УДК 537.622

ПРЕИМУЩЕСТВА ПРИМЕНЕНИЯ ФЕРРОМАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В ЗАЗОРАХ ПОГРУЖНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Веппер Л.В. – *кандидат технических наук, доцент, учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», г. Гомель, Республика Беларусь*
Лебединский В.Е. – *бакалавр, учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», г. Гомель, Республика Беларусь*

***Аннотация**. Статья посвящена исследованию преимуществ применения ферромагнитной жидкости в зазорах погружного электродвигателя для снижения потерь электроэнергии при его функционировании. Отмечено, что обычные погружные электродвигатели используют диэлектрическое масло в зазорах между статором и ротором для уменьшения разницы в давлении между электродвигателем и давлением жидкости в скважине. Однако такая система обладает следующим недостатком. Из-за высокой вязкости диэлектрического масла возрастает пусковой ток и это приводит к повышенному энергопотреблению. Альтернативой является использование ферромагнитной жидкости вместо диэлектрического масла. Описана физическая сущность обеспечения улучшения охлаждения электродвигателя за счет применения ферромагнитных жидкостей. Подчеркнуто, что это обусловлено тем, что магнитные свойства ферромагнитных жидкостей изменяются обратно пропорционально температуре: сильные магнитные поля, создаваемые обмотками электродвигателя, которые выделяют тепло, притягивают холодную ферромагнитную жидкость в большей степени, чем горячую ферромагнитную жидкость. Представлены схема электродвигателя с зазором из ферромагнитной жидкости и способы реализации данной разработки. В заключении перечислены преимущества использования ферромагнитной жидкости в зазорах электродвигателя. В их числе обозначены следующие: снижение потерь электроэнергии, охлаждение обмотки, герметизация, повышение КПД двигателя, снижение радиальных биений, снижения высокого напряжения на источнике питания и высокого тока на обмотках электродвигателя, меньшие габариты электродвигателя за счёт тонкого корпуса.*

***Ключевые слова**: ферромагнитная жидкость, снижение потерь, погружной электродвигатель, зазор электродвигателя, охлаждение обмотки.*

Основная цель данной разработки — это уменьшение потерь электроэнергии и повышение эффективности работы погружного электродвигателя за счет применения ферромагнитной жидкости в его зазорах. Ферромагнитные жидкости представляют стабильные коллоидные суспензии ферромагнитных частиц или в водных средах, или в средах на масляной основе[1]. Магнитные частицы представляют собой частицы оксида железа, имеющие диаметры, составляющие около 10 нанометров. Они могут быть получены в виде осадков в простых химических реакциях. Слой поверхностно-активного вещества покрывает поверхность наночастиц и способствует пре-

[1] *R.E. Rosensweig. Ferrohydrodynamics. Cambridge University Press, Cambridge. 1985*

одолению ван-дер-ваальсовых сил за счет предотвращения слишком сильного сближения частиц и комкования или осаждения под действием силы тяжести.

Ферромагнитные жидкости обеспечивают улучшение охлаждения электродвигателя. Это обусловлено тем, что магнитные свойства ферромагнитных жидкостей изменяются обратно пропорционально температуре; сильные магнитные поля, создаваемые обмотками электродвигателя, которые выделяют тепло, притягивают холодную ферромагнитную жидкость в большей степени, чем горячую ферромагнитную жидкость. В результате этого обеспечивается отталкивание нагретой ферромагнитной жидкости от обмоток к более холодным поверхностям. Данный эффективный способ охлаждения не требует никакого подвода дополнительной энергии[1].

В электродвигателях, имеющих конструкцию с ротором и статором, использование ферромагнитной жидкости, в зазоре между ротором и статором, в значительной степени способствует уменьшению сопротивления магнитной цепи электродвигателя. В обычных погружных электродвигателях зазор с диэлектрическим маслом очень похож на воздушный зазор между ротором и статором. Зазор с диэлектрическим маслом оказывает преобладающее влияние на сопротивление магнитной цепи электродвигателя, в котором магнитный поток B может быть сформирован посредством электрического тока I, поданного с поверхности посредством длинных кабелей электрических погружных насосных систем.

Зависимость между током и магнитным потоком может быть выражена в следующем виде[2]:

$$NI=B(Lm/\mu m +Lg/\mu 0)$$

где, N - число витков, по которым ток протекает через электродвигатель;

I - электрический ток;

Lm - эквивалентная длина пути магнитной силовой линии через пластины сердечника электродвигателя и ротор;

Lg - длина воздушного зазора, в случае электродвигателя электрической погружной насосной системы - длина зазора с маслом;

μ0 - магнитная проницаемость свободного пространства;

μm - магнитная проницаемость пластин сердечника электродвигателя, выполненных из железного сплава.

Система состоит, рисунок 1, из автономного источника питания, находящегося на поверхности, силовых линий, подключающих погружной насос к источнику автономного питания для использования погружного электродвигателя, представленного на рисунке 1. Электродвигатель состоит из корпуса 1, в котором находятся статор 2 и ротор 3. Ферромагнитная жидкость 4 находится в корпусе, в количестве достаточной для помещения в неё статора 2 и ротора 3.

[1] *Там же*

[2] *Elmars Blums. New Applications of Heat and Mass Transfer Processes in Temperature Sensitive Magnetic Fluids. Brazilian Journal of Physics. 1995.*

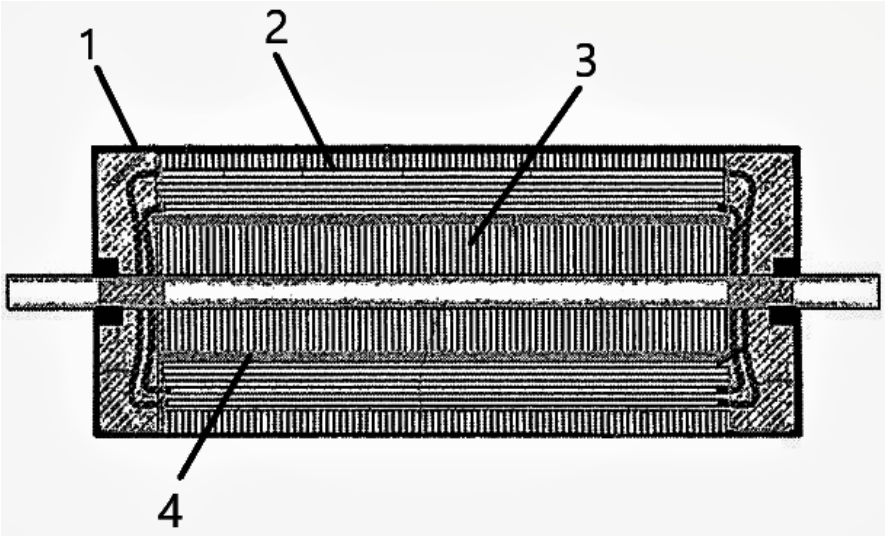


Рис. 1. Схема погружного электродвигателя с зазором из ферромагнитной жидкости

Уменьшение магнитного сопротивления магнитной цепи погружного электродвигателя обеспечивается за счёт фактического уменьшения зазора между статором и ротором. Это же обеспечивает снижение высокого напряжения на источнике питания или снижение высокого тока в источнике питания.

Обычные погружные электродвигатели в зазорах между статором и ротором используют диэлектрическое масло для уменьшения разницы в давлении между электродвигателем и давлением жидкости в скважине. За счёт выравнивания давления у нас появляется возможность не использовать толстый корпус способный выдержать перепады давления. Такая система была использована в первых версиях погружных насосных систем. Недостатком такой системы является то, что диэлектрическое масло имеет вязкость вследствие чего возрастает электрический ток, протекающий по обмоткам электродвигателя необходимый для запуска электродвигателя. Это приводит к повышенному энергопотреблению.

Ранее помещение магнитной жидкости в зазоры электродвигателя изучалось в работе В.Е. Ферман[1]. Целью исследования было изучение процессов охлаждения обмотки, герметизации, повышения КПД двигателя и снижения радиальных биений.

По одному из способов реализации, система позволяет уменьшить потребление электроэнергии по длинным силовым линиям к электрическому погружному насосу. В системе находятся: источник питания который находится на поверхности скважины, силовые линии передачи электрического тока, соединяющие источник питания на поверхности с электрическим погружным насосом находящегося в скважине, погружной электродвигатель насоса состоящий из тонкостенного корпуса, статора, ротора и ферромагнитной жидкости, которая заполняет зазоры между статором и ротором. В данной системе ферромагнитная жидкость служит для снижения магнитного сопротивления, для уменьшения высокого напряжения и тока в источнике питания и уменьшения нагрева всей системы.

[1] *Ферман В.Е. Магнитные жидкости. Режим доступа: https://studizba.com/files/show/djvu/3232-1-v-e-fertman--magnitnye-zhidkosti.html (дата обращения: 11.11.2022).*

В одном из вариантов электродвигатель частично заполнен ферромагнитной жидкостью, достаточной для компенсации потерь мощности в силовых линиях, для поддержки нужного уровня выходной мощности двигателя, что позволяет значительно экономить электроэнергию. Также для достижения наилучших характеристик можно изменять концентрацию, состав и размер магнитных частиц в жидкости (можно как повысить их концентрацию и размер, так и понизить) в зависимости от размера двигателя, зазора между статором и ротором.

Ферромагнитная жидкость может выступать в роли гасителя вибрации и для дополнительной герметизации системы за счёт разности плотности ферромагнитной жидкости и жидкости в скважине. Особая компоновка специальных электродвигателей даёт возможность уменьшить величину тока, требуемого для запуска электродвигателя погружной насосной системы с его номинальной частотой вращения и мощностью на выходе, по сравнению с обычным электродвигателем.

Таким образом, преимущества использования ферромагнитной жидкости в зазорах электродвигателя заключаются в следующем: снижение потерь электроэнергии, охлаждение обмотки, герметизация, повышение КПД двигателя, снижение радиальных биений, снижения высокого напряжения на источнике питания и высокого тока на обмотках электродвигателя, меньшие габариты электродвигателя за счёт тонкого корпуса.

Список использованных источников

1. Погружной электродвигатель с зазором с ферромагнитной жидкостью. Режим доступа: https://patentdb.ru/patent/2543099 (дата обращения: 20.11.2022).

2. Ферман В.Е. Магнитные жидкости. Режим доступа: https://studizba.com/files/show/djvu/3232-1-v-e-fertman--magnitnye-zhidkosti.html (дата обращения: 11.11.2022).

3. Rosensweig R.E. Ferrohydrodynamics. Cambridge University Press, Cambridge. 1985.

4. Elmars Blums. New Applications of Heat and Mass Transfer Processes in Temperature Sensitive Magnetic Fluids. Brazilian Journal of Physics. 1995.

References

1. Submersible motor with ferrofluid clearance. Access mode: https://patentdb.ru/patent/2543099 (date of access: 11/20/2022).

2. Ferman V.E. Magnetic fluids. Access mode: https://studizba.com/files/show/djvu/3232-1-v-e-fertman--magnitnye-zhidkosti.html (date of access: 11/11/2022).

3. Rosenweig R.E. Ferrohydrodynamics. Cambridge University Press, Cambridge. 1985

4. Elmars Blums. New Applications of Heat and Mass Transfer Processes in Temperature Sensitive Magnetic Fluids. Brazilian Journal of Physics. 1995.

АФЗАЛИЯТҲОИ ИСТИФОДАБАРИИ МОЕЪҲОИ ФЕРРОМАГНЕТӢ ДАР ФОСИЛАИ МУҲАРРИКИ ЗЕРИОБӢ

Веппер Л.В. – *номзади илмҳои техникӣ, дотсент, муассисаи таълимии «Донишгоҳи давлатии техникии Гомель ба номи П.О. Сухой, Гомель, Ҷумҳурии Беларус*

Лебединский В.Е. – *бакалавр, муассисаи таълимии «Донишгоҳи давлатии техникии Гомел ба номи П.О. Сухой, Гомель, Ҷумҳурии Беларус*

Чакида*. Мақола ба омӯзиши афзалиятҳои истифодаи моеъи ферромагнитӣ дар фосилаи муҳаррики зериобӣ барои кам кардани талафоти нерӯи барқ ҳангоми кор бахшида шудааст. Кайд карда мешавад, ки муҳаррикӣ оддии зериобӣ барои кам кардани фарки фишори байни муҳаррик ва фишори моеъ дар чох равғани диэлектрикиро дар фосилахои байни статор ва ротор истифода мебаранд. Аммо, чунин система камбудиҳои зерин дорад. Аз сабаби часпакии баланди равғани диэлектрик чараёни ибтидой зиёд мешавад ва ин боиси зиёд шудани сарфи энергия мегардад. Алтернатива ин аст, ки ба ҷои равғани диэлектрикӣ моеъхои ферромагнетӣ истифода шавад. Мохияти физикии бехтар намудани хунуккунии муҳаррикӣ электрики бо рохи истифода бурдани моеъхои ферромагнитӣ тасвир карда шудааст. Таъкид карда мешавад, ки ин аз он сабаб аст, ки хосиятхои магнитии моеъхои ферромагнетӣ бо харорат баръакс тағйир меёбанд: майдонхои магнитии пурзуре, ки дар печхои муҳаррик ба вучуд омадаанд, ки гармиро хосил мекунанд, моеъхои ферромагнетӣ назар ба моеъи гарм бештар ба худ чалб мекунанд. Диаграммаи муҳаррики электрикӣ бо фосилаи моеъхои ферромагнетӣ ва усулҳои татбиқи ин коркард оварда шудааст. Дар хулоса афзалиятҳои истифодаи моеъхои ферромагнетӣ дар фосилаи муҳаррики электрикӣ номбар шудаанд. Дар байни онхо: кам кардани талафи қувва, хунук кардани печ, баланд бардоштани самаранокии муҳаррик, кам кардани зарбаи радиалӣ, паст кардани шиддати баланд дар манбаъи нерӯ ва ҷараёни баланд дар печи муҳаррик, андозаи хурдтари муҳаррики электрикӣ.*

Калидвожаҳо*: моеъи ферромагнитӣ, кам кардани талафот, муҳаррики зериобӣ, фосилаи муҳаррик, хунуккунии печ.*

ADVANTAGES OF USE OF FERROMAGNETIC FLUID IN THE CLEARANCES OF A SUBMERSIBLE MOTOR

Vepper L.V. – *candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Educational Institution "Gomel State Technical University", Gomel, Republic of Belarus*
Lebedinsky V.E. – *bachelor, educational institution "Gomel State Technical University", Gomel, Republic of Belarus*

Annotation*. The article is devoted to the study of the advantages of using a ferromagnetic fluid in the gaps of a submersible motor to reduce power losses during its operation. It is noted that conventional submersible motors use dielectric oil in the gaps between the stator and rotor to reduce the difference in pressure between the motor and the fluid pressure in the well. However, such a system has the following disadvantage. Due to the high viscosity of the dielectric oil, the starting current increases and this leads to increased energy consumption. An alternative is to use ferrofluid instead of dielectric oil. The physical essence of improving the cooling of the electric motor through the use of ferromagnetic fluids is described. It is emphasized that this is due to the fact that the magnetic properties of ferrofluids change inversely with temperature: strong magnetic fields created by the motor windings, which generate heat, attract cold ferrofluid to a greater extent than hot ferrofluid. A diagram of an electric motor with a ferrofluid gap and methods for implementing this development are presented. In conclusion, the advantages of using a ferrofluid in the gaps of an electric motor are listed. Among them are the following: reduction of power losses, cooling of the winding, sealing, increase in motor efficiency, reduction of radial beats, reduction of high voltage on the power source and high current on the motor windings, smaller dimensions of the electric motor due to the thin case.*

Key words*: ferrofluid, loss reduction, submersible motor, motor clearance, winding cooling.*