

РЕГУЛИРУЕМАЯ ПО УДЕРЖИВАЕМОМУ ПЕРЕПАДУ ДАВЛЕНИЙ, ПОТЕРИЯМ ТРЕНИЯ, ЧАСТОТЕ ВРАЩЕНИЯ И ТЕПЛОВОМУ РЕЖИМУ МАГНИТОЖИДКОСТНАЯ ГЕРМЕТИЗАЦИЯ ВАЛА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

А.М. ВЛАСОВ, канд. техн. наук, Ю.Б. КАЗАКОВ, д-р техн. наук

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,
153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34, e-mail: leshka.vlasov@gmail.com

© Власов А.М., Казаков Ю.Б., 2026

На эффективность магнитожидкостной герметизации вала влияют перепад давлений и внешняя температура, условия и режим работы электродвигателя (пуск, торможение, останов, реверс, частота вращения и электрическая нагрузка). Электромагнитные процессы в электродвигателе посредством воздействия врачающегося магнитного потока рассеяния обмоток влияют на скорость течения магнитной жидкости, момент и потери трения в магнитожидкостном герметизаторе. Целесообразно регулирование свойств магнитожидкостной герметизации вала по условиям работы электродвигателя. Предложенная конструкция регулируемого магнитожидкостного герметизатора и разработанный алгоритм его регулирования позволяют осуществлять адаптацию магнитожидкостной герметизации вала к изменениям условий работы электродвигателя. Экспериментально подтверждена возможность изменения максимального удерживаемого перепада давлений в регулируемом магнитожидкостном герметизаторе.

Ключевые слова: магнитожидкостная герметизация вала, электродвигатель, регулирование, перепад давлений, потери трения, тепловой режим, частота вращения.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность герметизации вала электродвигателя (ЭД) зависит от условий и режима его работы. Специальные ЭД (например взрывозащищенные, предназначенные для работы в опасных условиях) могут работать в режимах с пусками и торможениями, реверсами, с изменениями перепада давлений $\Delta p_{\text{внеш}}$, частоты вращения n , электрических нагрузок (ток $I_{\text{ЭД}}$), внешних температур $T_{\text{внеш}}$. Вероятность нарушения герметизации ЭД с механическими уплотнениями возрастает при изменении n , в повторно-кратковременном режиме работы по сравнению с продолжительным режимом [1, 2]. Необходимость обеспечения эффективности уплотнения вала в разных режимах работы ЭД требует подстройки системы герметизации, возможности регулирования свойств герметизаторов. В механических уплотнениях невозможно обеспечить оперативное регулирование свойств герметизации с изменением условий работы.

Высокими уплотнительными свойствами обладают магнитожидкостные герметизаторы (МЖГ), в которых уплотнение зазора между полюсом с Z зубцами и валом обеспечивается магнитной жидкостью (МЖ), смачивающей их поверхности и удерживаемой в зазоре магнитными силами магнитного потока постоянного магнита (ПМ) [3]. Воздействующий на МЖ $\Delta p_{\text{внеш}}$ стремится выдавить ее из зазора, вследствие чего положение, форма и площадь S магнитожидкостной пробки, соприкасающейся с

валом, в магнитном поле ПМ изменяются. Это вызывает в МЖ магнитное усилие, направленное на ее возврат исходное положение. При $\Delta p_{\text{внеш,} \max}$ МЖ принимает критическое положение. При $\Delta p_{\text{внеш}} > \Delta p_{\text{внеш,} \max}$ возникает пробой МЖГ и нарушение герметизации.

Чаще всего МЖГ устанавливаются перед подшипниковым узлом. По сравнению с механическими уплотнениями герметизация подшипника с помощью МЖГ обеспечивает увеличение безаварийного срока эксплуатации ЭД до 50 %, позволяет в несколько раз снизить вероятность нарушения герметичности ЭД [1, 2]. Потери на жидкостное трение в МЖГ до двух раз меньше потерь на трение в сальниковых уплотнениях.

Выпускаемые МЖГ с ПМ рассчитаны на работу в номинальных установившихся режимах. При изменении n и, соответственно, окружных скоростей вала $v_{\text{вала}}$ и МЖ $v_{\text{мж}}$ изменяется центробежная сила, стремящаяся оторвать МЖ от вращающегося вала, ослабляется ее поверхностное сцепление с валом. Увеличение $v_{\text{мж}}$ снижает критический (максимальный) удерживаемый зубцом МЖГ $\Delta p_{v_{\text{кр}}}$ [4]:

$$\Delta p_{v_{\text{кр}}} = \Delta p_{\text{ст,} \text{кр}} - \rho_{\text{мж}} \delta v_{\text{мж}}^2 / (2R), \quad (1)$$

где $\Delta p_{\text{ст,} \text{кр}} = \mu_0 \int_{H_{\min}}^{H_{\max}} M dH$ – критический удерживаемый перепад давлений в статическом режиме при $n = 0$; H_{\min} , H_{\max} – минимальные и максимальные магнитные напряженности магнитного поля в МЖ; M – намагниченность МЖ, являющаяся функцией H ; $\rho_{\text{мж}}$ – плотность МЖ; δ – зазор между вращающимся валом радиусом R и неподвижным полюсом радиусом r .

Экспериментальными исследованиями [4] установлено, что при $\Delta p_{\text{внеш}} = 0$ критическая линейная скорость $v_{\text{мж,} \text{кр}}$, при которой МЖ еще сцеплена с валом и удерживается на нем, составляет не более 80 м/с. С ростом $\Delta p_{\text{внеш}}$ $v_{\text{мж,} \text{кр}}$ снижается. Для уравновешивания центробежной силы и удержания МЖ в зазоре необходимо повышать действующую на нее магнитную силу (например, повышая H). Во всех режимах работы ЭД должно обеспечиваться выполнение условия $\Delta p_{v_{\text{кр}}} > \Delta p_{\text{внеш}}$. При возрастании $\Delta p_{\text{внеш}}$ для заданной $v_{\text{мж}}$ или при возрастании n для заданного $\Delta p_{\text{внеш}}$ это условие может нарушиться. Увеличением магнитного потока можно повысить $\Delta p_{\text{ст,} \text{кр}}$. В МЖГ с ПМ и неизменным магнитным потоком $\Phi_{\text{пм}}$ это невозможно. Целесообразна разработка регулируемой магнитожидкостной герметизации вала ЭД с управлением по удерживаемому перепаду давлений, потерям трения, частоте вращения и тепловому режиму.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Регулирование уплотнительных свойств МЖГ эффективно при использовании дополнительных подмагничивающих обмоток [5] (рис. 1). Для управления удерживаемым МЖГ $\Delta p_{\text{внеш}}$ в добавление к ПМ с магнитным потоком $\Phi_{\text{пм}} = \Phi_1$ возможно применить «обмотку (р)» (число витков W_p , ток I_p), создающую магнитный поток $\Phi_p = \Phi_2$, и «обмотку (н)» (W_n , I_n), создающую магнитный поток $\Phi_n = \Phi_3$.

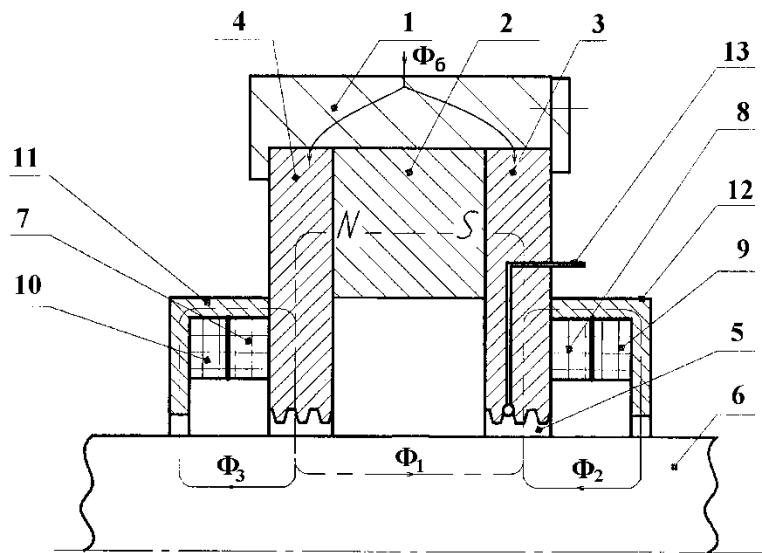


Рис. 1. Регулируемый МЖГ: 1 – корпус; 2 – кольцевой ПМ; 3, 4 – магнитопроводящие зубчатые полюсные наконечники; 5 – уплотняемые зазоры с МЖ; 6 – вал; 7–10 – кольцевые регулирующие обмотки; 11, 12 – магнитопроводы обмоток; 13 – датчик температуры МЖ

В состоянии покоя МЖГ ($n = 0$) в течение продолжительного времени (например, при хранении на складе) при значительном Φ_{pm} в неподвижной МЖ происходит перераспределение магнитных частиц в область с H_{max} , а немагнитной жидкости-носителя в область с H_{min} [6]. Возникающее расслоение МЖ приводит к утрате МЖГ герметизирующих свойств. Для снижения расслоения МЖ и удержания ее в зазоре без вытекания при останове в обесточенных вместе с ЭД обмотках регулирования целесообразно иметь в МЖГ лишь небольшой ПМ с минимальным Φ_{pm} . Поэтому объем ПМ в регулируемом МЖГ может быть существенно снижен по сравнению с традиционным МЖГ.

Структурная схема работы регулируемой магнитожидкостной герметизации вала, адаптируемая к изменяемым условиям и режиму работы ЭД, представлена на рис. 2.

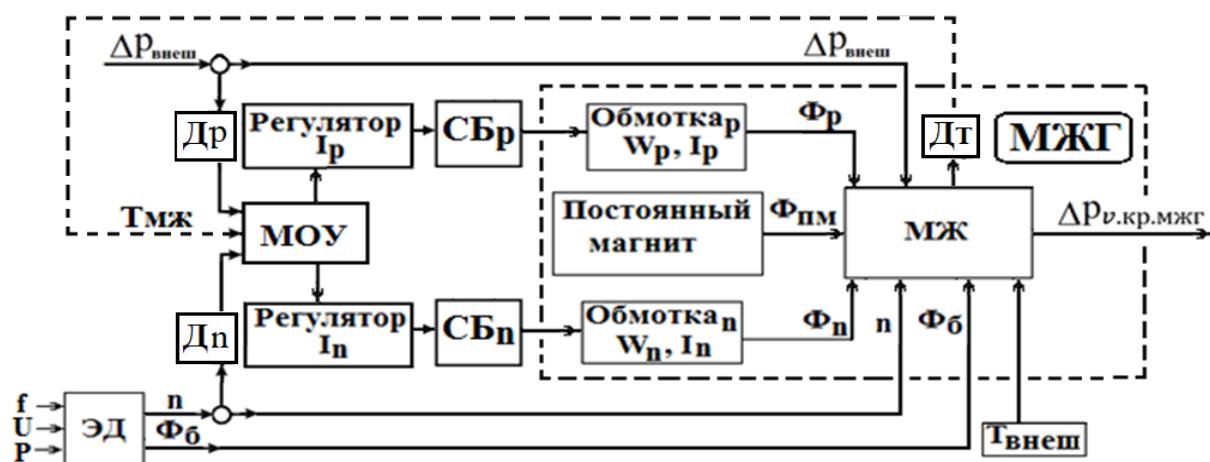


Рис. 2. Структурная схема работы системы управляемой герметизации

Система содержит:

датчик температуры МЖ $T_{MЖ} D_t$,

датчик D_p ,

регулятор I_p ,

датчик D_n ,

регулятор I_n ,

блоки усиления сигналов силового блока,

МЖГ с МЖ,

«обмотку (р)» с током I_p и потоком Φ_p ,

«обмотку (н)» с током I_n и потоком Φ_n ,

ПМ с потоком Φ_{PM} .

Электродвигатель работает с возможным изменением мощности P , напряжения U и частоты сети f , определяющими n и $I_{ЭД}$. При нагрузке в торцевой зоне ЭД лобовыми частями обмоток статора и ротора $I_{ЭД}$ создает магнитный поток рассеяния Φ_b . В системе задается ограничение на максимально допустимую температуру МЖ $T_{MЖmax}$, при достижении которой датчик температуры выдает сигнал на прекращение работы. При $T_{MЖ} < T_{MЖmax}$ разрешается регулирование I_p и I_n . При $T_{MЖ} > T_{MЖmax}$, или при $\Delta p_{внеш,max} > \Delta p_{внеш}$, или при $\nu_{MЖ} > \nu_{MЖкр}$, задаваемых в качестве ограничений, система выдает сигнал на отключение ЭД, так как МЖГ не способен обеспечить требуемую герметизацию. Датчики D_p , D_n и D_t вырабатывают сигналы о величинах $\Delta p_{внеш}$, n и $T_{MЖ}$. Сигналы передаются в модель объекта управления (МОУ), где по величинам сигналов на основе заложенных функциональных зависимостей формируются управляющие воздействия на регуляторы I_p и I_n . После усилителей СБ токи I_p и I_n подаются в «обмотку (р)» и «обмотку (н)», что вызывает изменение регулирующих магнитных потоков Φ_p и Φ_n .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Электромагнитные процессы в ЭД влияют на результирующий магнитный поток в МЖГ. Изменения P , U и f влияют на $I_{ЭД}$ и величину торцевого магнитного потока рассеяния Φ_b . Последний, замыкаясь через магнитопроводящий подшипниковый щит (в специальных ЭД для повышения прочности корпуса подшипниковые щиты часто выполняют стальными), МЖГ, вал и проникая в зазор дополнительно к Φ_{PM} , Φ_p и Φ_n , воздействует на МЖ. При максимальном $I_{ЭД}$ (в режиме пуска) влияние Φ_b на работу МЖГ будет наибольшим. В торцевой зоне ЭД Φ_b , проникающий в МЖГ, вращается с частотой $n_{маг.поля}$, определяемой частотой сети f .

В асинхронном ЭД вал вращается с частотой $n_{вал} < n_{маг.поля}$. Вследствие вязкости МЖ увлекается валом во вращение с частотой вращения слоев МЖ $n_{MЖr} = n_{вал}$ у поверхности вала и с $n_{MЖr} = 0$ у поверхности неподвижных полюсов. При $\Phi_b = 0$ профиль изменения $n_{MЖ}$ в зазоре линейный от 0 до $n_{вал}$. При $\Phi_b > 0$ МЖ, обладающая магнитными свойствами, реагирует на вращение Φ_b с $n_{маг.поля} > n_{вал}$ и дополнительно увлекается во вращение. Профили изменения $n_{MЖ}$ в зазоре в номинальном и пусковом режимах ЭД при разных Φ_b представлены на рис. 3.

Под влиянием Φ_b профиль $n_{MЖ}$ становится нелинейным, и при значительном Φ_b некоторые слои МЖ в зазоре могут даже вращаться с частотой $n_{MЖ} > n_{вал}$ и подтягивать за собой ротор, передавая на него часть электромагнитной энергии статора. В момент пуска при $n_{вал} = 0$ для слоев МЖ у вала и полюсов $n_{MЖ,R} = n_{MЖ,r} = 0$, но в середине зазора

МЖ, увлекаемая вращающимся $\Phi_{б,max}$, может иметь $n_{мж} > 0$ (рис. 3б). Реологическая характеристика псевдопластичной МЖ $\eta = f(\gamma)$ [7] из-за наличия начального напряжения сдвига слоев МЖ τ_0 при $\gamma = 0$ ($\eta \rightarrow \infty$ из-за структурирования ферромагнитных частиц в МЖ при $n_{мж} = 0$) и при $\gamma \rightarrow \infty$ с $\eta \rightarrow \eta_{min}$, где $\gamma = v_{мж} / \delta$ – скорость сдвига слоев МЖ, может вызывать уплощение профиля $n_{мж}$.

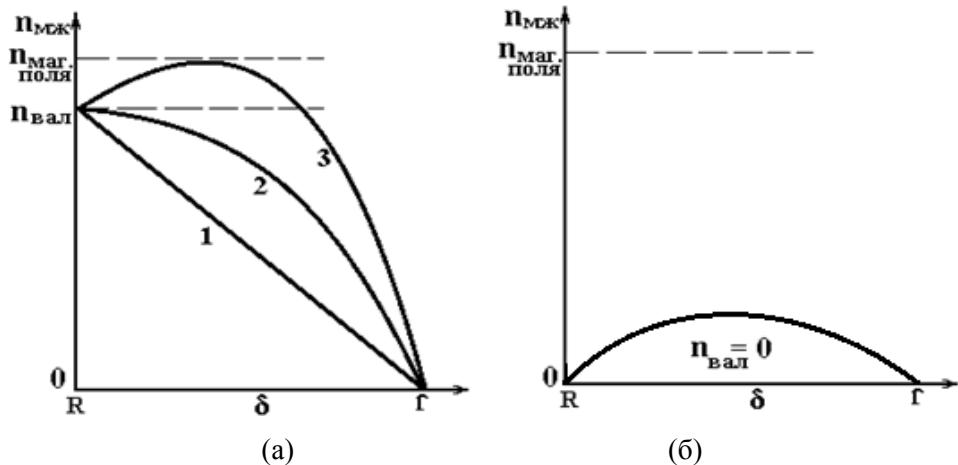


Рис. 3. Изменение скорости вращения МЖ по радиусу зазора:

номинальная нагрузка ЭД (а); режим пуска (б):

влияние ЭД на МЖГ отсутствует (1); небольшое (2); максимальное (3)

Так как МЖ дополнительно увлекается во вращение магнитными силами вращающегося с $n_{маг. поля} \Phi_b$, то часть энергии $\Delta P_{MЖэм}$ от всей энергии $\Delta P_{MЖ}$, требуемой на вращение МЖ, поступает от электромагнитной энергии $P_{эм.ст}$ со стороны статора ЭД и от электромагнитной энергии $P_{эм.рот}$ со стороны ротора ЭД. Другую часть энергии $\Delta P_{MЖмех.вал}$ от всей энергии на вращение $\Delta P_{MЖэм}$ МЖ получает через вязкостные свойства от энергии $P_{2мех}$ вращающегося с $n_{вал}$ вала (рис. 4). При этом в зависимости от режима работы ЭД энергия $\Delta P_{MЖмех.вал}$ может быть направлена как на дополнительное ускорение вращающегося ротора, так и на его торможение. В зависимости от величины Φ_b соотношения частей энергий $\Delta P_{мж.эм}$ и $\Delta P_{MЖмех.вал}$ полной энергии $\Delta P_{MЖ}$ будут меняться.

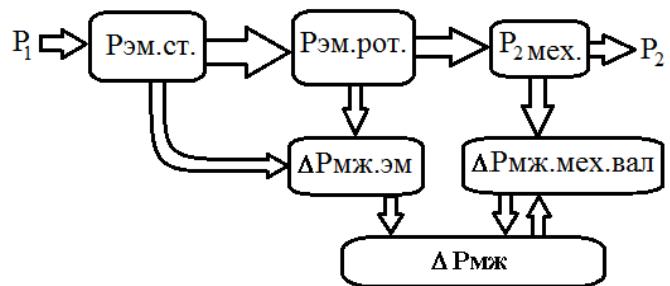


Рис. 4. Энергетическая диаграмма ЭД с МЖГ

Мощность диссипационных потерь в МЖ от вязкого трения перемещающихся слоев МЖ покрывается потребляемой от ЭД мощностью $\Delta P_{\text{МЖ}}$ и зависит от объема МЖ $V_{\text{МЖ}}$, η и γ :

$$\Delta P_{\text{МЖ}} = \gamma^2 \eta V_{\text{МЖ}}. \quad (2)$$

Повышение η и γ увеличивает потери на вязкостное трение движущихся слоев МЖ. Эти потери определяет момент трения МЖГ:

$$M_{\text{тр}} = \frac{30 \Delta P_{\text{МЖ}}}{(\pi n)}.$$

С другой стороны, через параметры и конструкцию МЖГ:

$$M_{\text{тр}} = \frac{\eta R Z S \nu}{\delta}. \quad (3)$$

У псевдопластичной МЖ η нелинейно зависит от B и γ . Взаимозависимость вязкостных и магнитных свойств МЖ может описываться как [8]:

$$\eta_{B,\gamma} = \eta_{B,\gamma_{\max}} + (\eta_{B,\gamma_{\min}} - \eta_{B,\gamma_{\max}})[1 + (C_B \gamma)^2]^l, \quad (4)$$

где $\eta_{B,\gamma_{\max}}$ – наименьшая вязкость МЖ при индукции B и при максимально γ ; $\eta_{B,\gamma_{\min}}$ – наибольшая вязкость МЖ при индукции B и при наименьшей γ ; C_B – коэффициент, зависящий от значения B ; l – показатель степени.

Увеличение n и снижение δ повышают γ , что увеличивает $M_{\text{тр}}$, повышение η также увеличивает $M_{\text{тр}}$. При изменении n пропорционально изменяется γ и квадратично изменяются выделяемые в МЖ вязкостные потери, которые, разогревая МЖ, ограничивают применимость МЖГ [9, 10], так как при предельной температуре МЖ $T_{\text{МЖ}_{\max}} < (130 \dots 150)$ °С происходит ее вскипание и потеря герметизирующих свойств МЖГ. Оценочное значение $T_{\text{МЖ}}$ относительно $T_{\text{внеш}}$ при теплопроводности МЖ λ :

$$T_{\text{МЖ}} = T_{\text{внеш}} + \eta \nu_{\text{МЖ}}^2 / (2\lambda). \quad (5)$$

С ростом $T_{\text{МЖ}}$ экспоненциально снижается η [7]. Изменение B вызывает изменение нелинейных магнитозависимых реологических, вязкостных и теплофизических свойств МЖ [6]. Характеристика намагничивания МЖ нелинейная, с зоной насыщения. Повышение магнитной индукции B , действующей на МЖ, увеличивает τ_0 и η , а также потери на трение в МЖ. В общем случае $\Delta P_{\text{МЖ}} M_{\text{тр}} = f(Z, \eta, \gamma, B, T_{\text{МЖ}})$. Таким образом, сложность определения свойств МЖ обусловлена взаимными зависимостями свойств МЖ. Например, в зазоре под зубцом в МЖ γ наибольшая, при которой η должна быть минимальной, но наибольшая B , при которой η должна быть максимальной. Температура МЖ снижает η , усложняется профиль $\eta_{\text{МЖ}}$. Поэтому для корректного анализа уплотнительных свойств МЖГ в ЭД с учетом сложных нелинейных взаимных зависимостей

$\eta = f(\gamma, B, T)$, взаимодействия вращающего Φ_b с неподвижным Φ_{nm} , конструкции торцевой зоны ЭД с пространственным расположением лобовых частей обмоток статора и ротора требуется сложное трехмерное моделирование с решением нелинейных магнитной, теплофизической и магнитогидродинамической задач.

На основе полученных соотношений могут быть сформулированы ограничения на v_{MJKp} по заданным $\Delta p_{\text{внеш}}$ и/или T_{MJKmax} .

По заданному $\Delta p_{\text{внеш}}$:

$$v'_{MJKp} \leq \sqrt{D[M_S(B_{max} - B_{min}) - \Delta p_{\text{внеш}}/Z] / (\rho_{MJK}\delta)}, \quad (6)$$

по заданному T_{MJKmax} :

$$v''_{MJKp} \leq \sqrt{2(T_{MJKmax} - T_{\text{внеш}})\lambda / \eta}. \quad (7)$$

Из вычисленных значений v'_{MJKp} и v''_{MJKp} выбирается меньшее v_{MJKp} , сравнивается n с $n_{kp} = 60v_{MJKp} / (\pi D)$ и выбирается канал регулирования I_p или I_n .

Принимается, что если $\Delta p_{\text{внеш}} \leq \Delta p_{max}$, $T_{MJK} \leq T_{MJKmax}$ и $n \leq n_{MJKp}$, то регулирование МЖГ возможно. Тогда с учетом запаса коэффициента $K_3 = 1,5 \dots 3$ ток в регулирующей «обмотке (p)»

$$I_p = \frac{1,59\delta 10^6}{MW_p} \left[K_3 \Delta p_{\text{внеш}} / Z + \rho_{MJK} \left(\frac{\pi D n}{60} \right)^2 \delta / D \right], \quad (8)$$

а ток в регулирующей «обмотке(n)»

$$I_n = \frac{1,59\delta 10^6}{W_n} \left[\frac{8\lambda(T_{MJKmax} - T_{MJK}) - \left(\frac{\pi D n}{60} \right)^2 \eta_{B=0}}{2,65} \right]^2. \quad (9)$$

На основе полученных соотношений разработана блок-схема управлением токами в регулирующих обмотках МЖГ в зависимости от сигналов D_p , D_n , D_t (рис. 5).

Разработанная в системе LabVIEW имитационная модель исследования работы системы регулирования по сигналам датчиков n , $\Delta p_{\text{внеш}}$, $T_{\text{внеш}}$ при заданных ограничениях на n_{max} , $\Delta p_{\text{внеш},max}$ и T_{MJKmax} с шагами регулирования токов ΔI_p и ΔI_n в обмотках представлена на рис. 6.

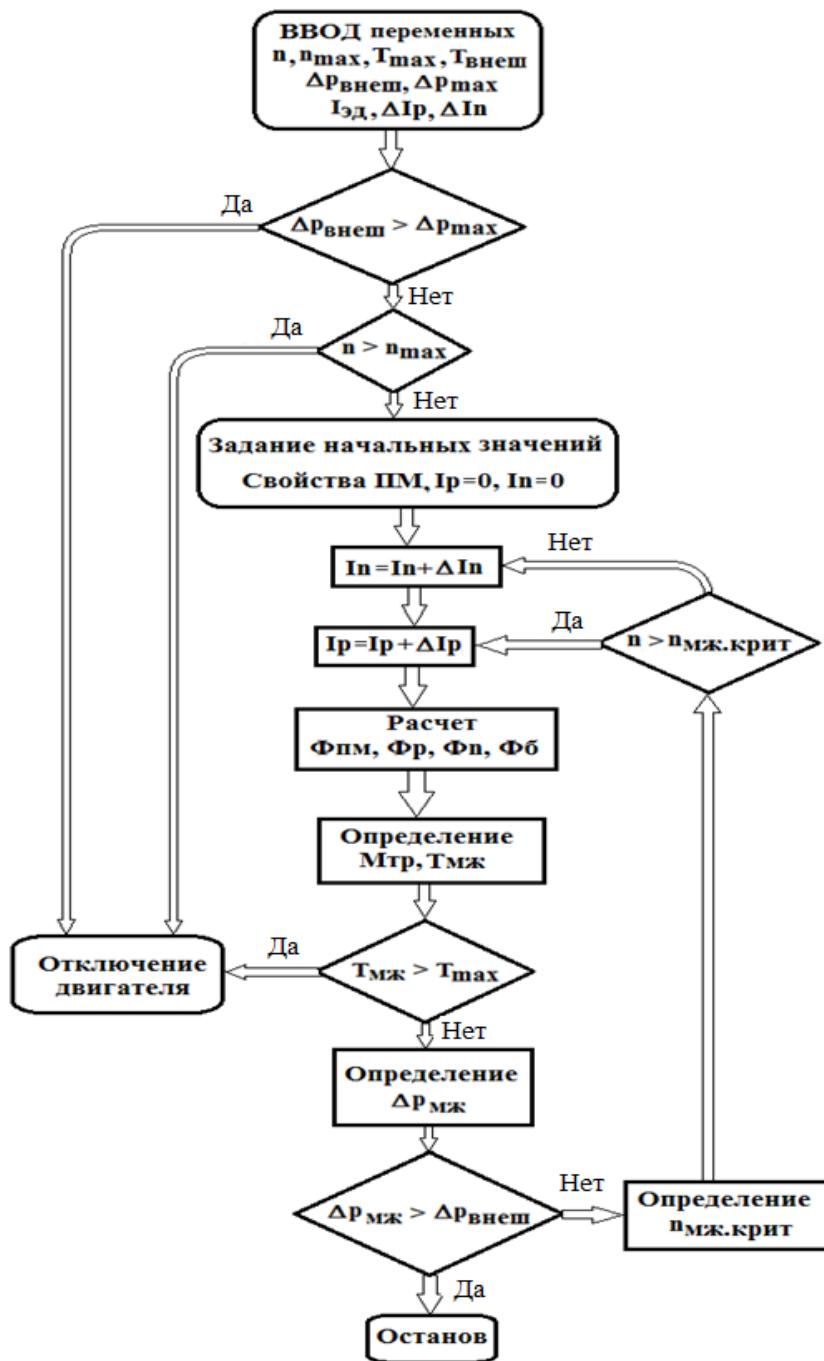


Рис. 5. Блок-схема управлением МЖГ

Влияние регулирующей токовой обмотки на свойства МЖГ экспериментально оценено на опытном образце [11] (рис. 7), содержащем ферритовый ПМ (коэрцитивная сила по индукции $H_{CB} = 185$ кА/м, остаточная индукция $B_r = 0,3$ Тл) и обмотку управления с $W = 200$ витками и током управления I_y . В экспериментах измерялся $\Delta P_{внр}$ при изменении n и I_y .

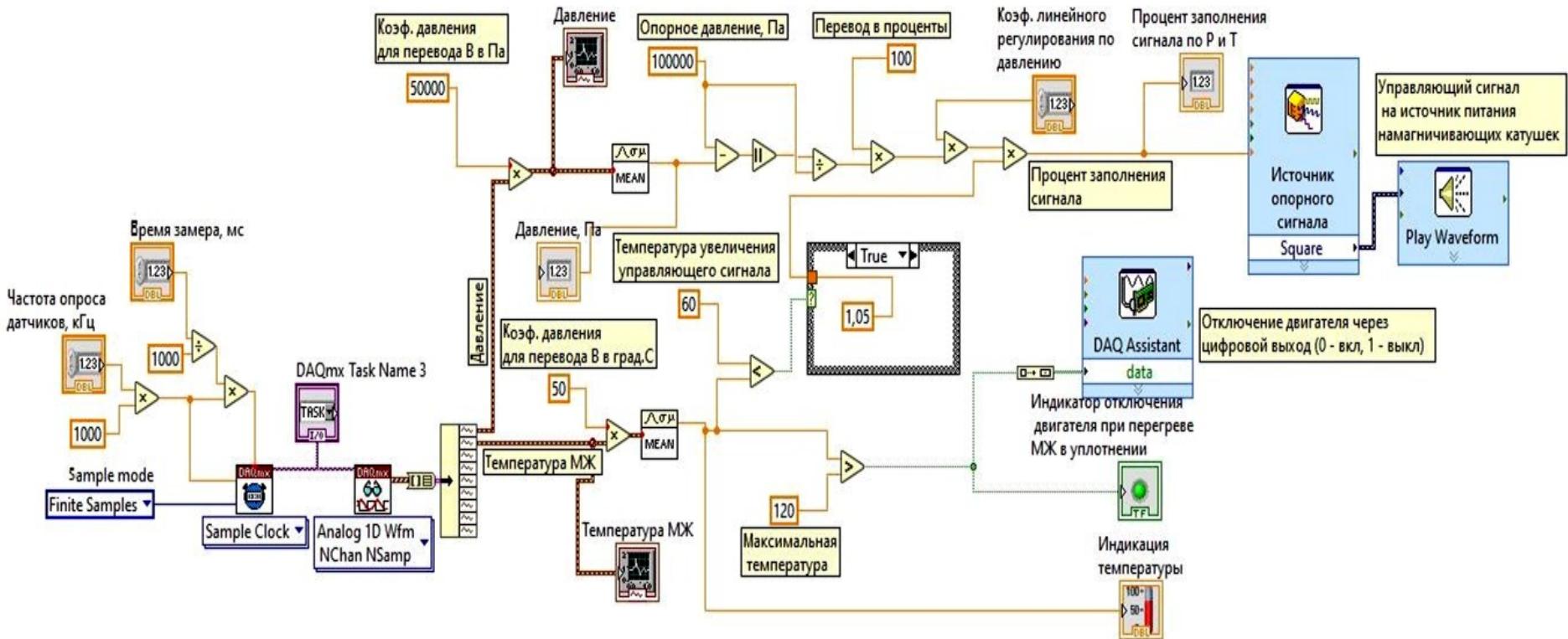


Рис. 6. Имитационная модель системы регулирования напряжения обмотки МЖГ



Рис. 7. Конструкция опытного управляемого МЖГ

При действии только ПМ ($I_y = 0$) и снижении n от 31 800 об/мин до полного останова ($n = 0$) Δp_{vkr} увеличился с 0,125 до 0,27 ати. Возрастание I_y от 0 до +4 А при $n = 0$ вызвало повышение Δp_{vkr} до 0,37 ати. Изменение направления и величины I_y от 0 до -3 А вызвало при $n = 0$ снижение Δp_{vkr} до 0,21 ати, т. е. при и регулировании I_y от -3 до +4 А для $n = 0$ Δp_{vkr} изменился от 0,21 до 0,37 ати – с диапазоном (-22,2... +37) %. Чувствительность изменения Δp_{vkr} по I_y при $n = 0$ составила 0,0229 ати/А. При таком же регулировании I_y для $n = 3\,180$ об/мин Δp_{vkr} изменился от 0,1 до 0,15 ати – с диапазоном (-20...+20) %. Чувствительность изменения Δp_{vkr} по I_y составила 0,007 ати/А.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение эффективности уплотнения валов электродвигателей, работающих с изменяемыми условиями и режимом работы, возможно при использовании магнитожидкостной герметизации вала, регулируемой по удерживаемому перепаду давлений, потерям трения, частоте вращения и тепловому режиму. Предложенная конструкция регулируемого магнитожидкостного герметизатора, средства и алгоритм его регулирования позволяют осуществлять адаптацию герметизации вала к изменениям условий эксплуатации. Экспериментально подтверждена возможность регулирования максимального удерживаемого перепада давлений управляемым магнитожидкостным герметизатором при изменении тока регулирующей подмагничивающей обмотки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Радионов А.В., Харламова Е.В. Повышение уровня экологической безопасности при использовании магнитожидкостных герметизаторов и частотных преобразователей в процессах эксплуатации электродвигателей серии ВАСО // Екологічна безпека. 2016. № 2 (22). С. 9–14.
2. Radionov A., Podoltsev A., Peczkis G. The Specific Features of High-velocity Magnetic Fluid Sealing Complexes // Open Engineering. 2018. V. 8. № 1. P. 539–544.
3. Казаков Ю.Б., Морозов Н.А., Стадомский Ю.И., Перминов С.М. Герметизаторы на основе нанодисперсных магнитных жидкостей и их моделирование. Иваново: ИГЭУ, 2010. 184 с.
4. Берковский Б.М., Медведев В.Ф., Краков М.С. Магнитные жидкости. М.: Химия, 1989. 279 с.
5. Власов А.М., Казаков Ю.Б. Исследование влияния регулирующей обмотки на изменение магнитной индукции в зазоре магнитожидкостного герметизатора: XX юбилейная Всероссийская с международным участием Плесская науч. конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям. Иваново: ИГЭУ, 2022. С. 311–317.

6. Krakov M.S., Nikiforov I.V. Effect of Diffusion of Magnetic Particles on the Parameters of the Magnetic Fluid Seal: A numerical simulation // *Magnetohydrodynamics*. 2014. V. 50. № 1. P. 35–44.
7. Морозов Н.А., Казаков Ю.Б. Нанодисперсные магнитные жидкости в технике и технологиях. Иваново: ИГЭУ, 2011. 264 с.
8. Nesterov S.A. Stradomskii Yu.I., Belov V.S. Study of Interconnected Physical Processes in the Magnetic Fluid Staler // *Problemele energetice regionale*. 2021. V. 3 (51). P. 1–9.
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. V. 431. P. 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*. 2020. V. 56. № 11. Art no. 4600510.
11. Казаков Ю.Б., Власов А.М. Экспериментальное исследование влияния регулирующей обмотки на удерживаемый магнитожидкостным герметизатором перепад давления: *Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (ХХII Бенардосовские чтения)*. В 3 т. Электротехника. Иваново: ИГЭУ, 2023. Т. 3. С. 319–321.

Для цитирования: Власов А.М., Казаков Ю.Б. Регулируемая по удерживаемому перепаду давлений, потерям трения, частоте вращения и тепловому режиму магнитожидкостная герметизация вала электродвигателя // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2026. № 1 (29). С. 15–25.

MAGNETIC FLUID SEALING OF AN ELECTRIC MOTOR SHAFT, ADJUSTABLE IN TERMS OF MAINTAINED PRESSURE DIFFERENTIAL, FRICTION LOSSES, ROTATION FREQUENCY AND THERMAL MODE

A.M. VLASOV, Cand. Sc., Yu.B. KAZAKOV, Dr Sc.

Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin,
34, Rabfakovskaya St., 153003, Ivanovo, e-mail: leshka.vlasov@gmail.com

The efficiency of magnetic fluid shaft sealing is affected by the pressure difference and external temperature, conditions and operating mode of the electric motor (start, braking, stopping, reversing, rotation speed and electrical load). Electromagnetic processes in an electric motor, through the action of the rotating magnetic flux of the windings, affect the flow rate of the magnetic fluid, the torque and friction losses in the magnetic fluid seal. It is advisable to regulate the properties of the magnetic fluid shaft seal according to the operating conditions of the electric motor. A design of an adjustable magnetic fluid seal is proposed and an algorithm for its regulation is developed, which allows for the adaptation of the magnetic fluid seal of the shaft to changes in the operating conditions of the electric motor. The possibility of changing the maximum retained pressure difference in an adjustable magnetic fluid seal has been experimentally confirmed.

Keywords: magnetic fluid shaft sealing, electric motor, regulation, pressure drop, friction losses, thermal conditions, rotation speed.

Поступила в редакцию/received: 03.12.2025; после рецензирования/revised: 05.12.2025;
принята/accepted: 08.12.2025