

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОГО НАСОСА

Найгерт К.В.<sup>1</sup>, Целищев В.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия

<sup>2</sup>Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

**Аннотация.** Как известно, объемный метод регулирования приводной системы является наиболее энергетически эффективным. В классических гидравлических системах организация объемного метода – дорогостоящее инженерное решение, но магнитореологические приводы позволяют минимизировать разницу в стоимости реализации объемного и дроссельного регулирования. Поэтому в статье описывается способ повышения эффективности характеристик магнитодинамических насосов путем применения винтовых управляющих электромагнитных полей. Представлено оригинальное запатентованное конструктивное решение сформулированной задачи и разработан алгоритм повышения эффективности рабочего процесса за счет оптимизации геометрии проточной части. Конструктивное решение повышения эффективности магнитодинамического насоса реализуется за счет управления потоком магнитореологической рабочей среды путем наложения внешних динамических винтовых электромагнитных полей, что генерирует в ней гидродинамические эффекты и сообщает потоку радиальную составляющую скорости, формируя винтовую траекторию движения частиц магнитореологической жидкости. Винтовые управляющие поля индуцируются каскадом блоков электромагнитного управления, которые состоят из элементов дифференциальной обмотки, расположенных по окружности. Благодаря этому происходит инициация вращательно-поступательного движения магнитореологической жидкости. Разработанная численная модель позволяет повысить эффективность рабочего процесса и состоит из магнитодинамической и гидродинамической частей. Применение данной численной модели дает возможность рационализировать характеристики магнитодинамического насоса. Приведен пошаговый алгоритм повышения эффективности рабочего процесса магнитодинамического насоса, описывающий последовательность определения требуемых параметров и закономерностей. Рационализация компонентов скорости проведена при помощи параметра, характеризующего интенсивность вращения потока. В результате численного эксперимента получены статические характеристики магнитодинамического насоса при различных значениях параметра, характеризующего интенсивность вращения потока.

**Ключевые слова:** магнитодинамический насос, эффективность рабочего процесса, винтовые электромагнитные поля, гидродинамические эффекты.

### Введение

Огромную популярность за последние десятилетия приобрели магнитореологические системы. Это связано с их хорошими динамическими характеристиками и большой глубиной регулирования, а также с простотой реализации в магнитореологических контурах объемного метода регулирования, применение которого в классических гидравлических системах требует существенных материальных затрат. Основным устройством, от которого зависит динамика магнитореологического привода при объемном методе регулирования, является насосный агрегат. Широко используемые на сегодняшний день магнитодинамические насосы обладают низким коэффициентом полезного действия в зонах гравитационных полей и неприспособленны к высоким рабочим давлениям. Данные недостатки напрямую связаны с их конструктивными особенностями. Прежде

всего, это конструктивная реализация линейного ускорения потока, приводящая к низким показателям мощности, малой производительности и большим габаритам. Также линейный способ транспортировки среды не защищает от явлений произвольного обратного тока рабочей среды через рабочую полость магнитодинамического насоса в случае резкого скачка давления в системе. Конструкции существующих магнитодинамических устройств представлены в [1–9].

Существующие конструкции магнитодинамического насоса обладают малой мощностью и относительно большими габаритами, а также не способны исключить непроизводительное протекание жидкости в рабочей камере и не применимы в магнитореологических контурах высокого давления. Это делает актуальным задачу повышения эффективности рабочего процесса магнитодинамического насоса.

Исследовательская работа посвящена созданию конструкции магнитодинамического насоса, способного при малых габаритах обеспечить зна-

чительные перепады давления и разработке методики его расчета, позволяющей производить рационализацию его геометрических параметров.

### Конструктивное решение повышения эффективности магнитодинамического насоса

Значительная длина рабочих зон подавляющего большинства магнитодинамических насосов связана с реализацией в них линейного ускорения рабочей среды. Поэтому применение винтовой проточной части рабочих зон существенно снижает линейные габариты устройства и повышает его производительность. Генерируемый гидродинамический вихрь также является надежной защитой от обратного тока рабочей среды при скачках давления в системе.

Предлагаемая конструкция магнитодинамического насоса реализует ускорение магнитореологической среды по винтовой траектории.

Винтовые управляющие электромагнитные поля в магнитодинамических устройствах обеспечивают простоту реализации реверсивного режима и возможность генерации магнитодинамических и гироскопических эффектов. Данные эффекты позволяют создавать значительные перепады давления и повышать кинетическую энергию магнитных частиц при равных значениях вольт-амперной характеристики в сравнении с классическими конструкциями магнитодинамических устройств с линейными рабочими зонами.

Очевидно, что наложение на поток магнитореологической жидкости внешних динамических винтовых электромагнитных полей способно генерировать в ней гидродинамические эффекты за счет сообщения потоку радиальной составляющей скорости и формирования винтовой траектории движения частиц магнитореологической жидкости. Винтовое поле индуцируется каскадом блоков электромагнитного управления. Каскады блоков электромагнитного управления потоком состоят из элементов дифференциальной обмотки, которые расположены по окружности, что инициирует вращательно-поступательное движение магнитореологической жидкости (рис. 1).

Подробное описание конструкции магнитодинамического насоса и принципа его работы описаны в работе [10]. Конструкция магнитодинамического насоса основана на оригинальном методе управления расходными характеристиками магнитореологической жидкости, опубликованном в работах [10–14].

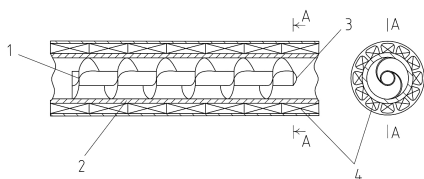


Рис. 1. Магнитодинамический насос: 1 – шнек; 2 – корпус; 3 – обтекатель; 4 – каскад блоков электромагнитного управления потоком

### Численная модель магнитодинамического насоса

Описание рабочего процесса магнитодинамического насоса целесообразно разделить на магнитодинамическую и гидродинамическую части. В рамках решения поставленной задачи значение имеет форма и амплитудно-частотные характеристики управляющего поля. Магнитодинамическую часть представим в следующем виде [15–18].

Винтовое управляющее поле можно описать численными зависимостями, задав цилиндрическую систему координат и винтовую симметрию:

$$r, \varphi, z \\ H = H(r, \varphi - \alpha z). \quad (1)$$

Основной качественный параметр спирали управляющего поля – напряженность, которая выражается через скалярный потенциал:

$$H = \nabla \Phi; \quad (2)$$

$$\Phi = H_I z + \frac{1}{\alpha} \sum_{n=1}^{\infty} h_n I_n(nar) \sin[n(\varphi - \alpha z)], \quad (3)$$

где  $H_I$  – напряженность поля блока управления;  $h_n$  – амплитуда поля;  $I_n$  – функция Инфеляда,

$$I_n(x) = i^{-n} J_n(nx); \quad (4)$$

$J_n$  – функция Бесселя первого рода [19],

$$J_n(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \cos((x) \sin \varphi - n\varphi) d\varphi; \quad (5)$$

$\alpha$  – коэффициент,

$$\alpha = \frac{2\pi}{L}; \quad (6)$$

$L$  – шаг элементов блока управления.

Введем для рассматриваемого управляющего поля следующие компоненты  $H_r, H_\varphi, H_z$ :

$$\begin{aligned} H_r &= \sum_{n=1}^{\infty} n h_m I_n' (n\alpha r) \sin[n(\varphi - \alpha z)]; \\ H_\varphi &= \frac{1}{\alpha r} \sum_{n=1}^{\infty} n h_m I_n (n\alpha r) \cos[n(\varphi - \alpha z)]; \quad (7) \\ H_z &= H_I - \sum_{n=1}^{\infty} n h_m I_n (n\alpha r) \cos[n(\varphi - \alpha z)]. \\ I_n' &\text{ — производная функция Инфеляда:} \\ I_n' (n\alpha r) &= \frac{1}{2} [I_{n-1} (n\alpha r) + I_{n+1} (n\alpha r)]. \quad (8) \end{aligned}$$

Векторный потенциал управляющего поля:

$$\begin{aligned} A &= (A_r, A_\varphi, 0), \\ B &= rot A, \\ rot A &= \left[ -\frac{\partial A_\varphi}{\partial z} \right] \hat{e}_r + \left[ \frac{\partial A_r}{\partial z} \right] \hat{e}_\varphi, \quad (9) \\ \hat{e}_r &= \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 0 \end{pmatrix}, \\ \hat{e}_\varphi &= \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} \begin{pmatrix} -y \\ x \\ 0 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

$B$  — магнитная индукция.

Компоненты векторного потенциала управляющего поля:

$$\begin{aligned} A_r &= -\frac{1}{\alpha^2 r} \sum_{n=1}^{\infty} h_m I_n (n\alpha r) \sin[n(\varphi - \alpha z)]; \\ A_\varphi &= H_I \frac{r}{2} - \frac{1}{\alpha} \sum_{n=1}^{\infty} h_m I_n' (n\alpha r) \cos[n(\varphi - \alpha z)], \quad (10) \\ A &= 0. \end{aligned}$$

Уравнение магнитной поверхности

$$\psi = H_I \frac{\alpha r^2}{2} - r \sum_{n=1}^{\infty} h_m I_n' (n\alpha r) \cos[n(\varphi - \alpha z)]. \quad (11)$$

Геометрические параметры сечения винтового управляющего поля по магнитной линии определяются из выражений:

$$\begin{aligned} \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} &= 1, \\ a &= \frac{h_m I_n' (n\alpha r_a)}{\alpha^2 H_I n}, \\ b &= \frac{h_m I_n (n\alpha r_a)}{\alpha^2 H_I r_a}, \quad (12) \\ x &= r - r_a, \\ y &= r_a \left( \varphi - \bar{\alpha} z \right), \\ \bar{\alpha} (r) &= \frac{1}{2\alpha^3 H_I^2} h_m^2 \left( \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \right)^2 \left( \frac{1}{2} I_n (n\alpha r) \right). \end{aligned}$$

$r_a$  — радиус оси винтового поля, равный внешнему радиусу корпуса.

Рационализацию рабочего процесса магнитодинамического насоса производим за счет изменения частотных параметров и оценки их влияния на гидродинамические характеристики устройства.

Гидродинамическая модель основана на [20]. Исходя из условия несжимаемости жидкости, справедливы следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + (v \nabla) v &= P_v - \frac{1}{\rho} grad P - \mathcal{G} rot (rot v), \\ P_v &= -\nabla \Pi, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + [\omega v] &= -grad \left( \frac{v^2}{2} + \Pi + \frac{P}{\rho} \right) - \mathcal{G} rot \omega, \quad (13) \\ \omega &= rot v, \\ \frac{\partial \omega}{\partial t} + (v \nabla) \omega - (\omega \nabla) v &= \mathcal{G} \nabla^2 \omega, \end{aligned}$$

где  $\omega$  — вектор вихря;  $P$  — гидростатическое давление;  $P_v$  — вектор плотности объемных сил;  $v$  — скорость;  $\rho$  — плотность;  $\mathcal{G}$  — кинематическая вязкость.

В магнитодинамическом насосе происходит создание перепада давления за счет повышения кинетической энергии частиц жидкой среды, формирования траекторий их движения и генерации вихря во внешних управляющих полях. Задав в рабочей камере условие преобладания сил инерции над силами вязкости, получим следующую систему уравнений для скорости и ее пространственных компонентов:

$$\begin{aligned}
 \text{rot } v &= kv, \\
 -\frac{\partial v_\varphi}{\partial z} &= kv_r, \\
 \frac{1}{r} \frac{\partial (rv_\varphi)}{\partial r} &= kv_z, \\
 \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial r} &= kv_\varphi, \\
 \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} + v_\varphi \left( k^2 - \frac{1}{r^2} \right) &= 0,
 \end{aligned} \quad (14)$$

где  $k$  – параметр, характеризующий интенсивность вращения потока;  $v_z$  – осевая компонента скорости;  $v_r$  – радиальная компонента скорости;  $v_\varphi$  – окружная компонента скорости,

$$\begin{aligned}
 v_\varphi(r, z) &= U_0(r) + U_\varphi(r, z), \\
 U_0(r) &= v_\varphi(r, 0), \\
 U_\varphi(r, z) &= v_\varphi(r, z) - v_\varphi(r, 0).
 \end{aligned} \quad (15)$$

Введя безразмерные координаты:

$$R = \frac{r}{r_2}; Z = \frac{z}{r_2}; K = kr_2, \quad (16)$$

где  $r_2$  – больший радиус кольцевого канала.

Уравнение окружной компоненты скорости примет вид

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial^2 U_\varphi}{\partial Z^2} + \frac{\partial^2 U_\varphi}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial U_\varphi}{\partial R} + U_\varphi \left( K^2 - \frac{1}{R^2} \right) &= -f(R), \\
 f(R) &= \frac{\partial}{\partial R} \left( \frac{1}{R} \frac{\partial (RU_0)}{\partial R} \right) + U_0 K^2.
 \end{aligned} \quad (17)$$

С целью упрощения получения решений функций Бесселя и Неймана для гидродинамической части модели запишем граничные условия исходя из допущения полубесконечности и непроницаемости кольцевого канала:

$$\begin{aligned}
 U_\varphi(R_1, Z) = 0; U_\varphi(R_2, Z) = 0; U_\varphi(R, 0) = 0; U_\varphi(R, \infty) < \infty, \\
 R_1 = \frac{r_1}{r_2}; R_2 = \frac{r_2}{r_2} = 1.
 \end{aligned} \quad (18)$$

Структура потока магнитореологической среды в рабочей зоне представляет собой монолитный винтовой объем – единый вихрь, поэтому, представив в виде ряда, получаем:

$$\begin{aligned}
 U_\varphi(R, Z) &= \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_n(Z) G_n(R), \\
 R^2 G_n'' + R G_n' + G_n (\mu_n^2 R^2 - 1) &= 0, \\
 G_n(R) &= Y_1(\mu_n R) - J_1(\mu_n R) Y_1(\mu_n R) / Y_1(\mu_n R_1), \\
 J_1(\mu_n) Y_1(\mu_n R_1) - J_1(\mu_n R_1) Y_1(\mu_n) &= 0, \\
 \Phi_n'' - (\mu_n^2 - K^2) \Phi_n &= -f_n, \\
 f_n &= \int_{R_1}^1 f(R) G_n(\mu_n R) R dR / \int_{R_1}^1 G_n^2(\mu_n R) R dR,
 \end{aligned} \quad (19)$$

где  $f_n$  – коэффициенты разложения;  $\mu_n$  – собственные значения – корни уравнений;  $Y_n$  – функция Неймана в общем виде [19],

$$Y_n(x) = \frac{J_n(x) \cos(n\pi) - J_{-n}(x)}{\sin(n\pi)}. \quad (20)$$

$$\text{Здесь } J_{-n}(x) = (-1)^n J_n(x). \quad (21)$$

Течение винтового потока жидкости в кольцевом канале – распределение окружной компоненты скорости примет вид

$$\begin{aligned}
 v_\varphi(R, Z) &= U_0(R) + \\
 + \sum_{n=1}^m \frac{f_n G_n(\mu_n R)}{\mu_n^2 - K^2} &\left[ 1 - \frac{\cos(Z\sqrt{K^2 - \mu_n^2} - \Phi_n)}{\cos \Phi_n} \right] + \\
 + \sum_{n=m+1}^{\infty} \frac{f_n G_n(\mu_n R)}{K^2 - \mu_n^2} &\left[ \exp(-Z\sqrt{\mu_n^2 - K^2} - 1) \right].
 \end{aligned} \quad (22)$$

### Алгоритм повышения эффективности рабочего процесса магнитодинамического насоса за счет оптимизации геометрии проточной части

Шаг 1: Примем для магнитодинамической и гидродинамической частей следующее равенство:

$$r_a = r_2. \quad (23)$$

Шаг 2: Для связи магнитодинамической и гидродинамической частей зададим равенство окружной компоненты скорости  $v_\varphi$  и угловой частоты  $\omega_\varphi$ :

$$\omega_\varphi = v_\varphi. \quad (24)$$

Шаг 3: Определим для необходимого расхода требуемое значение окружной компоненты скорости  $v_\varphi$  из уравнения расхода через рабочее сече-

ние магнитодинамического насоса:

$$Q = S\omega_{\phi}(r_2), \quad (25)$$

где  $S$  – рабочее сечение.

Шаг 4: В соответствии с заданной окружной компонентой скорости найдем значение параметра:

$$K = \frac{2v_{\phi}r_2}{rv_z}. \quad (26)$$

Шаг 5: Оптимизируем характер распределения окружной компоненты скорости  $v_{\phi}(R, Z)$ , подбирая значения  $\mu_n$  для различных отношений радиусов  $R_1$ , приведенных в таблицах [20], и определяя на их основе рациональные значения соотношения геометрии кольцевого рабочего сечения.

Шаг 6: Найдем решения функций Бесселя и Инфеляда для магнитодинамической части. Принять  $n = 1$ .

Шаг 7: Получим решения функций Бесселя и Неймана для гидродинамической части.

Шаг 8: Зададим значение амплитуды управляющего поля и по полученному значению угловой частоты определяем требуемые значения напряженности поля блока управления:

$$H_z = h_m \cos(\omega_{\phi}t + \psi_{\omega}). \quad (27)$$

где  $\psi_{\omega}$  – начальная фаза.

Шаг 9: По полученным решениям функций Бесселя и Инфеляда, а также параметрам поля, индуцируемого блоком управления, для магнитодинамической части определим требуемые геометрические характеристики винтового управляющего поля.

Шаг 10: Определим параметры магнитного поля пофазно (2).

Шаг 11: Опишем магнитную индукцию блока электромагнитного управления:

$$B = \text{rot}A. \quad (28)$$

### Результаты численного эксперимента

Вариант повышения эффективности рабочего процесса осуществим путем рационализации компонентов скорости, проводя согласования их соотношения в системе уравнений скорости и ее пространственных компонентов с учетом геометрических параметров потока, формируемого управляющим полем, и требуемых расходных характеристик магнитодинамического насоса.

Базируясь на геометрических характеристиках винтового управляющего поля, требуемых для достижения желаемого расхода, смоделируем траекторию течения магнитореологической среды в бегущем винтовом поле (рис. 2). С целью экономии времени, требуемого для проведения расчета, рассмотрим один виток траектории. Рационализацию компонентов скорости проще всего произвести, используя параметр характеризующий интенсивность вращения потока  $k$ . По винтовой траектории, основываясь на параметре, характеризующем интенсивность вращения потока, определим расходные характеристики магнитодинамического насоса (рис. 3).

Результаты численного эксперимента иллюстрируют существенную зависимость расходных характеристик от интенсивности вращения потока и подтверждают возможность применения ее при моделировании рабочих характеристик магнитодинамических насосов с винтовыми управляющими полями. В подобных устройствах движение магнитореологической среды производится вращательно-поступательно посредством бегущего винтового электромагнитного поля, индуцируемого каскадом блоков управления потоком, которые состоят из элементов дифференциальной обмотки. Управляющее бегущее электромагнитное поле индуцируется каскадом электромагнитов посредством последовательного включения контуров, питающих блоки и элементы дифференциальной обмотки блоков управления потоком, входящих в каскад, при этом включение обмотки каждого последующего блока начинается со смещения на один элемент дифференциальной обмотки, то есть с угловым сдвигом. Очевидно, что параметр, характеризующий интенсивность вращения потока, является мерой скорости переключения элементов дифференциальных обмоток, образующих спираль. Полученные результаты имеют существенное прикладное значение и применимы в инженерной практике.

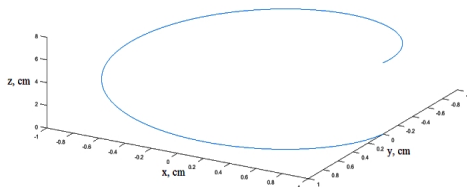


Рис. 2. Траектория движения потока магнитореологической жидкости в винтовом электромагнитном поле (один виток)

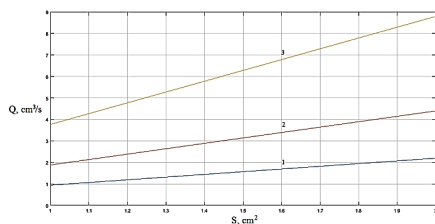


Рис. 3. Статические характеристики насоса: 1 линия –  $k=1$ ; 2 линия –  $k=2$ ; 3 линия –  $k=4$

Таким образом, разработанная конструкция магнитодинамического насоса отличается от ранее известных тем, что рабочий процесс устройства заключается в создании винтового управляющего поля за счет каскада блоков управления, выполненных из сборок дифференциальных индукторов и спирального направляющего аппарата проточной части.

Разработанный метод численного моделирования представленного в работе запатентованного магнитодинамического насоса позволяет рационализировать геометрию проточной части и управляющего поля, что значительно улучшает характеристики рабочего процесса и повышает эффективность устройства.

### Заключение

Разработанный метод управления расходными характеристиками магнитореологической среды эффективен и промышленно применим.

Разработан метод рационализации геометрических параметров конструкции магнитодинамического насоса, что дает возможность повысить эффективность рабочего процесса и улучшиться гидродинамические характеристики устройства.

На основе предложенного метода управления расходом создана оригинальная конструкция магнитодинамического насоса.

Результаты численного эксперимента подтверждают эффективность предложенного конструктивного решения.

### Список литературы

1. Пат. 2443911 РФ. Магнитореологическая позиционирующая и виброизолирующая система / В.П. Михайлов и др. Опубл. 27.02.2012. Бюл. № 6.
2. Patent US 6116144. Pressure motor for electro-rheological fluids H. Rosenfeldt et. al., Publication date 05.06.2001.
3. Patent US 20110037325. Integrated electromagnetohydrodynamic micropumps and methods for pumping fluids C. Ciocanel, N. Islam, Publication date 17.02.2011.
4. Пат. 2145394 РФ. Магнитожидкостное устройство для

- гашения колебаний / В.Н. Бурченков и др. Опубл. 10.02.2000. Бюл. № 4.
5. Пат. 2449188 РФ. Регулируемый магнитореологический пневматический амортизатор / А.Б. Корчагин и др. Опубл. 27.04.2012. Бюл. № 12.
6. Пат. 2232316 РФ. Магнитореологический амортизатор / Е.П. Гусев и др. Опубл. 27.10.2003. Бюл. № 30.
7. Пат. 2106551 РФ. Магнитореологический виброгаситель / Ю.Б. Кудряков и др. Опубл. 10.03.1998.
8. Пат. 2354867 РФ. Динамический гаситель / И.А. Яманин и др. Опубл. 10.05.2009. Бюл. № 13.
9. Пат. 2561610 РФ. Магнитореологический амортизатор / Б.А. Гордеев и др. Опубл. 27.08.2015. Бюл. № 24.
10. Пат. 2634166 РФ. Магнитореологический привод прямого электромагнитного управления характеристиками потока верхнего контура гидравлической системы с гидравлическим мостиком / К.В. Найгерт, С.Н. Редников. Опубл. 24.10.2017. Бюл. № 30.
11. Способ управления расходными характеристиками магнитореологической жидкости за счет создания гидродинамических и неньютоновских эффектов во внешних динамических электромагнитных полях: пат. заявка 2018130914 РФ / К.В. Найгерт, В.Т. Тутьин, В.А. Целищев. 27.08.2018.
12. Физические основы проектирования магнитореологических систем нового поколения / К.В. Найгерт, В.А. Целищев и др. // Избранные труды Всероссийской конференции по проблемам науки и технологий. Москва: РАН, 2018. 90 с.
13. Hardware Implementation of Automatic Control System for New Generation Magnetorheological Supports / K.V. Naigert, V.A. Tselishev // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, pp. 2219–2228. 2019.
14. New Generation Magnetorheological, Magnetodynamic, and Ferrofluid Control Devices with Nonstationary Electromagnetic Fields / K.V. Naigert, V.A. Tselishev // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, pp. 1375–1384. 2019.
15. Магнитные поверхности трёхзаходного винтового магнитного поля, возмущённого гофрированным полем / И.М. Гельфанд, и др. // Журнал технической физики. 1961. Т. XXXI. Вып. 10. С. 1164.
16. Пример тороидального магнитного поля, не обладающего магнитными поверхностями / И.М. Гельфанд, и др. // ДАН СССР. 1962. Т. 143. № 1. С. 81.
17. О структуре тороидального магнитного поля, не обладающего магнитными поверхностями / И.М. Гельфанд, и др. // ДАН СССР. 1963. Т. 148. № 6. С. 1286.
18. Движение частиц в винтовом тороидальном магнитном поле / Морозов А.И. и др. // Журнал технической физики. 1960. Т. XXX. Вып. 3. С. 271.
19. Бейтмен Г., Эрдейи А. Функции Бесселя, функции параболического цилиндра, ортогональные многочлены // Высшие transcendентные функции. Т.2. М.: Наука, 1974. 296 с.
20. Митрофанова О.В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 288 с.

Поступила 25.02.19

Принята в печать 22.03.19

## IMPROVING THE MAGNETODYNAMIC PUMP PERFORMANCE

**Katarina V. Naigert** – PhD (Eng.), Doctoral Student  
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

E-mail: [kathy\\_naigert@mail.ru](mailto:kathy_naigert@mail.ru) <https://orcid.org/0000-0002-8779-9729>.

**Vladimir A. Tselishchev** – DSc (Eng.), Professor,  
Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia. E-mail: [pgl.ugatu@mail.ru](mailto:pgl.ugatu@mail.ru)

**Abstract.** It is obvious that the volumetric method of regulating the drive system is the most energy efficient. Implementation of the volumetric method is an expensive engineering solution for conventional hydraulic systems, but magnetorheological drives minimize the difference between costs of using volumetric and throttle control methods. Therefore, the paper describes a method for increasing the efficiency of magnetodynamic pumps by applying helical control electromagnetic fields. The authors presented an unconventional patented design solution of the formulated task and created an algorithm for improving the efficiency of the operation by optimizing the flow path geometry. A design solution to increase efficiency of magnetodynamic pumps is implemented by controlling the flow of magnetorheological fluid in the external dynamic helical electromagnetic fields; it generates hydrodynamic effects, transfers the radial velocity component of the flow and forms a helical path of magnetorheological fluid particles. The helical control fields are induced by a cascade of electromagnetic control blocks, which consist of differential winding elements arranged in a circle. It initiates the rotating and reciprocating motion of magnetorheological fluid. A numerical model has been developed to improve the efficiency of its operation and includes magnetodynamic and hydrodynamic parts. The use of this numerical model makes it possible to rationalize the characteristics of magnetodynamic pumps. The paper presents a step-by-step algorithm of improving the efficiency of the magnetodynamic pump operation. The algorithm describes the sequence of determining the required parameters and patterns. Speed components are rationalized by a parameter, which characterizes the intensity of flow rotation. As a result of a numerical experiment, static characteristics of the magnetodynamic pump were obtained for different values of the mentioned parameter.

**Keywords:** Magnetodynamic pump, efficiency of the operation, helical magnetic fields, hydrodynamic effects.

## References

1. Mikhailov V.P. et al. *Magnitореологическая позиционировальная и виброизоляция системы* [Magnetorheological positioning and vibration isolation system]. Patent RF, no. 2443911, 2012.
2. Rosenfeldt H. et al. Pressure motor for electro-rheological fluids. Patent US, no. 6116144, 2001.
3. Ciocanel C., Islam N. Integrated electro-magnetohydrodynamic micropumps and methods for pumping fluids. Patent US, no. 20110037325, 2011.
4. Burchenkov V.N. et al. *Magnitozhidkostnoye ustroystvo dlya gasheniya kolebaniy* [Magneto-liquid device for dampening oscillations]. Patent RF, no. 2145394, 2000.
5. Korchagin A.B. et al. *Reguliruemiy magnitореологический пневматический амортизатор* [Adjustable magnetic rheological pneumatic shock absorber]. Patent RF, no. 2449188, 2012.
6. Gusev E.P. et al. *Magnitореологический амортизатор* [Magnetorheological shock absorber]. Patent RF, no. 2232316, 2003.
7. Kudryakov Yu.B. et al. *Magnitореологический вибросигтел* [Magnetorheological vibration damper]. Patent RF, no. 2106551, 1998.
8. Yamanin I.A. et al. *Dinamicheskiy gasitel* [Dynamic damper]. Patent RF, no. 2354867, 2009.
9. Gordeev B.A. et al. *Magnitореологический амортизатор* [Magnetorheological shock absorber]. Patent RF, no. 2561610, 2015.
10. Naigert K.V., Rednikov S.N. *Magnitореологический привод прямого электромагнитного управления характеристикami potoka verkhnego kontura gidravlicheskoй системы s gidravlicheskim mostikom* [A magnetorheological drive of direct electromagnetic control of flow characteristics of the hydraulic system with the hydraulic bridge upper circuit]. Patent RF, no. 2634166, 2017.
11. Naigert K.V., Tutynin V.T., Tselishchev V.A. *Sposob upravleniya rashodnymi kharakteristikami magnitореологическоy zhidkosti za schet sozdaniya gidrodinamicheskikh i nenyutonovskikh effektivov vo vnesnnykh dinamicheskikh elektromagnitnykh polyakh* [The method of controlling the magnetorheological fluid flow characteristics by creating hydrodynamic and non-Newtonian effects in external dynamic electromagnetic fields]. Patent application RF, no. 2018130914, 2018.
12. Naigert K.V., Tselishchev V.A. et al. Chapter 3. Physical principles of designing a new generation of magnetorheological systems. *Itogi nauki. Vypusk 35: monografiya*. [Results of science. Issue 35: monograph]. Selected papers of the All-Russian Conference on Problems of Science and Technology. Moscow: Russian Academy of Sciences, 2018, 90 p. (in Russ.)
13. Naigert K.V., Tselishchev V.A. Hardware implementation of automatic control system for new generation magnetorheological supports. Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, pp. 2219–2228, 2019.
14. Naigert K.V., Tselishchev V.A. New generation magnetorheological, magnetodynamic, and ferrofluid control devices with nonstationary electromagnetic fields. Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, pp. 1375–1384, 2019.
15. Gelfand I.M. et al. Magnetic surfaces of a three-way helical magnetic field perturbed by a corrugated field. *Zhurnal*



- tekhnicheskoy fiziki* [Journal of Technical Physics], 1961, vol. 31, no. 10, p. 1164. (In Russ.)
16. Gelfand I.M. et al. An example of a toroidal magnetic field without magnetic surfaces. *DAN SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1962, vol. 143, no. 1, p. 81. (In Russ.)
17. Gelfand I.M. et al. On the structure of a toroidal magnetic field without magnetic surfaces. *DAN SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1963, vol. 148, no. 6, p. 1286. (In Russ.)
18. Morozov A.I. et al. Motion of particles in a helical toroidal magnetic field. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of Technical Physics], 1960, vol. 30, no. 3, p. 271. (In Russ.)
19. Bateman H., Erdélyi A. *Funktsii Besselya, funktsii parabolicheskogo tsilindra, ortogonalnye mnogochleny* [Bessel functions, parabolic cylinder functions, orthogonal polynomials]. Higher Transcendental Functions, vol. 2. Moscow: Nauka, 1974, 296 p. (In Russ.)
20. Mitrofanova O.V. *Gidrodinamika i teploobmen zakruchennykh potokov v kanalah yaderno-energeticheskikh ustanovok* [Hydrodynamics and heat transfer of swirling flows in channels of nuclear power plants]. Moscow: FIZMATLIT, 2010, 288 p. (In Russ.)

Received 25/02/19

Accepted 22/03/19

---

**Образцы для цитирования**

Найгерт К.В., Целищев В.А. Повышение эффективности рабочего процесса магнитодинамического насоса // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №2. С. 60–67. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-60-67>

**For citation**

Naigert K.V., Tselishchev V.A. Improving the magnetodynamic pump performance. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019, vol. 17, no. 2, pp. 60–67. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-2-60-67>

---