

УДК 631.313.33

В.А.Старовойтов

МАГНИТОЖИДКОСТНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Прогресс электромашиностроения диктует необходимость увеличения единичной мощности не только крупных, но и малых электрических машин, что связано с совершенствованием их конструкции, а также поиском новых принципов и систем охлаждения.

В этой связи несомненный интерес вызывают магнитные жидкости (МЖ), называемые также ферроджидкостями и представляющие собой седиментационно устойчивые гетерогенные системы на основе разнообразных жидкостных дисперсионных сред [1]. Характерным для МЖ является наличие эффекта увлечения (перемещения) ее магнитным и электромагнитным полем, в том числе и врачающимся. Это обстоятельство позволяет при использовании МЖ в качестве теплоносителя системы охлаждения, например, асинхронного электродвигателя исключить специальные нагнетательные устройства, характерные для чисто жидкостных систем охлаждения.

В настоящей работе исследовалась эффективность магнитожидкостного способа охлаждения на примере двухскоростного трехфазного асинхронного электродвигателя общепромышленного назначения с короткозамкнутым ротором АО 42-4/2 мощностью 2,1/2,8 кВт. Переключением числа пар полюсов изменялась скорость вращения электромагнитного поля в пределах $\omega_n = (157-314) \text{ с}^{-1}$, а регулирование тока в обмотке статора I_L осуществлялась с помощью нагрузочной машины.

Для организации магнитожидкостного охлаждения в конструкцию электродвигателя внесены некоторые изменения, показанные на рис. 1. Это прежде всего тонкостенные стаканы, выполненные на основе стекловолокна и кремнийорганического лака, т.е. немагнитного материала. Стаканы совместно с конструктивными элементами электродвигателя образуют в зоне лобовых частей обмотки статора замкнутые кольцевые камеры, заполняемые магнитной жидкостью. В качестве последней использовался коллоидный раствор магнетита в термостойком силоксане ПМТС с объемной концентрацией феррофазы 0,019 и намагниченностью насыщения $M_s = 31 \text{ кА/м}$.

Для измерения локальных температур обмотки и массива МЖ применялись 11 термопреобразователей сопротивления, расположение которых иллюстрируются рис. 1.

Визуализация гидродинамической обстановки в зоне лобовых частей осуществлялась с помощью специальных трассеров в объеме МЖ через окна в крышках электродвигателя.

Отмечено, что круговое движение массива МЖ начинается с некоторым запаздыванием τ во

времени от момента включения. При этом $\tau = f(I_L, \omega_n)$.

Охлаждение магнитной жидкостью, вращающейся совместно с магнитным полем ведет к значительному снижению температуры лобовых частей обмотки по сравнению со штатным воздушным охлаждением, что отображено соответственно кривыми 2 и 1 на рис. 2.

Интенсификация теплообмена при использовании обусловлена целым рядом качественно различающихся механизмов и в основном определяется, по-видимому, макроскопическим движением, обусловленным взаимодействием МЖ с магнитным полем. Как результат этого взаимодействия

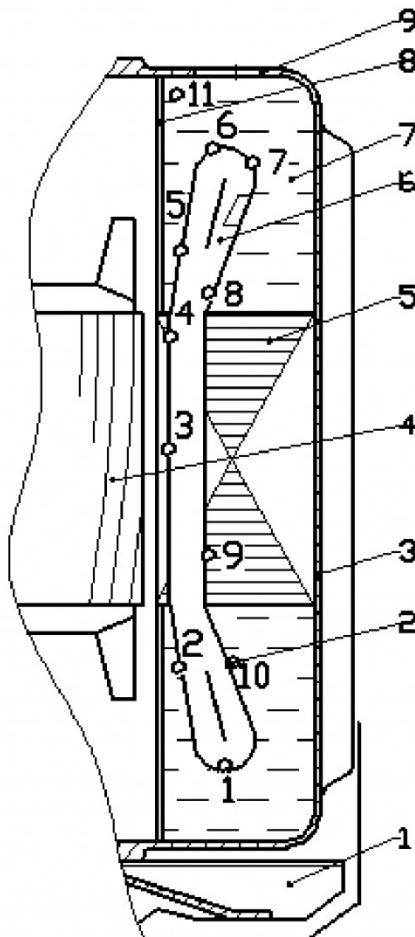


Рис. 1. Схема магнитожидкостного охлаждения лобовых частей обмотки статора асинхронного электродвигателя и размещение термоиндикаторов: 1 – крыльчатка вентилятора; 2 – термоиндикатор; 3 – станина с ребрами; 4 – ротор; 5 – сердечник статора; 6 – обмотка статора; 7 – магнитная жидкость (МЖ); 8 – стакан; 9 – окно смотровое

Номер термоиндикатора

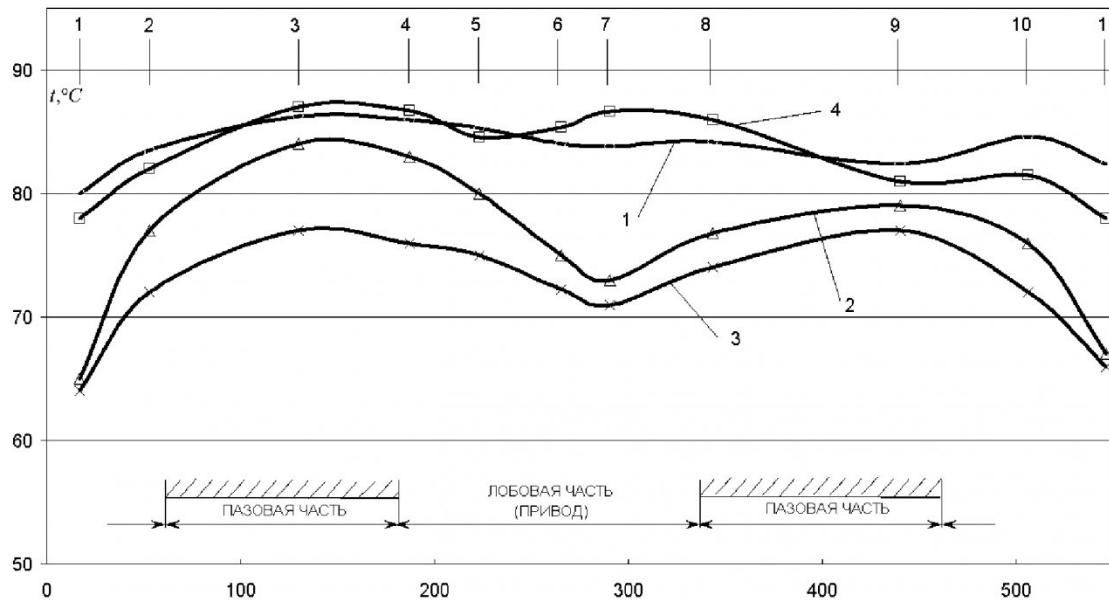


Рис. 2. Распределение температур в обмотке статора при: 1 – воздушном охлаждении; ($I_1 = I_h = 6,3A$); 2 – магнитоожидостном охлаждении лобовых частей ($I_1 = I_h = 6,3A$); 3 – магнитоожидостном охлаждении лобовых и пазовых частей обмотки ($I_1 = I_h = 6,3A$); 4 – магнитоожидостном охлаждении лобовых и пазовых частей обмотки ($I_1 = 1,3I_h = 8,2A$)

вия возникает объемная магнитная сила

$$\vec{f} = \mu_0 (\vec{M} \nabla) \vec{H} + \frac{1}{2} \mu_0 \nabla \times [\vec{M} \times \vec{H}], \quad (1)$$

где \vec{M} - намагниченность жидкости; \vec{H} - напряженность магнитного поля.

Намагниченность жидкости можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \vec{M} &= [M_0(\rho, H, \bar{T}_*) - \tilde{K}(T - \bar{T}_*) - \\ &\quad - \tau_{//} \frac{dH}{dt}] \vec{e} - \tau_{\perp} \frac{\tilde{d}\vec{e}}{dt}; \\ \vec{e} &= \frac{\vec{H}}{H}; \quad \frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{v} \nabla; \\ \frac{\tilde{d}\vec{e}}{dt} &= \frac{d\vec{e}}{dt} - \frac{1}{2} \times [\nabla \times \vec{v}] \times \vec{e} \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь M_0 – равновесная намагниченность в изотермической жидкости с температурой \bar{T}_* . Второй член определяет температурную зависимость намагниченности, а \tilde{K} – пиромагнитный коэффициент. Два последних члена определяют неравновесную составляющую намагниченности, которая возникает в движущейся среде, а также при воздействии нестационарного магнитного поля, имеющего место в электродвигателе. Материальные коэффициенты $\tau_{//}$ и τ_{\perp} имеют смысл времени релаксации соответственно параллельной

и перпендикулярной полю составляющих намагниченности.

Равновесную изотермическую магнитную силу можно представить в виде $\mu_0 \nabla \int_0^H \mu_0 dH$. Эта

сила имеет потенциальный характер. Она компенсируется градиентом давления и не может обеспечить перемешивание МЖ и, следовательно, интенсификацию теплообмена.

Часть магнитной силы, обусловленную неизотермичностью можно записать в виде $\mu_0 \tilde{K}(T - N_*) \times \nabla H$. Эта сила индуцирует теплоперенос в значительной мере аналогичный естественноконвективному. Оценка показывает, что в используемой конструкции термомагнитные силы в 8-10 раз превышают архимедовы и, следовательно, термомагнитная конвекция играет определяющую роль в обнаруженному эффекте. Однако более значительная часть силы, обусловленная неравновесной составляющей намагниченности. В рассматриваемом случае эта составляющая обусловлена в основном нестационарностью магнитного поля. Влиянием движения среды на намагниченность можно пренебречь, так как наблюдаемая скорость движения ферро жидкости составляет около 3% от скорости движения фазы поля. Поэтому в [2] можно сделать замену $\frac{d}{dt} \rightarrow \frac{\partial}{\partial t}$. В результате неравновесную часть магнитной силы можно представить в виде:

$$-\mu_0\tau_{//}\frac{\partial H}{\partial t}\nabla H - \mu_0\tau_{\perp}H\left(\frac{\partial \vec{e}}{\partial t}\nabla\right)\times\vec{H} - \\ -\frac{1}{2}\nabla\times\mu_0\tau_{\perp}H^2\left[\frac{\partial e}{\partial t}\times\vec{e}\right]. \quad (3)$$

Эта сила вызывает наблюдаемую азимутальную циркуляцию магнитной жидкости и увеличение коэффициента теплообмена между обмотками статора и феррожидкостью.

Отметим еще один механизм, который может обеспечить интенсификацию процессов переноса в феррожидкости. Во вращающемся поле помимо макроскопического движения имеет место скрытое вращательное движение. Поле, приводя во вращение ферро частицы и агрегаты дисперсной фазы, обладающих дипольным магнитным моментом, формирует в жидкости систему микровихрей. В случае неоднородного распределения температуры это движение обеспечивает дополнительный перенос тепла.

Следует отметить, что в рассмотренной выше конструкции электродвигателя с магнитожидкостным охлаждением непосредственному охлаждению подвергаются только лобовые части обмотки, температура же пазовых частей остается практически такой же, как и при воздушном охлаждении.

Одним из путей ее снижения может служить организация движения МЖ непосредственно в пазовой зоне размещения обмотки. Но для аксиально расположенных по отношению к плоскости вращающегося поля шлицов пазов статора $\vec{f}_m = 0$. Максимальную по своему значению объемную силу \vec{f}_m , действующую в азимутальном направлении, можно использовать для перемещения МЖ, например, по наклонным (спиральным) каналам, с помощью ее составляющей \vec{f}_m' , как это показано на рис. 3.

Для реализации этой идеи в клиновой части пазов (расточка статора) сделаны спиралевидные пазы (каналы). Таким образом внутренняя поверхность статора представляла из себя подобие гайки с прямоугольной четырехзаходной резьбой. Результативность действия такого тракта проверялась экспериментально при вертикальном расположении электродвигателя. Обнадеживающие результаты предопределили дальнейшие действия,

т.е. создание полного магнитожидкостного охлаждения электродвигателя за счет объединения каналов с камерами, а также объединения последних с четырьмя пазами в спинке статора. Таким образом, в электродвигателе помимо циркуляции МЖ в зоне лобовых частей обмотки имела место и циркуляция МЖ в аксиальном направлении.

Такая система охлаждения позволила существенно снизить температуру пазовой части обмотки (кривая 3 на рис. 2) и перекосы температур по

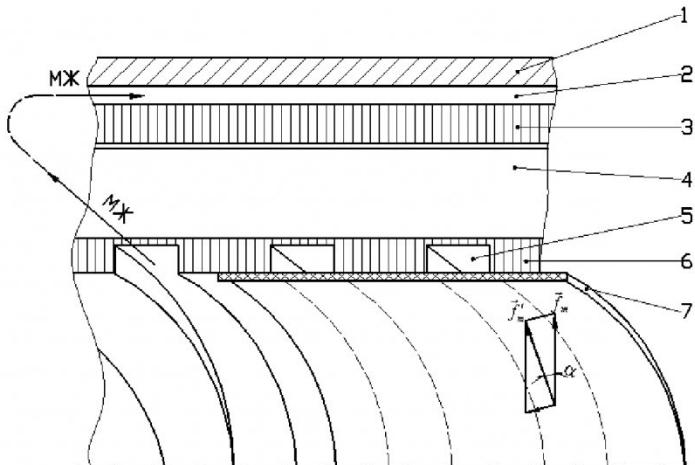


Рис.3. Схема магнитожидкостного охлаждения пазовой части обмотки и сердечника статора: 1 – станина; 2 – паз в спинке статора; 3 – спинка статора; 4 – обмотка статора; 5 – спиралевидный паз; 6 – клиновая часть паза; 7 – стакан

всей длине.

Общее снижение средней температуры обмотки при номинальной нагрузке электродвигателя позволяет говорить о некотором запасе по мощности. Испытания электродвигателя в режиме перегрузки при $I_L = 1,3I_H$ показали, что распределение температур по длине обмотки (кривая 4 на рис. 2) практически идентична распределению температур для воздушного охлаждения при $I_L = I_H$ (кривая 1 на рис. 2).

Таким образом полное магнитожидкостное охлаждение при некотором усложнении конструкции электродвигателя позволяет увеличить его единичную мощность на 20÷25% или же снизить класс изоляции.

Неоднократные измерения показали, что коэффициент абсорбции для изоляции находился в пределах $R_{ab} = (1,35 \div 1,40)$. Это свидетельствует о том, что МЖ, сама по себе являясь диэлектриком, не оказывает негативного влияния на изоляцию обмотки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Старовойтов В.А. Магнитожидкостная подвижная опора / Вестн. КузГТУ, 1998, № 5 (6), с. 39-41.

□ Автор статьи:

Старовойтов
Владимир Алексеевич
- канд. техн. наук, доц. каф. электро-
привода и автоматизации

УДК 621.822.538.4

В.А. Старовойтов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ ДЛЯ ГЕРМЕТИЗАЦИИ ВРАЩАЮЩИХСЯ ЧАСТЕЙ

Спектр технических решений, в которых используется уникальные свойства магнитных жидкостей (МЖ) достаточно широк [1-4]. Не последнее место среди них занимает высокогерметичные вводы движения и вращающиеся валы в частности. В последнем случае они выполняют роль автономных радиальных или торцевых уплотнений машин и аппаратов, одинаково хорошо работающих как в статике так и динамике. Формально относясь к классу контактных они работают в режиме жидкостного (при больших концентрациях - полужидкостного) трения и меньше изнашиваются.

Номенклатура уплотняемых ими сред может быть весьма разнообразна как по виду веществ, так и их агрегатному состоянию.

Известные литературные данные посвящены вопросам герметизации лишь газовых нейтральных сред (азот, воздух, инертные газы), в то время как применительно к машинам и аппаратам химтехнологии интерес представляют и жидкостные системы, в т.ч. агрессивные.

Естественно, при этом возникают сложные вопросы взаимодействия двух систем, одна из которых – МЖ, представляющая собой трёхкомпонентную гетерогенную композицию, состояние которой в немалой степени определяется наличием магнитного поля. Находящаяся же с ней в контакте рабочая (уплотняемая) среда взаимодействует по поверхности раздела, форма и размеры которой зависят от множества факторов.

Степень влияния некоторых из них на работоспособность магнито-жидкостных уплотнительных устройств (МЖУ) исследовалась на установке, схема которой представлена на рис.1.

В качестве объекта исследований выбрано одноступенчатое МЖУ, состоящее из двух кольцевых полюсов (1, 3), магнитопровода (2) и катушки возбуждения (10). Концентрично с расточкой полюсов размещается вращающийся вал (5) диаметром 50 мм, являющийся одновременно элементом магнитной системы. Зазор между валом и одним из полюсов заполняется МЖ (4) герметизирующей неподвижную рабочую камеру (8), заполняемую газом или жидкостью через патрубок (6). Диамагнитная камера снабжена

змеевиком для охлаждения или подогревания

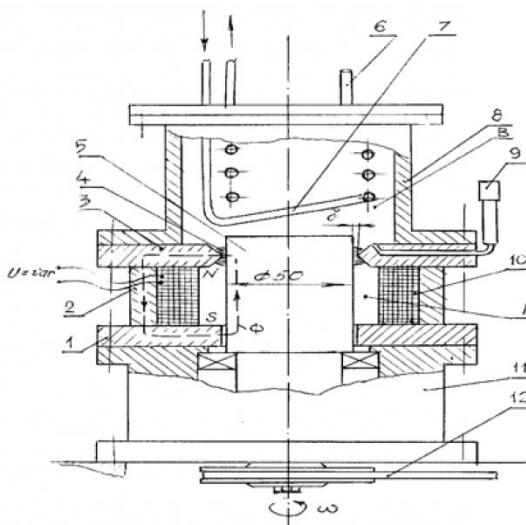


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1, 3 – полюс кольцевой; 2 – магнито-провод; 4 – магнитная жидкость; 5 – вал; 6 – штуцер подвода рабочей среды; 7 – змеевик; 8 – корпус рабочей камеры; 9 – лубрикатор; 10 – катушка возбуждения; 11 – станина; 12 – клиновременная передача; А – атмосфера; В – полость рабочей камеры

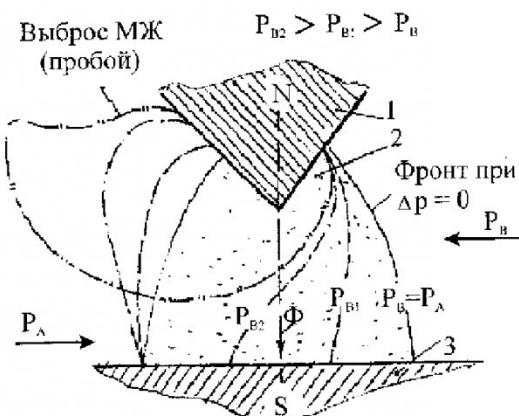


Рис. 2. Плоская модель рабочей зоны МЖУ: 1 – полюсный наконечник; 2 – магнитная жидкость; 3 – плоская пластина