

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. №5 (179). С. 38-48.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. №5 (179). P. 38-48.

Научная статья
УДК 621.891
doi: 10.30987/2223-4608-2026-5-38-48

Изменение момента и потерь трения в магнитожидкостном уплотнении вала частотно-регулируемого электродвигателя при изменении режима работы

Алексей Михайлович Власов¹, к.т.н.

Юрий Борисович Казаков², д.т.н.

Ирина Игоревна Ведерникова³, к.т.н.

^{1, 2, 3} Ивановский государственный энергетический университет, Иваново, Россия

¹ leshka.vlasov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-2166-2471>

² dr.kazakov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-0855-570X>

³ vedernikova@tam.ispu.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. На работу магнитожидкостного уплотнения вала частотно-регулируемого электродвигателя, кроме воздействующего перепада давлений и внешней температуры, оказывают влияние его конструктивные особенности и режим работы (нагрузка, частота питающего напряжения, скорость вращения ротора). Магнитный поток торцевого рассеяния электродвигателя, определяемый нагрузкой (токами обмоток) и материалом подшипниковых щитов (магнитопроводящий, немагнитный), вращающийся с синхронной скоростью, проникает в магнитожидкостное уплотнение, перераспределяет магнитную индукцию в уплотнении, дополнительно к вращающемуся валу увлекает магнитную жидкость во вращение, изменяет момент и потери трения в уплотнении, температуру магнитной жидкости. Работоспособность магнитожидкостного уплотнения ограничена критической температурой магнитной жидкости, момент и потери трения в уплотнении влияют на эффективность работы электродвигателя. Изменения показателей магнитожидкостного уплотнения вала при изменении режима работы частотно-регулируемого электродвигателя ранее не анализировались. На основе решения экспоненциальных уравнений разработан алгоритм учета изменения вязкости магнитной жидкости при изменении частоты вращения вала и нагрузки электродвигателя, магнитной индукции в уплотнении, внешней температуры и воздействующего перепада давлений, который позволяет корректно определять момент и потери трения в магнитожидкостном уплотнении, температуру магнитной жидкости. Моделирование взаимосвязанных магнитных, гидродинамических и тепловых процессов в уплотнении показало, что наибольшее влияние на момент и потери трения магнитожидкостного уплотнения, температуру магнитной жидкости оказывает работа электродвигателя в режиме холостого хода в конструкции со стальными (магнитопроводящими) подшипниковыми щитами при повышенной частоте питающего напряжения, сопровождающейся максимальным магнитным потоком торцевого рассеяния в электродвигателе и повышенной скорости вращения вала.

Ключевые слова: момент трения, магнитожидкостное уплотнение, электродвигатель, режим работы

Для цитирования: Власов А.М., Казаков Ю.Б., Ведерникова И.И. Изменение момента и потерь трения в магнитожидкостном уплотнении вала частотно-регулируемого электродвигателя при изменении режима работы // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. № 5 (179). С. 38–48. doi:10.30987/2223-4608-2026-5-38-48

Frictional moment variation and friction loss change in the magnetic fluid seal of a frequency-controlled electromotor shaft depending on the operating mode changes

Alexey M. Vlasov¹, PhD. Eng.

Yuri B. Kazakov², D. Eng.

Irina I. Vedernikova³, PhD. Eng.

^{1, 2, 3} Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russia

¹leshka.vlasov@gmail.com,

²dr.kazakov@mail.ru,

³vedernikova@tam.ispu.ru

Abstract. The operation of magnetic fluid seal of a frequency-controlled electromotor shaft is not only influenced by its design features and operating mode (load, frequency of supply voltage, speed of rotor rotation) but also pressure drop and outdoor temperature. The residual flux of the electromotor end leakage measured by the load (winding currents) and the end shield material (magnetically conductive, non-magnetic), rotating at a synchronous speed, penetrates the magnetic-liquid seal, redistributes magnetic induction in the seal, in addition to the rotating shaft, draws the magnetic fluid in rotation, changes the moment and friction losses in the seal, and the temperature of the magnetic fluid. The performance of the magnetic fluid seal is limited by the critical temperature of the magnetic fluid, and the moment and loss of friction in the seal affect the efficiency of the electromotor. Changes in the parameters of magnetic fluid seal of a frequency-controlled electromotor shaft due to mode change for a frequency-controlled electric motor have not been analyzed before. Based on the solution of exponential equations, an algorithm has been developed to account for changes in the viscosity of a magnetic fluid when the shaft rotation speed and the load of an electric motor change, magnetic induction in the seal, external temperature and the acting pressure drop, which makes it possible to get both a well-defined moment and friction losses in the magnetic fluid seal and the temperature of the magnetic fluid. Modeling of interrelated magnetic, hydrodynamic and thermal processes in the seal has shown that the greatest influence on the moment and loss of friction of the magnetic fluid seal and the temperature of the magnetic fluid is exerted by the operation of an electric motor in idle mode in a structure with steel (magnetically conductive) end shields at an increased frequency of the supply voltage, accompanied by a maximum magnetic flux of electromotor end leakage and increased rotational speed of the shaft.

Keywords: friction moment, magnetic-liquid seal, electric motor, operating mode

For citation: Vlasov A.M., Kazakov Yu.B., Vedernikova I.I. Frictional moment variation and friction loss change in the magnetic fluid seal of a frequency-controlled electromotor shaft depending on the operating mode changes / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. № 5 (179). P. 38–48. doi: 10.30987/2223-4608-2026-5-38-48

Ведение

В электродвигателях (ЭД) для изолирования внутреннего объема, например во взрывозащищенных ЭД, при необходимости удержания перепада давлений Δp между разделяемыми областями вместо механических уплотнений (щелевых, лабиринтных, сальниковых, манжетных) зазора $\delta = R - r$ между неподвижным корпусом ЭД с внутренним радиусом R и выходным вращающимся валом радиусом r применяют магнитожидкостные уплотнения (МЖУ) с эффективным гидравлическим затвором зазора магнитной жидкостью (МЖ) (рис. 1), удерживаемой в зазоре магнитным потоком $\Phi_{\text{пм}}$ магнита с зубцовой зоной на полюсах [1]. Перепад давлений Δp стремится выдвинуть МЖ из зазора, но изменение положения МЖ вызывает уравновешивающую магнитную

силу, стремящую вернуть МЖ в положение, соответствующее минимуму ее потенциальной энергии при воздействии Δp . При максимальном Δp_{max} МЖ занимает критическое положение, при $\Delta p > \Delta p_{\text{max}}$ возникает пробой МЖУ. Увеличение действующей на МЖ магнитной индукции B повышает удерживаемый МЖУ Δp_{max} , определяемый разностью максимальной B_{max} и минимальной B_{min} индукций на противоположных поверхностях МЖ пробки. МЖУ характеризуется Δp_{max} , моментом страгивания $M_{\text{стр}}$, моментом трения $M_{\text{тр}}$, мощностью диссипационных потерь $P_{\text{тр}}$ на вязкое трение в МЖ при сдвиговом течении ее слоев. $P_{\text{тр}}$ определяет разогрев МЖ до температуры $T_{\text{мж}}$. При предельной температуре $T_{\text{мж.пред}} < 150^\circ\text{C}$ МЖ вскипает, МЖУ теряет способность герметизации. Значения Δp_{max} , $M_{\text{стр}}$, $M_{\text{тр}}$ и $P_{\text{тр}}$ влияют на герметизацию и эффективность работы ЭД.

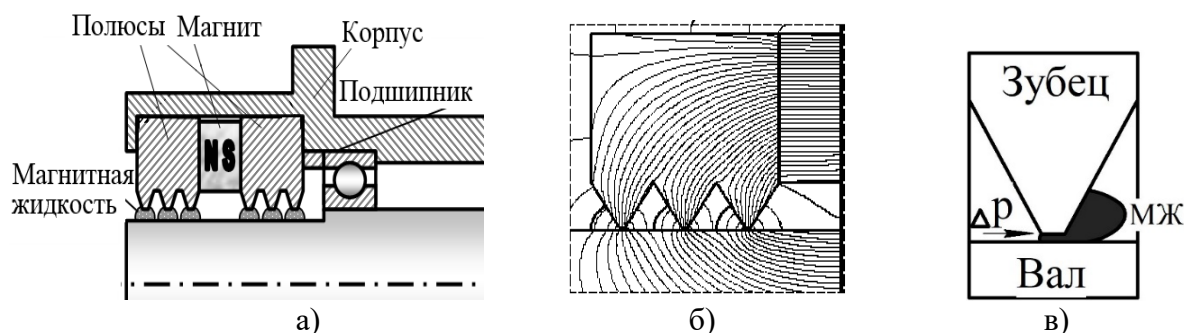


Рис. 1. Конструкция МЖУ (а), прохождение $\Phi_{пм}$ через зазор (б), положение МЖ при воздействии Δp (в)

Fig. 1. The design of the MFS (a), the passage of the $\Phi_{пм}$ through the gap (b), the position of the MF when exposed Δp (c)

Режим работы частотно-регулируемого ЭД может оказывать влияние на работу МЖУ. При работе ЭД могут изменяться внешняя температура $T_{внеш}$, частота питающего напряжения и нагрузка ЭД, определяющие скоростью вращения вала n . Вращающийся вал ЭД увлекает МЖ в движение со скоростью v . При $v < 20$ м/с течение МЖ в зазоре ламинарное, при $v > 20$ м/с начинается переход к турбулентному течению с возникновением вихрей и резким повышением $M_{тр.v}$, $P_{тр.v}$ [2].

Нагрузка ЭД характеризуется протекающим в обмотках током I , который определяет

торцевой магнитный поток рассеяния $\Phi_б$ в ЭД, проникающий в МЖУ (рис. 2) и дополнительно к $\Phi_{пм}$ воздействующий на МЖ. При этом $\Phi_{пм}$ неподвижен, а $\Phi_б$ вращается в зазоре МЖУ с синхронной скоростью вращения n_c , определяемой частотой напряжения (в асинхронном ЭД $n_c > n$). Изменение V от дополнительного воздействия $\Phi_б$ будет вызывать изменение $M_{стр}$, $M_{тр.v}$, $P_{тр.v}$ и $T_{мж}$. $T_{внеш}$ непосредственно влияет на $T_{мж}$. Изменения $M_{тр}$, $P_{тр}$ и $T_{мж}$ МЖУ вала при изменении режима работы частотно-регулируемого ЭД ранее не анализировались, хотя они определяют, в том числе, работоспособность ЭД.

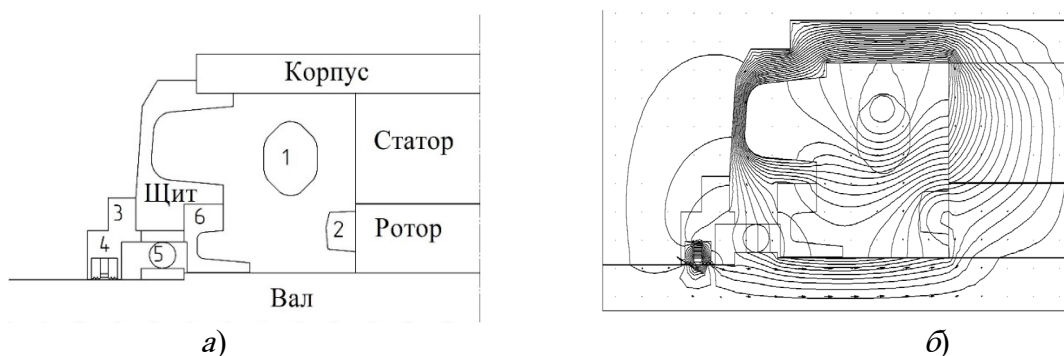


Рис. 2. Торцевая зона ЭД (а) и линии магнитного потока $\Phi_б$ ЭД, проникающего в МЖУ (б):

1, 2 – лобовые части обмоток статора и ротора; 3, 4 – МЖУ; 5 – подшипник; 6 – внутренняя крышка

Fig. 2. The end zone of the EM (a) and the lines of the magnetic flux $\Phi_б$ EM penetrating into the MFS (b):

1, 2 – the frontal parts of the stator and rotor windings; 3, 4 – MFS; 5 – bearing; 6 – inside cap

Материалы и модели

Корректное определение свойств МЖУ осложняется нелинейностью термомагнито-реологических характеристик МЖ, зубцовой зоной полюсов, неизвестным положением МЖ в зазоре при воздействии Δp . Магнитная характеристика МЖ нелинейная (рис. 3, а).

Вследствие неравномерности δ в зубцовой зоне магнитное поле в зазоре МЖУ неоднородное. МЖ, как нелинейно-вязкопластичный материал, обладает начальным напряжением сдвига τ_0 , т.к. в статическом режиме в МЖ в магнитном поле происходит перераспределение магнитных частиц с образованием из них цепочечной структуры, для разрушения

которой и приведения МЖ в движение с касательным сдвигом слоев необходимо приложить $M_{стр}$. Повышение $T_{МЖ}$ увеличивает тепловую энергию магнитных частиц в МЖ и их тепловую диффузию, что сглаживает эффект магнитной диффузии. $M_{тр}$ определяется вязкостью МЖ η и скоростью сдвига $\gamma = \frac{dv}{d\delta}$. Неравномерность δ в зубцовой зоне вызывает локальные изменения γ .

Слои МЖ при вращении вала движутся в зазоре с разными скоростями: на поверхности вала $v = v_r = \pi r n / 30$ (для n в об/мин); $v = v_R = 0$ на поверхности неподвижных полюсов. Из-за локальных изменений η и воздействия вращающего Фб, профиль изменения v в зазоре нелинейный. Реологическая

характеристика МЖ $\eta = f(\gamma)$ нелинейная (рис. 3, б) [1]: при $v = 0$ ($\gamma = 0$) $\tau = \tau_0$ и $\eta \rightarrow \infty$; при $v > 0$, $\tau = \eta\gamma$, при чем для $\gamma = (100 \dots 1000) \text{ с}^{-1}$ можно принять $\tau \sim \gamma^{0,9}$ и $\eta \sim \gamma^{-0,1}$; для $\gamma > 1000 \text{ с}^{-1}$ можно принять $\tau \sim \gamma$ и $\eta \cong \eta_{мин} = \text{const}$. Возрастание B нелинейно увеличивает τ_0 , τ и η (рис. 3, в). Изменение n , пропорционально изменяет v и γ , квадратично изменяет $P_{тр}$. Повышение $T_{МЖ}$ нелинейно снижает τ_0 , τ и η (рис. 3). С увеличением B теплопроводность МЖ λ в направлении магнитного потока возрастает до 15 %. Рост $T_{МЖ}$ снижает ориентированность магнитных моментов частиц в МЖ по магнитному полю, что уменьшает намагниченность насыщения МЖ M_s с интенсивностью - 0,15 %/°C.

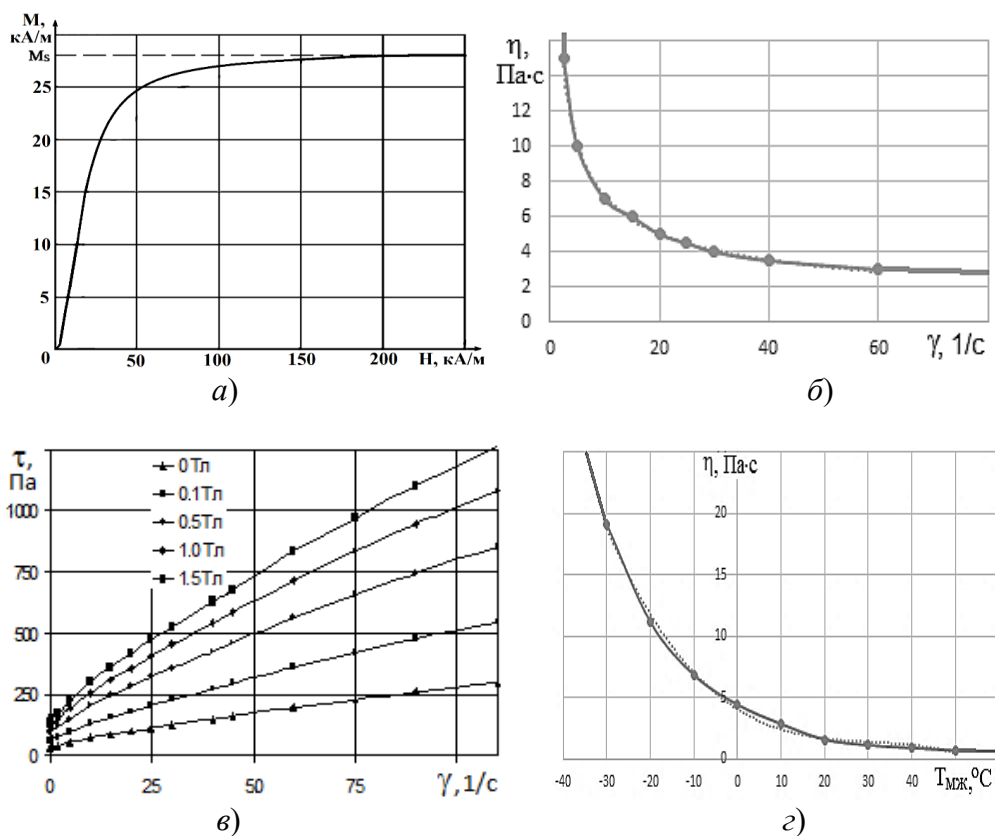


Рис. 3. Характеристики МЖ:

a – магнитная; *б* – реологическая, *в* – магнито-реологические; *г* – термо-реологическая

Fig. 3. Characteristics of MF:

a – magnetic; *b* – rheological; *c* – magnetorheological; *d* – thermorheological

Таким образом изменения γ , B и $T_{внеш}$ приводят к разнонаправленным нелинейным изменениям η , $T_{МЖ}$, $M_{стр}$, $M_{тр}$ и $P_{тр}$. В общем случае следует считать η , τ_0 , $\tau = f(\gamma, B, T_{МЖ})$.

В МЖ некоторые физические свойства взаимозависимы, например, η влияет на $P_{тр}$ и

$T_{МЖ}$, но $T_{МЖ}$ влияет на η . Комплексный аналитический учет взаимной связи изменений η с изменениями γ , B и $T_{внеш}$ при анализе $P_{тр}$, $T_{МЖ}$, $M_{стр}$, $M_{тр}$ МЖУ ранее не выполнялся.

На основании анализа характеристик МЖ приняты соотношения [3] (табл. 1).

1. Соотношения для определения η и τ_0

1. Relationships for determining η and τ_0

Параметр		Частные соотношения для определения $\eta_{\gamma,B,T_{МЖ}}$, Па·с; $\tau_{0,B,T_{МЖ}}$, Па
γ, c^{-1}	$0 < \gamma < 1000$	$\eta_{\gamma,B,T_{МЖ}} = 6\eta_{\gamma=1000,B,T_{МЖ}}\gamma^{-0,25}$
	$1000 < \gamma < 10000$	$\eta_{\gamma,B,T_{МЖ}} = 2\eta_{\gamma=1000,B,T_{МЖ}}\gamma^{-0,1}$
	$\gamma > 10000$	$\eta_{\gamma,B,T_{МЖ}} = 2\eta_{\gamma=1000,B,T_{МЖ}}10000^{-0,1} = 0,796\eta_{\gamma=1000,B,T_{МЖ}}$
B, T	$\tau_{0,B,T_{МЖ}} = \tau_{0,B=0,T_{МЖ}}(1 + 2,65\sqrt{B}),$ $\eta_{\gamma,B,T_{МЖ}} = \eta_{\gamma,B=0,T_{МЖ}}(1 + 2,65\sqrt{B})$	
$T_{МЖ}, ^\circ C$ ($T_{внеш} + \eta_{\gamma,B,T_{МЖ}}v_r^2/(2\lambda)$)	$\eta_{\gamma,B,T_{МЖ}} = 3\eta_{\gamma,B,T_{МЖ}=20}e^{-0,05T_{МЖ}},$ $\tau_{0,B,T_{МЖ}} = 3\tau_{0,B,T_{МЖ}=20}e^{-0,05T_{МЖ}}$	
Трехпараметрные соотношения $\eta, \tau_0 = f(\gamma, B, T_{МЖ})$		
γ, c^{-1}	$0 < \gamma < 1000$	$\eta_{\gamma,B,T_{МЖ}} = 18\eta_{\gamma=1000,B=0,T_{МЖ}=20}(1 + 2,65\sqrt{B})\gamma^{-0,25}e^{-0,05[T_{внеш} + \eta_{\gamma,B,T_{МЖ}}v_r^2/(2\lambda)]}$ (1)
	$1000 < \gamma < 10000$	$6\eta_{\gamma=1000,B=0,T_{МЖ}=20}(1 + 2,65\sqrt{B})\gamma^{-0,1}e^{-0,05[T_{внеш} + \eta_{\gamma,B,T_{МЖ}}v_r^2/(2\lambda)]}$ (2)
	$\gamma > 10000$	$2,39\eta_{\gamma=1000,B=0,T_{МЖ}=20}(1 + 2,65\sqrt{B})e^{-0,05[T_{внеш} + \eta_{\gamma,B,T_{МЖ}}v_r^2/(2\lambda)]}$ (3)
	$\gamma = 0$	$\tau_{0,B,T_{МЖ}} = 3\tau_{0,B=0,T_{МЖ}=20}(1 + 2,65\sqrt{B})e^{-0,05T_{МЖ}}$ (4)

где $\eta_{\gamma=1000,B=0,T_{МЖ}=20}$ – вязкость МЖ при $\gamma = 1000 c^{-1}$, $B = 0$ Тл и $T_{МЖ} = 20 ^\circ C$; $\tau_{0,B=0,T_{МЖ}=20}$ – начальное напряжение сдвига МЖ при $B = 0$ Тл и $T_{МЖ} = 20 ^\circ C$.

Для определения $\eta_{\gamma,B,T_{МЖ}}$ в соотношениях требуется решение экспоненциальных

уравнений, в которых $\eta_{\gamma,B,T_{МЖ}}$ входит и в левые и в правые части уравнений. Решение уравнений позволяет учесть взаимную связь изменений $\eta_{\gamma,B,T_{МЖ}}$ с изменениями $T_{МЖ}$, B и γ .

Момент страгивания с учетом [1] можно определить как

$$M_{стр.B,T_{МЖ}} = \beta Szr[3\tau_{0,B=0,T_{МЖ}=20}(1 + 2,65\sqrt{B})e^{-0,05T_{МЖ}} + kM_s^2], \quad (5)$$

где β – коэффициент структурирования МЖ; S – площадь контакта МЖ с валом под одним зубцом полюса, для острия зубца шириной b можно ориентировочно принять $S = 2\pi r 2b$; Z – число зубцов на полюсах; k – коэффициент,

определяемый дисперсионной средой и поверхностно-активным веществом и зависящий от формы частиц.

Момент трения МЖУ определяется как

$$M_{тр.v,B,T_{МЖ}} = M_{струк.v,B,T_{МЖ}} + M_{\eta.v,B,T_{МЖ}}, \quad (6)$$

где $M_{струк.v,B,T_{внеш}}$ – составляющая, необходимая для разрушения структуры магнитных частиц в МЖ при v ; $M_{\eta.v,B,T_{МЖ}}$ – составляющая, обусловленная вязким трением слоев МЖ.

При $v = 0$ – $M_{струк.v=0} = M_{стр.}$ При $v > 0$ – $M_{струк.v} < M_{стр.}$ из-за процесса разрушения структуры частиц. При $B = 0,6...0,7$ Тл и $v_{разр} > 0,1$ м/с [1] (для вала с $r = 0,0325$ м $n_{разр} > 60v_{разр}/(2\pi r) = 29,4$ об/мин) структура частиц разрушается полностью. При повышении B структурное взаимодействие частиц и

$\tau_{0,B,T_{внеш}}$ возрастает, разрушение структуры частиц происходит при большей $n_{разр}$.

В предположении экспоненциального закона разрушения структуры частиц с погрешностью до 5 % можно принять соотношение

$$M_{струк.v,B,T_{МЖ}} = M_{стр.B,T_{МЖ}}e^{-\frac{3n}{n_{разр}}}. \quad (7)$$

Составляющая $M_{\eta.v}$ с учетом конструктивных размеров МЖУ

$$M_{\eta.v,B,T_{МЖ}} = \frac{\eta_{\gamma,B,T_{МЖ}}ZrSv}{\delta} = \frac{2\pi\eta_{\gamma,B,T_{МЖ}}Zr^2Sn}{60\delta}. \quad (8)$$

Мощность потерь на вязкое трение в объеме V МЖ

$$P_{\text{тр.в,В,Тмж}} = p_{\text{тр.в,В,Тмж}} V, \quad (9)$$

где $p_{\text{тр.в,В,Тмж}} = \eta_{\gamma,В,Тмж} \gamma^2$ – удельная мощность вязкостных потерь в МЖ.

В этом алгоритме используются усредненные по объему МЖ значения τ_0 , γ , $V_{\text{ср}}$, $T_{\text{мж}}$ и η . Но в разных зонах МЖ эти значения будут разные. В каждой зоне свой δ и, соответственно, своя γ , в зонах B изменяется от $V_{\text{мин}}$ (обычно 0,2...0,3 Тл) до $V_{\text{макс}}$ (в районе углов кромок зубцов, обычно до 2 Тл). Корректный расчет показателей МЖУ при изменениях $T_{\text{внеш}}$, n и I ЭД с учетом нелинейных свойств МЖ, воздействия на нее неподвижного $\Phi_{\text{пм}}$ и вращающегося Φ_6 , торцевой зоны ЭД и зубцовой зоны МЖУ при воздействии Δp с заранее неизвестным положением МЖ требует решения нелинейной термомагнитогидродинамической задачи [4]. Целесообразно уточнять результаты аналитических расчетов результатами расчетов магнитного, гидродинамического и теплового полей для заданных n , I и $T_{\text{внеш}}$ ЭД.

Распределения физических полей в МЖУ находились на основе конечно-элементного моделирования в распространенных программных системах [5]. Расчет магнитного поля в МЖУ осуществлялся в двухмерной постановке для осесимметричного сечения МЖУ (рис. 1). Подшипниковый щит во взрывозащищенных ЭД для повышения прочности обычно выполняется стальным с хорошей магнитной проводимостью, что приводит к повышенному Φ_6 , по сравнению с Φ_6 в ЭД с немагнитным подшипниковым щитом, например, алюминиевым. Лобовые части обмоток статора и ротора разнесены в пространстве, их составляющие

Φ_6 проникают в МЖУ по разным путям. Изменение нагрузки ЭД I изменяет Φ_6 . Расчеты магнитных полей проводились в области, включающей МЖУ, торцевую зону ЭД, лобовые части обмоток статора и ротора (рис. 2).

Учет положения МЖ в зазоре целесообразен для корректного определения S и V , соответственно, $M_{\text{тр.в}}$ и $P_{\text{тр.в}}$. При определении положении МЖ возникает взаимосвязанная задача: положение МЖ в зазоре определяет, в том числе, распределение магнитного поля в МЖУ, но не зная распределения магнитного поля, невозможно определить положение МЖ при воздействии Δp . В практических задачах важно определять критическое положение МЖ. Нахождение положения МЖ может выполняться итерационным путем последовательных расчетов магнитного поля с изменением границ МЖ, например, на основе перестраиваемых конечно-элементных моделей, до тех пор, пока наблюдается расхождение между воздействующим и удерживаемым МЖУ перепадами давлений при найденном распределении магнитного поля.

Определение поля распределения скоростей течения слоев МЖ необходимо для корректного расчета γ , η_{γ} , $M_{\text{тр.в}}$, $P_{\text{тр.в}}$ и нагрева МЖУ. Конечно-элементное моделирование поля распределения скоростей стационарного ламинарного течения МЖ в зазоре МЖУ с учетом неравномерности зазора, наличия зубцовой зоны полюсов, нелинейностей магнитореологических характеристик выполнялось на основе решения гидродинамической задачи для критического положения МЖ.

Различие значений γ , B , η , $T_{\text{мж}}$ в разных зонах МЖ вызывает различие выделяемых потерь в этих зонах. При разделении объема МЖ на N элементов

$$P_{\text{тр.в,В,Тмж}} = \sum_L^N (\eta_{L\gamma,В,Тмж} \gamma_L^2 V_L) = 2\pi \sum_L^N (\eta_{L\gamma,В,Тмж} \gamma_L^2 S_L r_L), \quad (10)$$

где $V_L = 2\pi r_L S_L$ – объем элемента L ; S_L – поперечная площадь элемента, r_L – радиус центра элемента от оси вала.

$P_{\text{тр.в,В,Тмж}}$ покрывается механической мощностью вращающегося вала и электромагнитной мощностью вращающегося Φ_6 , увлекающих за собой во вращения МЖ. Через механическую мощность вала момент трения МЖУ можно определить энергетическим методом [6]

$$M_{\text{тр.в,В,Т}} = 9,55 \frac{P_{\text{тр.в,В,Тмж}}}{n}. \quad (11)$$

По найденным потерям решалась задача расчета распределения теплового поля в МЖУ с учетом теплоотвода по валу и корпусу. Следует отметить, что $M_{\text{стр}}$, $M_{\text{тр.в}}$ и $P_{\text{тр.в}}$ являются интегральными параметрами МЖУ, каждый из них оценивается одним числом. $T_{\text{мж}}$ различается по зонам МЖ, оценивать работоспособность МЖУ следует по найденному $T_{\text{МЖ.макс}}$.

Результаты

В асинхронном взрывозащищенном ЭД ВРАБ225 [7] мощностью 37 кВт с $n_c = 1500$ об/мин (при частоте напряжения 50 Гц) возможно применение МЖУ с $r = 0,0325$ м, $Z = 6$, $\delta = 0,25 \cdot 10^{-3}$ м, $b = 0,4 \cdot 10^{-3}$ м. Определены изменения $M_{стр}$, $M_{тр.в}$, $P_{тр.в}$ и $T_{мж}$ при использовании МЖ МКС 350-30 с

$$M_s = 28 \text{ кА/м}, \tau_{0_{B=0, T_{мж}=20}} = 40 \text{ Па},$$

$$\eta_{\gamma=1000, B=0, T_{мж}=20} = 1,6 \text{ Па}\cdot\text{с}, \lambda = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C}),$$

$$\beta = 5, k = 0,15, n_{разр} = 30 \text{ об/мин при разных } B, n \text{ и } T_{внеш}. \text{ Промежуточные переменные составляют } \gamma = \frac{2\pi r n}{60\delta} = 13,6n \text{ с}^{-1} \text{ и}$$

$$v_r = 2\pi r n / 60 = 0,0034n \text{ м/с}.$$

Подстановка данных в соотношения (1), (2), (3) позволяет определить вязкость МЖ В МЖУ (табл. 2).

2. Соотношения для определения η

2. Relations for determining η

Параметр	Частные соотношения для определения $\eta_{\gamma, B, T_{мж}}$, Па·с; $\tau_{0_{B, T_{мж}}}$, Па	
$\gamma, \text{с}^{-1}$	$0 < \gamma < 1000$	$\eta_{\gamma, B, T_{мж}} = 14,98(1 + 2,65\sqrt{B})n^{-0,25}e^{(-0,05T_{внеш} - 1,445 \cdot 10^{-6}n^2)\eta_{\gamma, B, T_{мж}}}$
	$1000 < \gamma < 10000$	$\eta_{\gamma, B, T_{мж}} = 4,99(1 + 2,65\sqrt{B})n^{-0,1}e^{(-0,05T_{внеш} - 1,445 \cdot 10^{-6}n^2)\eta_{\gamma, B, T_{мж}}}$
	$\gamma > 10000$	$\eta_{\gamma, B, T_{мж}} = 3,824(1 + 2,65\sqrt{B})e^{(-0,05T_{внеш} - 1,445 \cdot 10^{-6}n^2)\eta_{\gamma, B, T_{мж}}}$

Решение экспоненциальных уравнений относительно $\eta_{\gamma, B, T_{мж}}$ при заданных B, n и $T_{внеш}$ выполнялось численно [8].

Параметры для данного МЖУ принимают вид:

$$T_{мж} = T_{внеш} + 2,89 \cdot 10^{-5} \eta_{\gamma, B, T_{мж}} n^2,$$

$$\tau_{0_{B, T_{мж}}} = 120(1 + 2,65\sqrt{B})e^{-0,05T_{мж}},$$

$$M_{тр.в, B, T_{мж}} = M_{стр, B, T_{мж}} e^{-3n/n_{разр}} + M_{\eta, v, B, T_{мж}} = 159 \cdot 10^{-6} (\tau_{0_{B, T_{мж}}} e^{-0,05T_{мж}} + 117,6) e^{-\frac{3n}{n_{разр}}} + 432,5 \cdot 10^{-6} n \eta_{\gamma, B, T_{мж}}, \quad (12)$$

$$P_{тр.в, B, T_{мж}} = 45,22 \cdot 10^{-6} n^2 \eta_{\gamma, B, T_{мж}}. \quad (13)$$

Определение энергетическим методом

$$M_{тр.в, B, T} = 431,9 \cdot 10^{-6} n \eta_{\gamma, B, T_{мж}}. \quad (14)$$

Результаты расчетов при изменениях $B_{ср}, n$ и $T_{внеш}$ представлены на рис. 4.

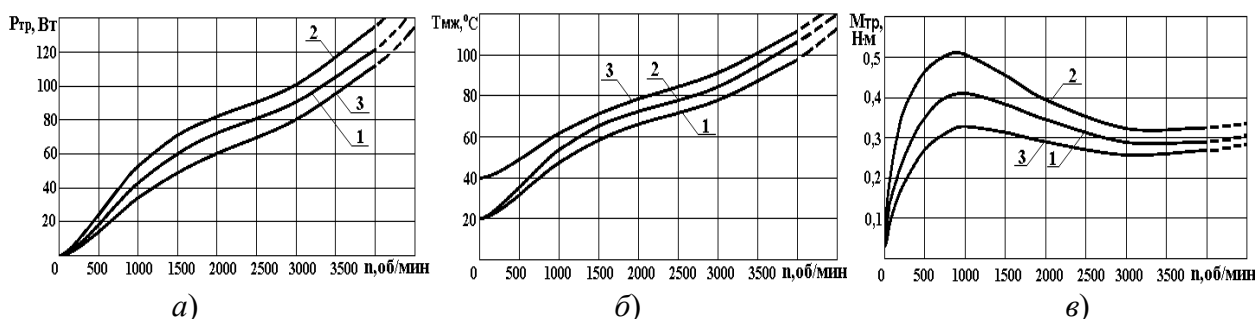


Рис. 4. Изменения $P_{тр}$ (а), $T_{мж}$ (б) и $M_{тр}$ (в) МЖУ с изменением n при:

1 – $B_{ср} = 0,5$ Тл, $T_{внеш} = 20$ °С; 2 – $B_{ср} = 1,69$ Тл, $T_{внеш} = 20$ °С; 3 – $B_{ср} = 1,69$ Тл, $T_{внеш} = 40$ °С

Fig. 4. Changes in the $P_{тр}$ (a), $T_{мж}$ (b) and $M_{тр}$ (c) of the MFS with a change in n at:

1 – $B_{ср} = 0,5$ Tl, $T_{внеш} = 20$ °C; 2 – $B_{ср} = 1,69$ Tl, $T_{внеш} = 20$ °C; 3 – $B_{ср} = 1,69$ Tl, $T_{внеш} = 40$ °C

Выполнено конечно-элементное моделирование магнитного поля в ЭД с МЖУ при нагрузках ЭД (тока I) от режима холостого хода (ХХ) до режима короткого замыкания. Распределения линий магнитных потоков $\Phi_{\text{пм}}$ и Φ_6 представлены на рис. 1, б и 2, б.

Изменение модуля индукции $B_{\text{мод}}$ в зазоре по длине МЖГ на поверхности вала при $\Delta p = 0$ с учетом совместного действия Φ_6 на $\Phi_{\text{пм}}$ в режиме ХХ ЭД представлено на рис. 5.

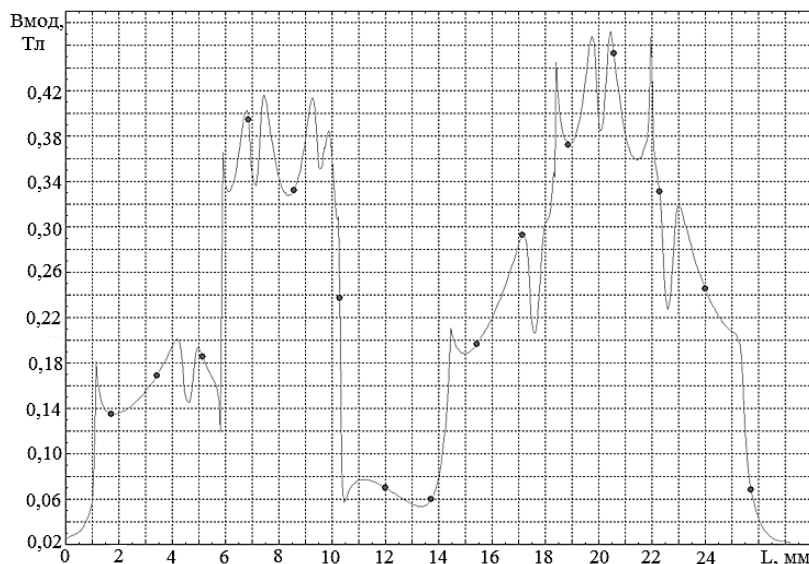


Рис. 5. Изменение $B_{\text{мод}}$ по длине МЖГ при $\Delta p = 0$ с учетом действия $\Phi_{\text{пм}}$ и Φ_6 в режиме ХХ ЭД

Fig. 5. Change in the $B_{\text{мод}}$ along the length of the MFG at $\Delta p = 0$, taking into account the action of $\Phi_{\text{пм}}$ and Φ_6 in the ХХ EM mode

Определено критическое положение МЖ (рис. 6, а) и распределение поля скоростей течения МЖ в виде линий равных скоростей (рис. 6, б). В результате гидродинамического расчета в каждом элементе L МЖ определялась

свои v_L и η_L в соответствии с магнито-реологической характеристикой при заданной из расчета магнитного поля индукции B_L .

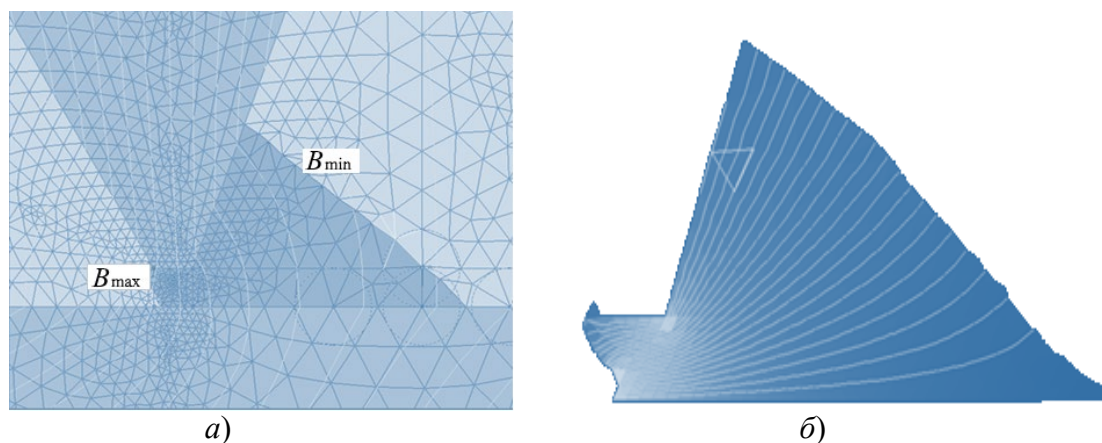


Рис. 6. Фрагмент конечно-элементной модели МЖУ с найденным критическим положением МЖ (а), линии равных скоростей течения МЖ (б)

Fig. 6. Fragment of the finite element model of the MFS with the found critical position of the MF (а), lines of equal flow velocities of the MF (б)

При решении тепловой задачи в области МЖ выделялись 5 зон с разными $p_{тр.v}, B, T_{мж}$ при разных η и γ для этих зон. Результат расчета температурного поля в МЖУ при $n = 4000$ об/мин для критического положения МЖ представлен на рис. 7.

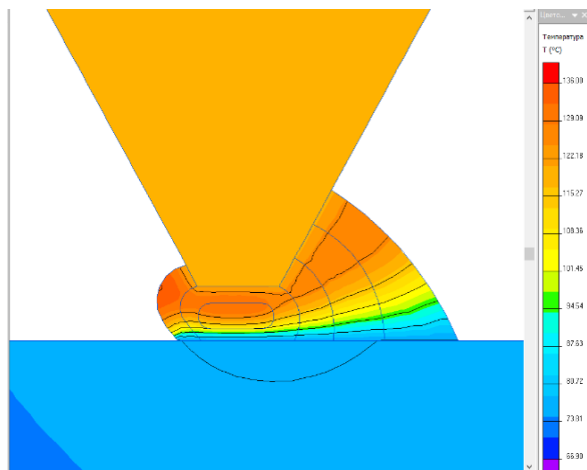


Рис. 7. Изотермы в области МЖ при $n = 4000$ об/мин

Fig. 7. Isotherms in the MF zone at $n = 4000$ rpm

Обсуждение.

Графики изменений $M_{тр.v}$, $P_{тр.v}$ и $T_{мж}$ (рис. 4) при изменениях $V_{ср}$, $T_{внеш}$ и n ЭД нелинейные, что обусловлено нелинейными изменениями η . Из анализа аналитических соотношений и рассчитанных характеристик следует, что $M_{струк.v}$ проявляется только при малых n , для МЖ с большим τ_0 имеется минимум $M_{тр.v}$ при $n < n_{разр}$. Результаты определения $P_{тр}$ по соотношениям (5) и (10) совпали с достаточной точностью, также совпали результаты определения $M_{тр}$ по соотношениям (9) и (11) при $n > n_{разр}$. С повышением n снижается η (рис. 3, б), рост $P_{тр.v}$, определяемый η^2 , отстает от квадратичного повышения n , а рост $M_{тр.v}$, определяемый ηn , отстает от линейного повышения n . При повышении n и диссипативном разогреве МЖ, без мер по ее термостабилизации, с ростом $P_{тр.v}$ возрастает $T_{мж}$, что приводит к дополнительному снижению η [9, 10] и, при повышении n выше некоторого значения, η может начать снижаться в большей степени, чем возрастает n . В этом случае с ростом n будут повышаться $P_{тр.v}$ и $T_{мж}$, но с интенсивностью меньшей линейного повышения n , а $M_{тр.v}$ даже прекратит рост, что подтверждается экспериментальными результатами [2, 11], или даже может начать снижаться. Для данного МЖУ в диапазоне изменения

$0 < n < 3000$ об/мин наибольший $M_{тр.v}$ возникает при $n \approx 900$ об/мин. Если в ЭД установлены два таких МЖУ на разных концах выходного вала, то их суммарный $2M_{тр.v}$ при s $V_{ср} = 1,69$ Тл и $T_{внеш} = 20$ °С достигает 1,1 нм. При $n_c = 1500$ об/мин суммарные $2P_{тр.v}$ достигают 140 Вт, что составляет ~ 35 % всех механических потерь во взрывозащищенном ЭД ВРАБ225, включая потери в подшипниках, потери в механических уплотнениях вала и вентиляционные потери, что влияет на энергоэффективность работы ЭД. При $n = 4000$ об/мин $2P_{тр}$ достигнет 270 Вт.

Для заданных n и V при повышении $T_{внеш}$ снижаются η , $M_{стр}$, $M_{тр}$ и $P_{тр}$, а $T_{мж}$ повышается, но с интенсивностью меньшей повышения $T_{внеш}$. $T_{мж}$ нелинейно повышается при увеличении n и V . Для $V_{ср} = 1,69$ Тл и $T_{внеш} = 40$ °С при $n = 4000$ об/мин усредненная $T_{мж}$ может достигнуть 112 °С. Неучет изменения η с изменением $T_{мж}$ приводит к завышенным расчетным перегревам МЖ. Расчеты показывают, что температурная работоспособность МЖУ может быть сохранена даже при большей в 2 раза n , чем определенная при η , не зависящей от $T_{мж}$. Даже при ламинарном течении МЖ в МЖ будет происходить некоторое перемешивание слоев МЖ, возникать определенный теплоперенос и некоторое выравнивание температур между слоями, снижение $T_{мж\max}$. При больших тепловыделениях целесообразно снабжать МЖУ системами охлаждения. Однако при термостабилизации МЖ η будет больше, чем при возрастающей $T_{мж}$ без термостабилизации, $M_{тр}$ и $P_{тр}$ также будут больше.

На основе анализа физических полей выявлено, что наличие шарикоподшипника вызывает магнитное шунтирование зазора МЖУ и снижает V в МЖ на 4,3 %. Всплески $V_{мод}$ (рис. 5) обусловлены зубчатостью полюсов. Действующая на МЖ V в зазоре определяется совокупным действием $\Phi_{пм}$ и $\Phi_б$. При этом $\Phi_{пм}$ не зависит от n , $T_{внеш}$ и нагрузки ЭД (тока I), но зависит от магнитных свойств магнита. Так замена ферритового магнита 28БА190 на высокоэрцетивный магнит КС37 повышает $\Phi_{пм}$, но при этом $P_{тр}$ и $M_{тр}$ увеличиваются на 40 %. Замена на высочергетический магнит NdFeB повышает $P_{тр}$ и $M_{тр}$ на 75 %. Вследствие снижения магнитных свойств магнита и M_s при нагреве V_{\max} может уменьшиться до 15 %, V_{\min} – до 30 %, снижается удерживаемый МЖУ Δp_{\max} с интенсивностью до $-0,35$ %/°С.

$\Phi_б$ зависит от нагрузки ЭД (тока I). Максимальный $\Phi_б$, проникающий в зону МЖУ, наблюдается в режиме ХХ ЭД. Если

подшипниковый щит ЭД выполнен из стали, а не из алюминия, то Φ_6 возрастает в 1,85 раза. В МЖУ с осевой намагниченностью магнита Φ_6 усиливает $\Phi_{\text{пм}}$ под одним полюсом и ослабляет под другим. Один полюс будет удерживать большую часть Δp , другой – меньшую. Различие B под разными полюсами достигает 14 %, что при нелинейной характеристике намагничивания магнитной системы приводит к результирующему размагничиванию МЖУ до 4,0 %. Поэтому для МЖУ наиболее напряженный режим будет при работе асинхронного ЭД в режиме ХХ, т.к. в этом режиме n_r и Φ_6 наибольшие, что приводит к повышенным $T_{\text{мж}}$, $M_{\text{тр}}$ и $P_{\text{тр}}$. С ростом нагрузки (I) ЭД Φ_6 и n_r снижаются.

Выявлено, что разброс γ по зонам МЖ достигает 5 раз – от $\gamma_{\text{макс}}$ в минимальном зазоре под зубцом до $\gamma_{\text{мин}}$ в межполюсном пространстве, разброс значений η по зонам достигает 5 раз, пренебрежение занимаемым положением и формой МЖ может приводить к погрешностям определения $M_{\text{тр}}$ и $P_{\text{тр}}$ до 5 %.

$P_{\text{тр}}$ неравномерно распределена по объему МЖ пробки. Наибольшая удельная мощность потерь и $T_{\text{мж}}$ возникают в МЖ в области минимального зазора под зубцом, здесь $T_{\text{мж.макс}}$ достигает 136 °С (рис. 7), что близко $T_{\text{мж.пред}}$, определяющей предел работоспособности МЖ. $T_{\text{мж.макс}}$ коррелирует с аналитически рассчитанной усредненной $T_{\text{мж}}$ (рис. 4, б).

Выводы

На работу магнитожидкостного уплотнения вала частотно-регулируемого электродвигателя кроме воздействующего перепада давлений и внешней температуры оказывают влияние конструктивные особенности и режим работы электродвигателя (нагрузка, частота питающего напряжения, скорость вращения ротора).

Магнитный поток торцевого рассеяния электродвигателя, определяемый токами обмоток, вращающийся с синхронной скоростью, проникает в магнитожидкостное уплотнение, перераспределяет магнитную индукцию в уплотнении, дополнительно к вращающемуся валу увлекает магнитную жидкость во вращение.

Разработанный алгоритм учета изменений вязкости магнитной жидкости с изменениями ее скоростей сдвига, магнитной индукции и внешней температуры на основе решения экспоненциальных уравнений позволяет корректно определять момент и потери трения

магнитожидкостного уплотнения вала, температуру магнитной жидкости.

Моделирование взаимосвязанных магнитных, гидродинамических и тепловых процессов в магнитожидкостном уплотнении вала с учетом воздействующего перепада давлений позволяет проводить уточненный анализ изменения момента и потерь трения в уплотнении при изменении режима работы частотно-регулируемого электродвигателя.

Наибольшее влияние на момент и потери трения магнитожидкостного уплотнения вала оказывает работа частотно-регулируемого электродвигателя в режиме холостого хода при повышенной частоте питающего напряжения в конструкции двигателя со стальными подшипниковыми щитами, что приводит к максимальному магнитному потоку торцевого рассеяния электродвигателя и повышенной скорости вращения вала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Орлов Д.В. Магнитные жидкости в машиностроении / под ред. Д.В. Орлова, В.В. Подгоркова. М.: Машиностроение, 1993. 275 с.
2. Берковский Б.М., Медведев В.Ф., Краков М.С. Магнитные жидкости. М.: Химия, 1989. 279 с.
3. Казаков Ю.Б., Морозов Н.А., Страдомский Ю.И., Перминов С.М. Герметизаторы на основе нанодисперсных магнитных жидкостей и их моделирование / Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. Иваново. 2010. 184 с.
4. Nesterov S.A., Stradomskii Yu.I., Belov V.S. Study of Interconnected Physical Processes in the Magnetic Fluid Staler // Problemele energeticii regionale. 2021. Vol. 3 (51). Pp. 1–9.
5. Тихонов А.И., Казаков Ю.Б. Программирование численного эксперимента с использованием конечно-элементной модели магнитного поля в объектах электромеханики. Иваново: ИГЭУ, 2008. 80 с.
6. Казаков Ю.Б., Полетаев В.А., Пахолкова Т.А. Определение момента трения магнитожидкостного герметизатора с неоднородным магнитным полем на основе численного моделирования движения магнитореологической жидкости // Вестник ИГЭУ. № 4. 2010. С. 51–55.
7. АО Ярославский электромашиностроительный завод. официальный сайт. URL: <https://www.eldin.ru> (Дата обращения: 20.09.2025).
8. Step-by-Step Calculator. официальный сайт. URL: <https://www.symbolab.com/solver> (Дата обращения: 20.09.2025).
9. Krakov M.S. Nikiforov I.V. Regarding the influence of heating and the soret effect on a magnetic fluid seal // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2017. Vol. 431. Pp. 255–261.
10. Chen Y., Li D., Zhang Y., Li Z., Zhou H. The Influence of the Temperature Rise on the Sealing Performance of the Rotating Magnetic Fluid Seal // IEEE Transactions on Magnetics. Vol. 56. no. 11. pp. 1–10.
11. Полетаев В.А., Власов А.М., Пахолкова Т.А. Установка для исследования эксплуатационных характеристик магнитожидкостных герметизаторов // Вестник УГАТУ. 2017. Т. 21. № 2 (76). С. 17–23.

REFERENCES

1. Orlov D.V. Magnetic fluids in mechanical engineering / edited by D.V. Orlov, V.V. Podgorkov. Moscow: Mashinostroenie, 1993. 275 p.
2. Berkovsky B.M., Medvedev V.F., Krakov M.S. Magnetic liquids. Moscow: Khimiya, 1989. 279 p.
3. Kazakov Yu.B., Morozov N.A., Stradomsky Yu.I., Perminov S.M. Sealers based on nanodispersed magnetic fluids and their modeling / Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin. Ivanovo. 2010, 184 p.
4. Nesterov S.A., Stradomskii Yu.I., Belov V.S. Study of Interconnected Physical Processes in the Magnetic Fluid Staler // Problemele energeticii regionale. 2021. Vol. 3 (51). Pp. 1–9.
5. Tikhonov A.I., Kazakov Yu.B. Programming a numerical experiment using a finite element model of a magnetic field in electromechanical objects. Ivanovo: IGEU, 2008. 80 p.
6. Kazakov Yu.B., Poletaev V.A., Pakholkova T.A. Defining friction moment of a magnetic liquid sealer with dissimilar magnetic field on basis of numerical modeling of magnetorheological fluid motion // IGEU Bulletin. no. 4. 2010. pp. 51–55.
7. JSC Yaroslavl Electromachinery Plant. official website. URL: <https://www.eldin.ru> (Date of access: 09/20/2025).
8. Step-by-Step Calculator. official website. URL: Пе-жим доступа: <https://www.symbolab.com/solver> (Дата обращения: 20.09.2025).
9. Krakov M.S. Nikiforov I.V. Regarding the influence of heating and the soret effect on a magnetic fluid seal // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2017. Vol. 431. Pp. 255–261.
10. Chen Y., Li D., Zhang Y., Li Z., Zhou H. The Influence of the Temperature Rise on the Sealing Performance of the Rotating Magnetic Fluid Seal // IEEE Transactions on Magnetics. Vol. 56. no. 11. pp. 1–10.
11. Poletaev V.A., Vlasov A.M., Pakholkova T.A. Setup for studying the operational characteristics of the magnetic liquid dock // Bulletin of UGATU. 2017. Vol. 21. No. 2 (76). pp. 17–23

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 13.01.2026; одобрена после рецензирования 22.03.2026; принята к публикации 10.04.2026.

The article was submitted 13.01.2026; approved after reviewing 22.03.2026; assepted for publication 10.04.2026.

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: naukatm@yandex.ru, editntm@yandex.ru

Верстка Н.А. Лукашов. Редактор А.Ю. Кленичева. Технический редактор Н.А. Лукашов.

Сдано в набор 17.05.2026. Выход в свет 29.05.2026.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Брянский государственный технический университет» 241035,
Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

