет сделать следующие выводы:

– математические модели (30-31) представляют собой квадратичные полиномы в натуральных переменных и адекватно по критерию Фишера позволяют оценить закономерность влияния массы рабочих элементов, полной мощности потребляемой электромагнитной системой в зависимости от суммарной фазной силы тока при уровне значимости $\alpha = 0,05$, интерпретации описанных закономерностей, размещённых на рисунках 7, 8, которые являются графической экстраполяцией полученных результатов;

– математическая модель (32) представляет собой квадратичный полином в натуральных переменных и адекватно по критерию Фишера позволяет оценить закономерность влияния суммарной фазной силы тока и реактивной мощности индуктора в зависимости от массы рабочих элементов, при уровне значимости $\alpha = 0,05$, интерпретация описанной закономерности представлена на рисунке 9 и представляет собой некую экстраполяцию.

Полученная модель (32) представляет собой исходные данные для определения силы тока несогласованной подвижной части электрического аппарата, в общем виде которую можно представить как:

$$I_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{R_{nc}}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2}}, \quad (33)$$

где U_1 – напряжение питания полюсов индуктора неподвижной части электрического аппарата, В; R_1 – резистивное сопротивление, характеризующее фазную обмотку полюса индуктора статора, Ом; R_2 – резистивное сопротивление, характеризующее фазную постоянную составляющую резистивных свойств подвижной части, Ом; R_{nc} – резистивное сопротивление воздушного зазора, представляющее собой связь электромагнитных и механических параметров рабочих элементов $R_{nc} = f(m)$, Ом. X_1 – индуктивность, характеризующая фазную обмотку полюса индуктора статора, Гн; X_2 – индуктивность, характеризующая подвижную несогласованную часть, Гн.

После подстановки уравнения (32), модель (33) примет вид:

$$I_2 = I_{\text{несогл. части}} = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{(7393,3654 - 44,8577 \cdot I_c - 95,8244 \cdot S + 0,0361 \cdot I_c^2 + 0,0318 \cdot S^2 + 0,6131 \cdot I_c \cdot S) \cdot \rho \cdot \mu_{oc}}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2}}, \quad (34)$$

где ρ – параметр заполненности рабочей зоны, зависящий от геометрии элементов, %; μ_{oc} – скаляр или тензор магнитной проницаемости обрабатываемой среды в зависимости от её природы, Гн/м.

– в результате моделирования установлены следующие связи: суммарная фазная сила тока I_c , потребляемая полюсами индуктора, существенным образом зависит от массы рабочих элементов m , полной мощности и величины магнитной индукции B . Максимальные значения I_c в полюсах индуктора наблюдаются при отсутствии рабочих элементов, затем при их $m = 600$ г наблюдается спад I_c по квадратичной зависимости, в диапазоне от $m = 600$ г до $m = 800$ г наблюдается рост I_c по квадратичной зависимости, затем после $m = 800$ г рост I_c принимает более линейный характер. Величина B также

зависит от I_c квадратично, максимальные значения I_c находятся при значении $B = 20-40$ мТл, затем при увеличении B от 40 до 60 мТл происходит уменьшение I_c , диапазон значений B от 60 до 110 мТл получен путём экстраполяции найденной зависимости и также демонстрирует незначительные снижения I_c при увеличении B ;

– установлено, что реактивные мощности S и I_c существенным образом оказывают влияние на m , максимальные значения S и I_c наблюдаются при $m = 2500$ г, зависимость S от m носит квадратичный параболический характер, зависимость I_c от m носит нелинейный характер, зависимости влияний S и I_c при $m > 1400$ г получены путём экстраполяции результатов моделирования электромагнитных и энергетических характеристик индуктора электрического аппарата в среде *NI Multisim 14.2*.

Выводы. 1. Разработана методика расчёта электромагнитных параметров индуктора электрического аппарата с несогласованной подвижной частью, определены наиболее существенные конструктивные и электромагнитные параметры, оказывающие влияние на энергетическую эффективность функционирования устройства. 2. Произведено моделирование электромагнитных характеристик индуктора электрического аппарата и его несогласованной подвижной части в среде *NI Multisim 14.2*, получено семейство характеристик $m = f(I_\phi, I_c, \cos \varphi, P, Q, S, B)$. 3. Произведена статистическая обработка результатов моделирования электромагнитных характеристик индуктора электрического аппарата, получены математические модели в виде квадратичных полиномов (30-32), на основании которых произведена экстраполяционная оценка их влияния. 4. Получена математическая модель (34), определяющая зависимость электромагнитных и механических параметров несогласованной подвижной части индуктора электрического аппарата. 5. Полученные результаты могут быть использованы при расчёте параметров технологических процессов и индукторов электрических аппаратов, имеющих несогласованную подвижную часть и реализующих комплексные электромеханические воздействия технологического типа, например, интенсификация обеззараживания жидких сред, а также при определённой доработке, для других технологических процессов, использующих принципы вращающегося переменного электромагнитного поля с перемещающимися рабочими телами в нём.

Развитием полученных результатов является экспериментальная оценка достоверности данных, полученных при моделировании и экстраполяции на соответствующем экспериментальном стенде при решении различных технологических задач.

Библиографический список

1. Адошев А. И. Исследование электромагнитных характеристик ферровихревого аппарата // Сельский механизатор. 2019. № 4. С. 28-29.
2. Бахвалов Ю. А., Володин Г. И., Горчаков В. В. Синтез электромеханических активаторов с вихревым слоем с применением обратных задач // Математические методы в технике и технологиях. ММТТ. Саратов, 2014. Т. 7. С. 25-27.
3. Вершинин И. Н., Вершинин Н. П. Аппараты с вращающимся электромагнитным полем. Сальск: ООО «Передовые технологии XXI века», 2007. 368 с.
4. Григорьев В. С., Ковалев А. А. Система предварительной подготовки субстратов ментаненов в аппарате вихревого слоя с рекуперацией теплоты // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2020. Т. 67. № 2 (39). С. 8-13.
5. Данилина Э. М., Володин Г. И., Бреславец В. П. Потери энергии на вихревые токи в электромагнитных аппаратах вихревого слоя и способы их снижения // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2014. № 1. С. 43-47.
6. Использование аппаратов вихревого слоя для получения водомазутных эмульсий / М. А. Карт, Б. М. Карт, В. А. Войтович, Е. А. Захарычев, Р. Р. Шварев // Химическая техника. 2018. № 1. С. 37-39.
7. Исследование влияния параметров рабочих тел индуктора на коэффициент мощности / И. А. Успенский, И. А. Юхин, Г. А. Борисов, Н. В. Лимаренко // Известия нижеволжского аг-

роуниверситетского комплекса. 2019. № 3 (55). С. 360-369.

8. Исследование параметров магнитного поля в рабочей камере индуктора / Н. В. Лимаренко, В. П. Жаров, Ю. В. Панов, Б. Г. Шаповал // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. 2016. № 1. С. 136-142.

9. Лимаренко Н. В. Экспериментальное исследование влияния массы рабочих тел на параметры, характеризующие качество функционирования индуктора // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. 2016. Т. 16. № 2. С. 90-96.

10. Лимаренко Н. В., Жаров В. П. Влияние температуры на параметры работы индуктора, используемого при обеззараживании материалов // Известия ВУЗов. Пищевая технология. 2016. № 1. С. 88-91.

11. Лимаренко Н. В. Создание математической модели технологического процесса обеззараживания стоков животноводства // Известия ВУЗов. Пищевая технология. 2017. № 3. С. 108-112.

12. Лимаренко Н. В., Жаров В. П., Шаповал Б. Г. Математическое моделирование магнитных характеристик индуктора для обеззараживания стоков сельского хозяйства // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения: сб. трудов 9-й междунар. науч. конф. Ростов-на-Дону, 2016. С. 269-273.

13. Логвиненко Д. Д., Шеляков О. П. Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем. Киев: Техника, 1976. 144 с.

14. Никитенко А. Г., Бахвалов Ю. А., Щербakov В. Г. Аналитический обзор методов расчета магнитных полей электрических аппаратов // Электротехника. 1997. № 1. С. 15-19.

15. Оптимальные параметры и картина магнитного поля рабочей камеры в аппаратах с вихревым слоем / Р. А. Ибрагимов, Е. В. Королев, Р. Я. Дебердеев, В. В. Лексин // Строительные материалы. 2018. № 7. С. 64-67.

16. Преодоление ряда экологических проблем с помощью аппарата вихревого слоя / М. А. Карт, Д. С. Евдокимов, М. Н. Дюжаков, В. А. Войтович, Е. А. Захарычев, Р. Р. Шварев //

17. Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2020. № 5 (149). С. 30-34. Применение аппаратов вихревого слоя для ускорения химических реакций в низкоскоростных системах / Т. Р. Дебердеев, В. В. Лексин, Р. Р. Билалов, Р. Я. Дебердеев, А. А. Берлин // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2017. № 5. С. 2-5.

18. Селиверстов Г. В., Титов Д. П. Утилизация золошлаковых отходов с использованием перерабатывающих машин на принципах аппаратов вихревого слоя // Строительные и дорожные машины. 2017. № 12. С. 60-62.

19. Селиверстов Г. В., Титов Д. П. Оценка влияния ротора на рабочие параметры аппаратов вихревого слоя // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 3. С. 415-425.

20. Титов Д. П. Работа ротора в аппарате вихревого слоя // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2020. № 3. С. 114-120.

21. Эффект обеззараживания субстратов анаэробных биореакторов в аппарате вихревого слоя / Д. А. Ковалев, А. А. Ковалев, И. В. Катраева, Ю. В. Литти, А. Н. Ножевникова // Химическая безопасность. 2019. Т. 3. № 1. С. 56-64.

22. Parameters of optimized system of technological process of waste water disinfection of livestock enterprises in integrated physico-chemical effects / N. V. Byshov, I. A. Uspensky, I. A. Yukhin, N. V. Limarenko, I. V. Fadeev, S. D. Fomin // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. № 341 (012140).

Conclusion. 1. A method for calculating the electromagnetic parameters of an inductor of an electric apparatus with an uncoordinated moving part has been developed; the most significant design and electromagnetic parameters that affect the energy efficiency of the device are determined. 2. Modeling of the electromagnetic characteristics of the inductor of an electric apparatus and its uncoordinated moving part in the environment of NI Multisim 14.2 was carried out, a family of characteristics $m = f(I_\phi, I_c, \cos \varphi, P, Q, S, B)$ was obtained. 3. Statistical processing of the results of modeling the electromagnetic characteristics of the inductor of an electric apparatus was carried out, mathematical models were obtained in the

form of quadratic polynomials (30-32), on the basis of which an extrapolation estimate of their influence was made. 4. A mathematical model (34) is obtained, which determines the dependence of the electromagnetic and mechanical parameters of the uncoordinated movable part of the inductor of the electric apparatus. 5. The results obtained can be used to calculate the parameters of technological processes and inductors of electrical devices that have an uncoordinated moving part and implement complex electromechanical influences of a technological type, for example, intensification of disinfection of liquid media, as well as, with a certain refinement, for other technological processes using the principles of rotating alternating electromagnetic field with moving working bodies in it.

The development of the results obtained is the experimental assessment of the reliability of the data obtained during modeling and extrapolation on the corresponding experimental bench when solving various technological problems.

Reference

1. Adoshev A. I. Investigation of the electromagnetic characteristics of the ferrovortex apparatus // Rural mechanic. 2019. No. 4. P. 28-29.
2. Bakhvalov Yu. A., Volodin G. I., Gorchakov V. V. Synthesis of electromechanical activators with a vortex layer using inverse problems // Mathematical methods in engineering and technology. MMTT. Saratov, 2014. Vol. 7. Part 7. P. 25-27.
3. Vershinin I. N., Vershinin N. P. Apparatuses with a rotating electromagnetic field. Salsk: LLC "Advanced technologies of the XXI century", 2007. 368 p.
4. Grigoriev V. S., Kovalev A. A. System of preliminary preparation of substrates of digesters in a vortex layer apparatus with heat recovery // Electrotechnology and electrical equipment in the agro-industrial complex. 2020. V. 67. No. 2 (39). P. 8-13.
5. Danilina E. M., Volodin G. I., Breslavets V. P. Energy losses for eddy currents in electromagnetic devices of the vortex layer and methods for their reduction // News of higher educational institutions. Electromechanics. 2014. No. 1. P. 43-47.
6. The use of vortex layer apparatuses for obtaining water-oil emulsions / M. A. Kart, B. M. Kart, V. A. Voitovich, E. A. Zakharychev, R. R. Shvarev // Chemical Engineering. 2018. No. 1. P. 37-39.
7. Study of the influence of the parameters of the working bodies of the inductor on the power factor / I. A. Uspensky, I. A. Yukhin, G. A. Borisov, N. V. Limarenko // Bulletin of the Nizhnevolzhsky agrouniversity complex. 2019. No. 3 (55). P. 360-369.
8. Study of the parameters of the magnetic field in the working chamber of the inductor / N. V. Limarenko, V. P. Zharov, Yu. V. Panov, B. G. Shapoval // Bulletin Don. state tech. un-that. 2016. No. 1. P. 136-142.
9. Limarenko N. V. Experimental study of the influence of the mass of working bodies on the parameters characterizing the quality of the inductor functioning // Vestnik Don. state tech. un-that. 2016. Vol.16. No. 2. P. 90-96.
10. Limarenko N. V., Zharov V. P. Influence of temperature on the parameters of the inductor used in the disinfection of materials // Izvestiya VUZov. Food technology. 2016. No. 1. P. 88-91.
11. Limarenko N. V. Creation of a mathematical model of the technological process of disinfection of livestock effluents // Izvestiya VUZov. Food technology. 2017. No. 3. P. 108-112.
12. Limarenko N.V., Zharov V. P., Shapoval B. G. Mathematical modeling of the magnetic characteristics of the inductor for the disinfection of agricultural wastewater // State and prospects for the development of agricultural engineering: collection of articles. works of the 9th international. scientific. conf. Rostov-on-Don, 2016. P. 269-273.
13. Logvinenko D. D., Shelyakov O. P. Intensification of technological processes in devices with a vortex layer // Technics: Kiev, 1976. 144 p.
14. Nikitenko A. G., Bakhvalov Yu. A., Shcherbakov V. G. Analytical review of methods for calculating the magnetic fields of electrical devices // Electrical Engineering. 1997. No. 1. P. 15-19.
15. Optimal parameters and picture of the magnetic field of the working chamber in devices with a vortex layer / R. A. Ibragimov, E. V. Korolev, R. Ya. Deberdeev, V. V. Lexin // Building materials. 2018. No. 7. P. 64-67.
16. Overcoming a number of environmental problems using the vortex layer apparatus / M. A.

Kart, D. S. Evdokimov, M. N. Dyuzhakov, V. A. Voitovich, E. A. Zakharychev, R. R. Shvarev // Water treatment. Water treatment. Water supply. 2020. No. 5 (149). P. 30-34.

17. Application of vortex layer apparatuses to accelerate chemical reactions in low-speed systems / T. R. Deberdeev, V. V. Leksin, R. R. Bilalov, R. Ya. Deberdeev, A. A. Berlin // All materials. Encyclopedic reference. 2017. No. 5. P. 2-5.

18. Seliverstov G. V., Titov D. P. Utilization of ash and slag waste using processing machines on the principles of vortex layer devices // Construction and road machines. 2017. No. 12. P. 60-62.

19. Seliverstov G. V., Titov D. P. Assessment of the influence of the rotor on the operating parameters of the vortex layer apparatus // Bulletin of the Tula State University. Technical science. 2020. No. 3. P. 415-425.

20. Titov D. P. The work of the rotor in the vortex layer apparatus // Bulletin of the Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. 2020. No. 3. P. 114-120.

21. Effect of disinfection of substrates of anaerobic bioreactors in the vortex layer apparatus / D. A. Kovalev, A. A. Kovalev, I. V. Katraeva, Yu. V. Litty, A. N. Nozhevnikova // Chemical safety. 2019. Vol. 3. No. 1. P. 56-64.

22. Parameters of optimized system of technological process of waste water disinfection of livestock enterprises in integrated physico-chemical effects / N. V. Byshov, I. A. Uspenskiy, I. A. Yuhin, N. V. Limarenko, I. V. Fadeev, S. D. Fomin // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. No. 341 (012140).

Authors Information

Nikolay V. Byshov, Professor of the Department of machine and tractor Park operation, p. A. Kostychev Ryazan agrotechnological University (1, Kostycheva str., Ryazan, 390044, Russia), doctor of technical Sciences, Professor, Researcher ID: B-8363-2019; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4343-0444>; byshov@rgatu.ru

Ivan A. Uspenskiy, head of the Department of technical operation of transport OF the Ryazan agrotechnological University named after p. A. Kostychev (390044, Russia, Ryazan, Kostycheva str., 1), doctor of technical Sciences, Professor, Researcher ID: B-7990-2019; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4343-0444>; ivan.uspensckij@yandex.ru

Ivan A. Yuhin, head of the Department of automotive engineering and heat power ENGINEERING of the p. A. Kostychev Ryazan agrotechnological University (1, Kostycheva str., Ryazan, 390044, Russia), doctor of technical Sciences, associate Professor, Researcher ID: Q-8188-2017; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3822-0928>, ivan.uspensckij@yandex.ru

Nikolay V. Limarenko, associate Professor of the Department of electrical engineering and electronics, don state technical University (344000, Russia, Rostov-on-don, Gagarin square, 1), candidate of technical Sciences, Researcher ID: O-5342-2017; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3075-2572>, limarenkodstu@yandex.ru

Информация об авторах

Бышов Николай Владимирович, профессор кафедры эксплуатации машинно-тракторного парка ФГБОУ ВО «Рязанский агротехнологический университет имени П.А. Костычева» (390044, Россия, г. Рязань, ул. Костычева, д.1), доктор технических наук, профессор, Researcher ID: B-8363-2019; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4343-0444>; byshov@rgatu.ru

Успенский Иван Алексеевич, заведующий кафедрой техническая эксплуатация транспорта ФГБОУ ВО «Рязанский агротехнологический университет имени П.А. Костычева» (390044, Россия, г. Рязань, ул. Костычева, д.1), доктор технических наук, профессор, Researcher ID: B-7990-2019; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4343-0444>; ivan.uspensckij@yandex.ru

Юхин Иван Александрович, заведующий кафедрой автотракторная техника и теплоэнергетика ФГБОУ ВО «Рязанский агротехнологический университет имени П.А. Костычева» (390044, Россия, г. Рязань, ул. Костычева, д.1), доктор технических наук, доцент, Researcher ID: Q-8188-2017; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3822-0928>, ivan.uspensckij@yandex.ru

Лимаренко Николай Владимирович, доцент кафедры электротехника и электроника ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), кандидат технических наук, Researcher ID: O-5342-2017; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3075-2572>, limarenkodstu@yandex.ru