

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА БЕСКОНТАКТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ ДЛЯ СРЕДСТВ ПОДВОДНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ

В.А. Герасимов, А.В. Комлев, А.Ю. Филоженко

В подводной робототехнике можно выделить особую группу электромагнитов, которые являются по своему назначению удерживающими и работают с определенным рабочим немагнитным зазором между внешним якорем и сердечником. Такие применения относятся к задачам фиксации и удержания подводного аппарата на донной станции подводного базирования, режимам удержания привязного подводного аппарата на поверхности морских сооружений при выполнении функций мониторинга или очистки и др. При проектировании удерживающего электромагнита необходимо определение конструктивных параметров, обеспечивающих требуемое усилие притяжения при заданном рабочем зазоре и напряжении питания с ограничениями по массе и по перегреву обмотки. В литературе отсутствуют методики расчетов, позволяющие решить указанную задачу, поэтому исследования характеристик электромагнита в режимах удержания и разработка методики определения конструктивных параметров электромагнита, отвечающего поставленным требованиям, являются актуальными задачами. Целью настоящей работы является представление результатов исследования характеристик и разработанной методики расчета конструкции электромагнитов, используемых в качестве удерживающих и для которых наличие определенного немагнитного зазора является рабочим режимом. Методы исследования сочетают аналитические выводы, натурные эксперименты и математическое моделирование. Результаты исследования содержат предложенную методику расчета конструктивных параметров удерживающего электромагнита, обеспечивающего необходимое усилие притяжения при заданном рабочем зазоре с минимизацией массы при определенном напряжении питания обмотки и допустимой температуре перегрева провода.

Ключевые слова: подводная робототехника, необитаемые подводные аппараты (НПА), бесконтактный электромагнит, рабочий зазор, усилие притяжения, допустимый перегрев, минимизация массы, методика расчета, тепловое (термическое) моделирование, моделирование электромагнитных полей.

Введение

В подводной робототехнике существует ряд задач, которые решаются наиболее просто путем применения электромагнитов, в перечне которых, в зависимости от условий использования, можно выделить две группы. Для первой группы рабочий режим характеризуется минимально возможным контролируемым зазором, который определяется чистотой обработки рабочей поверхности электромагнита и притягиваемой детали. Примером могут служить электромагниты удержания аварийного балласта на автономных необитаемых подводных аппаратах (АНПА), электромагниты приведения в рабочее состояние антенн радиосвязи на АНПА и др. В этих вариантах использования притягиваемая деталь

(внешний якорь) подводится к электромагниту, вводится в соприкосновение с ним и, затем, подается питание на обмотку. Здесь рабочий зазор находится под контролем, что должно исключать попадание в него каких-либо посторонних предметов и обеспечивать минимально возможное значение зазора, ограниченное только конструктивными параметрами. Усилие электромагнита является максимально возможным и неизменным.

Для второй группы рабочий режим связан с наличием определенного немагнитного зазора, часто не постоянного и зависящего от ряда случайных факторов. Это, например, электромагниты для фиксации и удержания подводного аппарата на донной станции подводного базирования после автоматического причаливания к ней. В этом варианте применения элект-

тромагнитов зазор будет зависеть от толщины слоя морских организмов, которые обрастают на посадочном месте фиксации АНПА.

Электромагниты широко применяются также в телеуправляемых необитаемых подводных аппаратах (ТНПА), которые используются для мониторинга состояния и очистки внешней поверхности судов и различных морских сооружений. Здесь между рабочей плоскостью электромагнита и поверхностью обслуживаемого объекта, являющегося внешним якорем для электромагнита, существует некоторый зазор. Этот зазор определяется необходимым клиренсом ТНПА, а также толщиной слоя обрастания на внешней поверхности объекта, по которой перемещается ТНПА в ходе его обслуживания. Для некоторых морских сооружений, например платформ нефтегазодобычи, наружная поверхность покрыта защитным слоем из нержавеющей стали, которая также создает немагнитный зазор.

Цель настоящей статьи – представление результатов исследования характеристик электромагнитов второй группы, которые являются бесконтактными и используются в качестве удерживающих и для которых наличие определенного немагнитного зазора является рабочим режимом. При этом представляют интерес определение конструктивных параметров электромагнита, обеспечивающих требуемое усилие удержания при заданном максимальном зазоре электромагнита, а также оптимизация конструктивных параметров с целью увеличения усилия при практически неизменных массогабаритных характеристиках. Актуальность такой постановки задачи объясняется тем, что в соответствующей литературе подобные вопросы не рассматриваются [1, 2].

Один из примеров использования бесконтактного электромагнита в устройстве очистки корпуса судна приведен в [3]. Устройство, представляющее собой ТНПА, имеет габариты (2х1,8х0,6) м и снабжено тремя электромагнитами диаметром примерно 0,6...0,7 м. Очистка производится струями воды под высоким давлением, при этом ТНПА может подниматься по борту судна выше поверхности воды за счет фрикционных приводов.

Известен ТНПА, применяемый для осмотра корпуса морских объектов фирмы Seabotix (США) [3]. Как следует из приведенного в источнике описания, на аппарате установлены «аттрактор» Vortex Generator, создающий силу притяжения до 26 Н, а также гусеничная система с магнитами, предназначенная для перемещения аппарата и создания дополнительной силы притяжения до 14 Н. Поскольку на гусеницах применяются постоянные магниты, то

здесь существует проблема отсоединения ТНПА от обслуживаемой поверхности объекта.

ТНПА HullWiper для очистки корпуса с магнитным удержанием разработан в Норвегии [3]. Использование магнитного удержания позволяет аппарату обслуживать корпус судна выше границы поверхности воды.

Приведенный краткий обзор показывает, что применение удерживающих электромагнитов находит применение в ТНПА для мониторинга состояния и очистки наружной поверхности морских сооружений и судов.

■ Постановка задачи исследования

В литературе аналитический расчет характеристик электромагнита, имеющий своей целью определение усилия притяжения и расчет конструктивных параметров, обеспечивающий это усилие, требует построения картины магнитного поля в зазоре. При этом должны учитываться эффекты выпучивания поля при увеличении немагнитного зазора для ненасыщенного сердечника электромагнита. Степень насыщения определенных участков магнитопровода электромагнита определяется как материалом, который используется для изготовления сердечника, так и его геометрическими соотношениями, и оказывает существенное влияние на усилие электромагнита. Учет этого фактора усложняет расчет, но не гарантирует требуемой точности. Если принять завышенные значения сечений магнитопровода (с «запасом»), то можно исключить насыщение, но получить при этом увеличенные значения массы электромагнита, что в условиях его использования на ТНПА является крайне нежелательным.

Опыт разработки узлов энергетики подводных робототехнических комплексов показывает, что рациональным подходом к решению поставленной задачи конструктивного расчета удерживающего электромагнита будет сбалансированное сочетание математического моделирования с натурным экспериментом, основной целью которого должна быть оценка адекватности принятой математической модели. При таком подходе следует ожидать минимальных затрат при высокой достоверности результатов расчета.

■ Математическое моделирование бесконтактного электромагнита

В настоящее время существует различное программное обеспечение, позволяющее выполнить

задачи расчета и моделирования электромагнитов и электромагнитных процессов с достаточной степенью точности и достоверности. К ним относятся следующие программы: ANSYS Maxwell, FEMM, ELCUT, COMSOL и другие. Работа указанных программ основана, как правило, на методе конечных элементов – известном способе решения задач с дифференциальными и интегральными уравнениями. Весь расчет выполняется в графической форме и обычно сводится к построению геометрической модели исследуемого объекта, определению свойств материалов и граничных условий. Главное отличие указанных программ заключается в длительности и точности расчета, возможностях и удобстве интерфейса.

Так, программный продукт FEMM (Finite Element Method Magnetics) представляет собой основанный на методе конечных элементов набор программ для решения низкочастотных электромагнитных, токовых и тепловых задач в двумерной плоскости. Программа используется для решения:

- линейных и нелинейных магнитостатических задач;
- гармонических линейных и нелинейных квазистатических магнитных задач;
- линейных электростатических задач;
- тепловых задач в установившемся тепловом состоянии;
- задач по исследованию протекания тока в проводнике.

Достоинствами программы является то, что она свободно распространяется и не требовательна к производительности компьютера, позволяя достигать поставленной цели исследования. При этом система решает задачи магнетизма, которые могут трактоваться как «низкочастотные задачи», т.е. задачи, в которых токами смещения (вытеснения) можно пренебречь по сравнению с токами проводимости. Токи смещения обычно учитываются для решения задачи по распространению радиоволн и в данный пакет программ не входят. Аналогичным образом в задачах по электростатике рассматривается только электрическое поле, а магнитным полем пренебрегают [4].

Программный пакет ANSYS Maxwell представляет собой более мощное программное обеспечение для моделирования двумерных и трехмерных электромагнитных полей, используемое для анализа моделей двигателей, датчиков, трансформаторов и многих других электрических и электромеханических устройств различного применения. В качестве математической основы ANSYS Maxwell также использует метод конечных элементов. Программа более тре-

бовательна к производительности компьютера, при этом имеет множество настроек. Поддерживается импорт 3D моделей из формата STEP.

ANSYS Maxwell включает в себя следующие основные решатели [5]:

- магнитный переходный процесс с жестким движением;
- электромагнитный переменный ток (анализ устройств, подверженных воздействию эффектов близости, вихревых токов и смещений);
- магнитостатический;
- электростатический.

Разработка ELCUT является российским программным пакетом для моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач методом конечных элементов [6]. Задачи могут решаться в плоскопараллельной, осесимметричной или трехмерной расчетной области. Простота интерфейса и скорость работы схожа с программой FEMM.

Для составления компьютерной модели электромагнита, оценки адекватности её реальному объекту и проведения исследований по выбору оптимальных характеристик электромагнита использовались компьютерные программы ANSYS Maxwell 3D и FEMM. В качестве прототипа модели был принят имеющийся в наличии электромагнит диаметром 100 мм, используемый для удержания балласта на АНПА. Сердечник электромагнита выполнен из стали марки 16Х. Параметры стали в модели были заданы с помощью кривой намагничивания $B = f(H)$ в соответствии с данными ГОСТ 10160-75 и аппроксимацией промежуточных точек. Количество витков и ток катушки электромагнита устанавливались в модели с помощью задания магнитодвижущей силы (МДС) в сечении катушки. Для указанного электромагнита МДС составляет 1425 ампер-витков.

На рис. 1 изображены результаты моделирования электромагнита в программе ANSYS Maxwell 3D. Полученная картина распределения магнитной индукции в магнитопроводе электромагнита показывает, что максимального значения 1,6 Тл (красный цвет) индукция достигает в сечении перехода стержня сердечника в технологический выступ. В этом компьютерном эксперименте немагнитный зазор был установлен 1 мм.

На рис. 2 изображен процесс моделирования электромагнита в программе FEMM. Особенностью программы является то, что геометрия электромагнита задаётся в двухмерном виде. Поэтому для задания цилиндрической формы электромагнита использовался осесимметричный способ задания геометрии электромагнита.

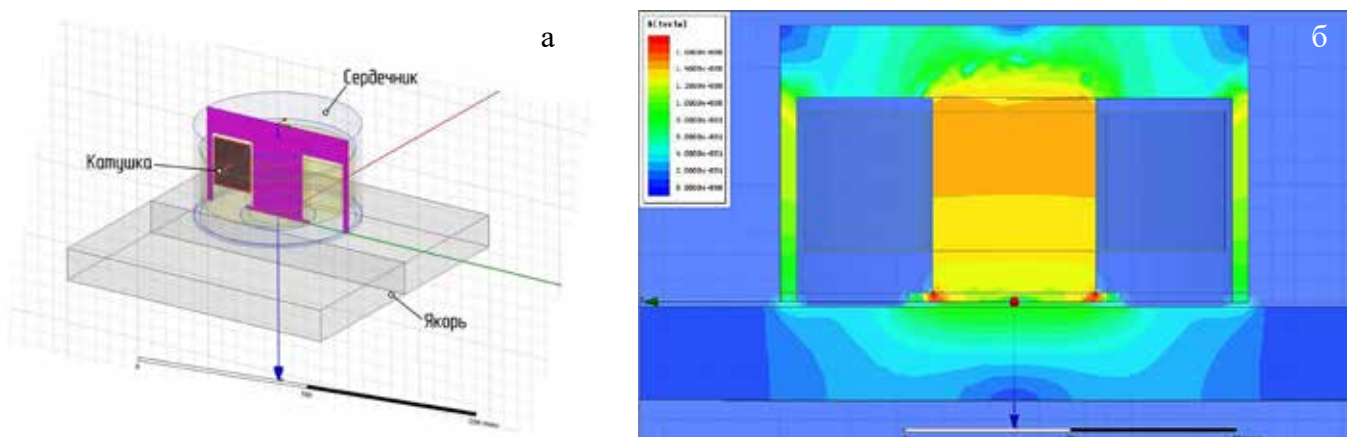


Рис. 1. Моделирование электромагнита в программе ANSYS Maxwell 3D: а – расчетная схема моделирования; б – распределение магнитной индукции в сечении электромагнита при воздушном зазоре 1 мм и магнитодвижущей силе 1425 Ампер-витков

На рис. 2, а представлена расчетная схема моделирования электромагнита со сгенерированной сеткой конечных элементов, а на рисунке 2, б показана картина распределения магнитной индукции электромагнита при заданных параметрах и воздушном зазоре 1 мм. Из сопоставления этой картины с цветовой шкалой следует, что максимального значения индукция достигает в сечении перехода зерна сердечника в технологический выступ и численно равна 1,5 ... 1,7 Тл.

При сравнении полученных картин распределения магнитной индукции в сердечнике электромагнита можно сделать вывод, что указанные программы моделирования показывают схожие результаты: индукция в стержне сердечника составляет около 1,4–1,5 Тл, а в его выступах сосредото-

чены максимальные значения индукции, которые также близки по значениям. Итогом такого анализа является вывод, что для определения значений индукции по различным сечениям сердечника целесообразно использовать программу FEMM. Это должно обеспечить решение задачи с минимальными затратами. Заметим, что полученная картина распределения индукции помогает наглядно представить сущность электромагнитных процессов в электромагните, тогда как конечной целью расчета является определение усилия притяжения, создаваемого электромагнитом при заданной намагничивающей силе обмотки и различных значениях немагнитного зазора между электромагнитом и якорем, т.е. определение его тяговой характеристики.

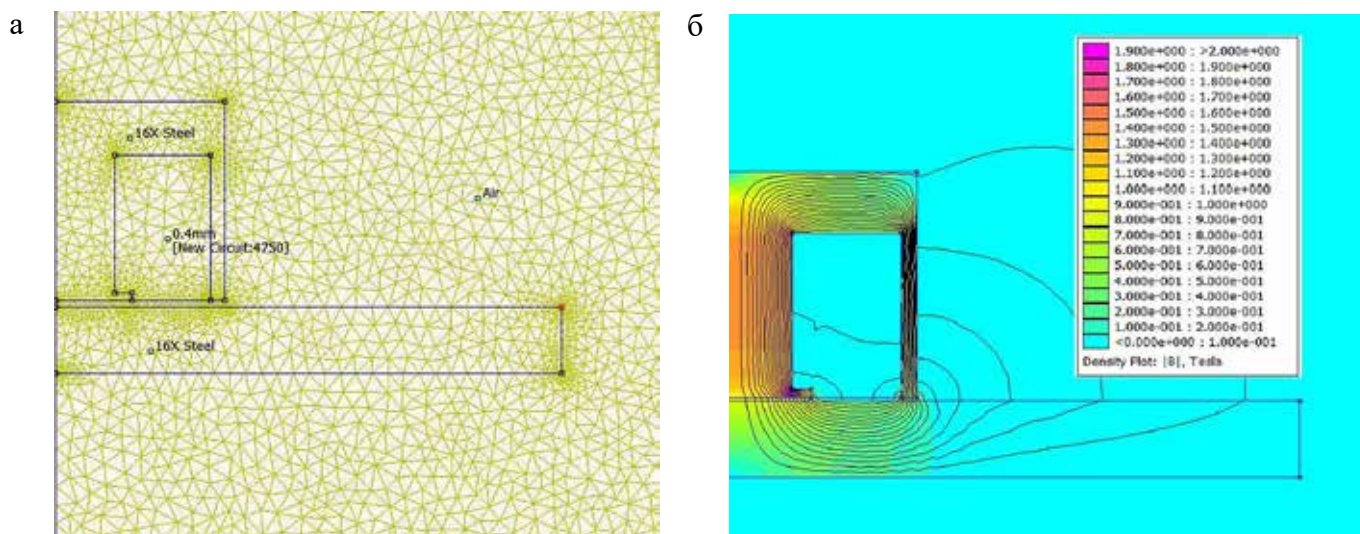


Рис. 2. Моделирование электромагнита в программе FEMM: а – расчетная схема моделирования; б – распределение магнитной индукции в сечении электромагнита при воздушном зазоре 1 мм и магнитодвижущей силе 1425 ампер-витков

■ Экспериментальные исследования

Определение тяговой характеристики выполнялось для электромагнита, который был принят в качестве прототипа для построения математической модели. Диаметр такого электромагнита составляет 100 мм, а МДС равна 1425 ампер-витков. Схема эксперимента приведена на рис. 3.



Рис.3. Схема эксперимента по измерению тяговых характеристик электромагнита: 1 – внешний якорь, 2 – немагнитные прокладки, 3 – электромагнит, 4 – измеритель усилия, 5 – подвеска, 6 – элементы гибкой связи

Сопоставление приведенных на рис. 4 результатов моделирования и эксперимента позволяет сделать следующие выводы:

- моделирование в программах ANSYS Maxwell 3D и FEMM для определения индукции в сердечнике показывает достаточно близкие результаты; отличие по ординатам составляет 5 ... 7 %;

- вид экспериментальной тяговой характеристики электромагнита практически совпадает с результатами моделирования, однако отличия по ординатам достигают 10 ... 15 %. Это является ожидаемым результатом, так как в эксперименте невозможно было обеспечить абсолютно точный отрыв всей плоскости электромагнита от якоря. Возникновение даже мало-

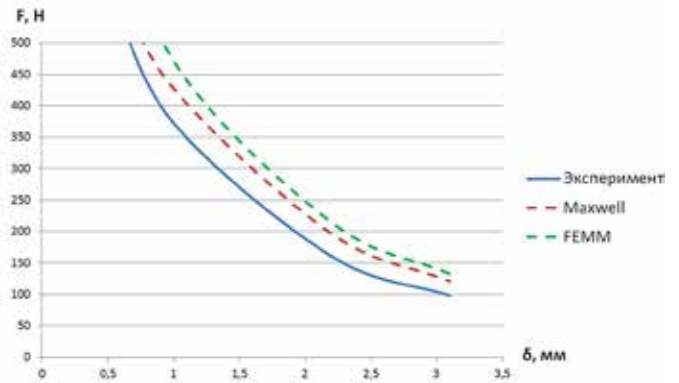


Рис.4. Зависимость силы притяжения (F) от немагнитного зазора (δ): результаты моделирования (штриховые линии); эксперимент (сплошная линия)

го значения непараллельности плоскостей электромагнита и якоря в момент отрыва приводит к меньшим значениям усилия, что и показано на рис. 4.

Учитывая, что программе FEMM сопутствуют меньшие затраты, ее применение следует признать предпочтительным.

■ Постановка задачи конструктивного расчета бесконтактного электромагнита

Определяющими исходными данными (условиями работы) являются требуемое усилие F электромагнита и заданный максимальный рабочий зазор δ .

Целью расчета являются конструктивные параметры электромагнита: диаметр $d_{\text{пр}}$ обмоточного провода и число витков W обмотки, а также внешний диаметр D , высота и сечение магнитопровода электромагнита, обеспечивающие минимальную массу m и потребляемую мощность P при выполнении принятых исходных данных. Напомним, что рассматривается электромагнит цилиндрической формы с магнитопроводом чашечного типа.

В расчете используются такие константы:

- удельное электрическое сопротивление меди обмотки $\rho_{20} = 17.3 \text{ мОм} \cdot \text{м} / \text{мм}^2$;

- температурный коэффициент сопротивления меди $\alpha = 0,0043$;

- магнитная постоянная $\mu_0 = 1,26 \text{ мкГн} / \text{м}$;

- удельное тепловое сопротивление электромагнита при нахождении его в воде $\rho_T = 0,0059 \text{ К} \cdot \text{м}^2 / \text{Вт}$, определяемое произведением теплового сопротивления R_T корпуса электромагнита на площадь боковой поверхности обмотки, это значение было принято как начальное с возможным последующим уточнением.

Для установления начального численного значения удельного теплового сопротивления был вы-

полнен специальный компьютерный эксперимент, в результате чего получены тепловые сопротивления корпуса электромагнита в предположении, что основной тепловой поток рассеивается через боковую цилиндрическую площадь оболочки магнитопровода. Для перехода к удельному тепловому сопротивлению было предложено использовать в качестве базисной величины площадь этой оболочки. При этом удельное тепловое сопротивление оказывается примерно постоянным для электромагнитов с различными размерами. Дальнейшие исследования подтвердили справедливость этого решения.

В дополнение к указанным выше исходным данным для расчета электромагнита также относятся:

- усилие электромагнита F при заданном максимально возможном зазоре δ между электромагнитом и внешним якорем;
- температура окружающей среды $t_p, ^\circ\text{C}$;
- максимально допустимая температура обмотки $t_M, ^\circ\text{C}$;
- коэффициент заполнения окна магнитопровода медью K_3 ;
- напряжение питания электромагнита $U, \text{В}$.

■ Методика расчета бесконтактного электромагнита

Известно, что усилие электромагнита определяется индукцией в рабочем зазоре и площадью электромагнитного взаимодействия:

$$F = \frac{B^2 S}{2\mu_0}, \quad (1)$$

где B – индукция в немагнитном зазоре между электромагнитом и внешним якорем, S – сечение зазора, т.е. площадь взаимодействия, μ_0 – магнитная постоянная.

Индукция, в свою очередь, пропорциональна магнитному потоку через зазор, а поток через нелинейную характеристику намагничивания связан с намагничивающей силой обмотки, равной произведению тока в обмотке на число ее витков. Указанная нелинейность зависит от геометрических соотношений между элементами магнитопровода и его магнитных свойств. Таким образом, принимая во внимание приведенную последовательность функциональных взаимосвязей, можно связать требуемое усилие электромагнита с ампер-витками его обмотки, которые должны размещаться в окне сердечника и полностью его заполнять. При этом сечение провода должно соответствовать протекающему току, чтобы перегрев провода не превышал допустимого значения,

а геометрические соотношения между элементами магнитопровода сердечника должны обеспечивать необходимую площадь окна при общем минимуме теплового сопротивления. Выполнив эти условия, получим электромагнит с минимальной возможной массой и обладающий требуемым усилием при максимальном рабочем зазоре.

Поперечное сечение электромагнита с указанием геометрических параметров приведено на рис. 5.

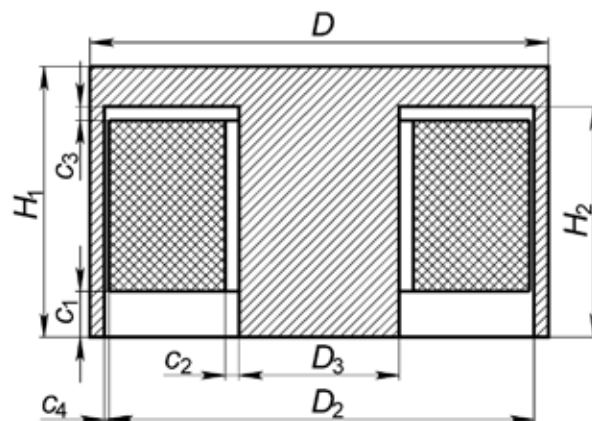


Рис. 5. Геометрические параметры электромагнита

Геометрические параметры электромагнита связаны следующими соотношениями:

сечение стержня магнитопровода

$$S_C = \frac{\pi}{4} D_3^2. \quad (2)$$

сечение цилиндрической части оболочки магнитопровода

$$S_O = \frac{\pi}{4} (D^2 - D_2^2). \quad (3)$$

Поперечное сечение магнитопровода при переходе магнитного потока со стержня на торцевую часть оболочки:

$$S_{CO} = \pi D_3 (H_1 - H_2). \quad (4)$$

площадь поверхности полюса стержня:

$$S_{PC} = \frac{\pi}{4} D_3^2. \quad (5)$$

площадь поверхности наружной цилиндрической стенки оболочки магнитопровода:

$$S_{PO} = \frac{\pi}{4} (D^2 - D_2^2). \quad (6)$$

За базовое сечение принята площадь торцевой поверхности оболочки магнитопровода:

$$S = \frac{\pi}{4} D^2. \quad (7)$$

Геометрические параметры электромагнита в относительных единицах определяются через отношение этих параметров к базовой площади (6).

На пути магнитного потока участкам магнитопровода с наименьшим сечением соответствует наибольшее значение индукции, при этом индукция не должна превышать допустимое значение. Этим участкам соответствуют сечения стержня S_C , сечение оболочки магнитопровода S_O и сечение S_{CO} , определяемое выражением (4). Очевидно, для минимизации массы магнитопровода и ограничения индукции на этих участках допустимым уровнем площади указанных сечений должны быть равны:

$$S_C^* = S_O^* = S_{CO}^*. \quad (8)$$

Это приводит к следующим соотношениям:

$$D_2^{*2} = 1 - D_3^{*2}, \quad H_2^* = H_1^* - \frac{D_3^*}{4}. \quad (9)$$

При этом из условия получения минимальной массы магнитопровода следует равенство площадей торцевых поверхностей (полюсов) стержня $S_{ПС}^*$ и оболочки $S_{ПО}^*$:

$$S_{ПС}^* = S_{ПО}^*. \quad (10)$$

В результате получается, что размеры магнитопровода определяются тремя параметрами: D , H_1^* , D_3^* , где D – наружный диаметр магнитопровода электромагнита, а H_1^* и D_3^* – соответственно высота магнитопровода и диаметр стержня в относительных единицах.

Остальные размерные соотношения магнитопровода определяются зависимостями:

$$\begin{cases} D_2^* = \sqrt{1 - D_3^{*2}} \\ H_2^* = H_1^* - \frac{D_3^*}{4} \end{cases}. \quad (11)$$

На основании последних соотношений можно заключить, что диаметр стержня ограничен минимальным и максимальным значениями:

$$\begin{cases} D_{3MIN}^* = 2\sqrt{\Delta d^* \cdot (1 - \Delta d^*)} \\ D_{3MAX}^* = \sqrt{0,5 - (c_2^* + c_2^* + r_o^*)^2 - (c_2^* + c_2^* + r_o^*)^2} \end{cases}. \quad (12)$$

Аналогично, для высоты магнитопровода существует минимальное значение:

$$H_{1MIN}^* = b_o^* + \frac{D_3^*}{4} + c_1^* + c_3^*, \quad (13)$$

где Δd^* — относительная толщина оболочки сердечника магнитопровода; r_o^* — относительная ширина обмотки; b_o^* — относительная толщина обмотки.

Связь между перегревом провода обмотки и МДС можно найти из следующих соотношений:

мощность тепловыделения обмотки:

$$Q = \rho \frac{l_{II}}{S_{II}} I^2 = \frac{\Delta t}{Rt}, \quad (14)$$

где l_{II} — длина провода обмотки и S_{II} — сечение провода обмотки:

$$l_{II} = \frac{\pi D w}{2} (D_2^* - c_4^* + D_3^* + c_2^*); \quad (15)$$

$$S_{II} = \frac{k_3 D^2}{2w} (D_2^* - c_4^* - D_3^* - c_2^*) (H_2^* - c_1^* - c_3^*); \quad (16)$$

ρ — удельное электрическое сопротивление провода обмотки;

Rt — тепловое сопротивление электромагнита, К/Вт;

Δt — перегрев обмотки относительно окружающей среды;

k_3 — коэффициент заполнения обмотки.

Для упрощения выводов можно параметры изоляционных элементов обмотки электромагнита $\tilde{n}_1^* \dots \tilde{n}_4^*$ (см. рис. 5) отнести в коэффициент k_3 заполнения окна магнитопровода медью провода обмотки. Тогда МДС обмотки электромагнита определится выражением:

$$F_{МДС} = \sqrt{\frac{k_3 Q D (D_2^* - D_3^*) H_2^*}{\pi \rho (D_2^* + D_3^*)}}. \quad (17)$$

Усилие электромагнита, рассчитанное по выражению (1), отличается от экспериментальных значений, полученных в натурном эксперименте (рис. 1), и это отличие объясняется как инструментальной ошибкой опыта, так и погрешностью модели (1). При экспериментальном определении тяговой характеристики (рис. 3) регистрировалось усилие в измерителе 4 и фиксировалось его максимальное значение в момент отрыва электромагнита от якоря. При этом оказалось практически невозможным обеспечить абсолютную параллельность рабочей поверхности электромагнита и плоскости внешнего якоря. Наличие совсем малого перекоса приводит к заниженным значениям измеряемого усилия. Сопоставление теоретической тяговой характеристики с экспериментальной привело к решению учесть указанное отличие путем введения постоянного коэффициента k_F .

С учетом этого усилие электромагнита (1) можно определить в виде:

$$F = 2k_F \frac{\mu_0 \cdot F_{\text{МДС}}^2 \cdot S_C}{\delta^2}. \quad (18)$$

Ранее было введено понятие удельного теплового сопротивления ρ_T электромагнита, равного произведению теплового сопротивления Rt на площадь боковой поверхности обмотки, считая, что тепловые потери в основном рассеиваются именно через эту поверхность. С учетом этого тепловые потери можно представить как:

$$Q = \frac{\Delta t}{\rho_T} = \frac{\pi \cdot \Delta t}{4\rho_T} \left(H_1^* - \frac{D_3^*}{4} \right) \cdot \left(\sqrt{1 - D_3^{*2}} \right). \quad (19)$$

В результате, используя выражения для МДС (17) и для тепловых потерь (19), можно из (19) получить зависимость усилия электромагнита в функции от относительного диаметра стержня D_3^* :

$$F = \frac{\pi k_F k_3 \mu_0 \Delta t}{8\rho\rho_{\text{ТЦ}} \delta^{*2}} \cdot D^3 \cdot D_3^{*2} \times \\ \times \left(\sqrt{1 - D_3^{*2}} \right) \frac{\sqrt{1 - D_3^{*2}} - D_3^*}{\sqrt{1 - D_3^{*2}} + D_3^*} \left(H_1^* - \frac{D_3^*}{4} \right). \quad (20)$$

Таким образом, допустимая из условия перегрева МДС (17) определяется диаметром D магнитопровода, относительной высотой электромагнита и тепловыми потерями в обмотке. Потери, в свою очередь, зависят от заданного перегрева, свойств окружающей среды (воздух или вода, наличие теплоотводящих элементов) и геометрических соотношений между элементами электромагнита. Если задаться диаметром D , то МДС будет определяться двумя факторами: удельным тепловым сопротивлением и относительной высотой окна электромагнита. При этом удельное тепловое сопротивление можно найти путем моделирования тепловых процессов в электромагните с использованием разработанной математической тепловой модели. Достоверность этой модели была подтверждена экспериментально (отличие удельного теплового сопротивления в эксперименте и в модели составило 2,4 %).

Зависимость (20) усилия от относительного диаметра стержня имеет экстремум, т.е. существует некоторое оптимальное значение D_3^* , для которого усилие является максимальным. Расчеты показали, что оптимальным значением является $D_3^* = 0,45$, в результате выражение (20) для усилия электромагнита принимает вид:

$$F = \frac{\pi \cdot k_F \cdot k_3 \cdot \mu_0 \cdot \Delta t}{8\rho \cdot \rho_{\text{ТЦ}} \cdot \delta^2} \cdot D^5 \cdot 0,0568 \cdot \left(H_1^* - 0,178 \right)^2. \quad (21)$$

Исследования тепловой модели электромагнита позволили определить тепловыделение обмотки. Расчеты были выполнены для различных значений высоты электромагнита, заданного перегрева обмотки относительно окружающей среды (вода, $\Delta t = 70^\circ\text{C}$) и оптимального значения диаметра стержня. Результаты исследования с использованием выражения (19) определили связь между удельным тепловым сопротивлением и относительной высотой электромагнита, графический вид которой приведен на рис. 6.

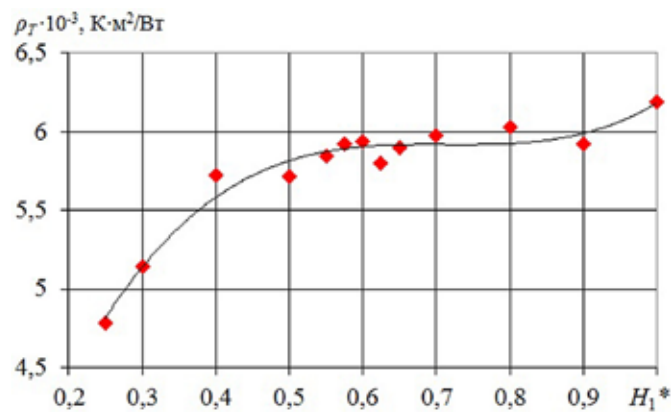


Рис. 6. Зависимость удельного теплового сопротивления от относительной высоты электромагнита

Из рис. 6 следует, что для относительной высоты электромагнита в диапазоне (0,55 ... 0,9) его удельное тепловое сопротивление может быть принято равным первоначальному приближению $\rho_{\text{ТЦ}} = 0,0059 \text{ K} \cdot \text{m}^2 / \text{Vt}$. В дальнейшем может потребоваться уточняющий расчет.

Аналогично, как и для диаметра стержня, существует оптимальное значение высоты H_1 электромагнита.

Введем понятие – коэффициент эффективности k_3 , равный отношению усилия электромагнита к его массе. Очевидно, что следует стремиться к максимальному значению k_3 , которое, при прочих постоянных условиях, можно определить как функцию относительной высоты электромагнита. Такая зависимость приведена на рис. 7. Так, для электромагнита диаметром $D = 200 \text{ мм}$ и рабочего зазора $\delta = 20 \text{ мм}$ по рис. 7 можно определить его оптимальную высоту.

При этом относительному значению зазора $\delta^* = \delta/D = 0,1$ и максимальной эффективности соответствует относительное значение высоты $H_1^* = 0,59$.

При допустимом усреднении можно считать, что оптимальное значение относительной высоты электромагнита составляет $H_1^* = 0,6$. На рис. 7 максимальные значения эффективности обозначены красной линией.

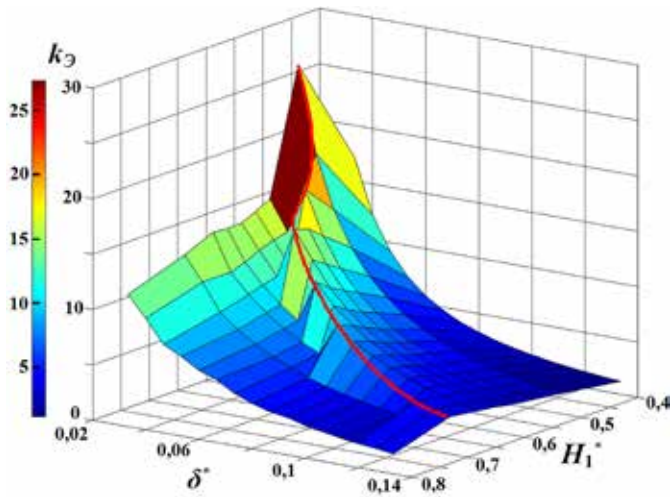


Рис. 7. Связь между коэффициентом эффективности электромагнита, рабочим зазором и высотой электромагнита

С учетом (21) можно получить выражение для диаметра электромагнита:

$$D = \sqrt[5]{\frac{791\rho \cdot \rho_T \cdot \delta^2 \cdot F}{\pi \cdot k_F \cdot k_3 \cdot \mu_0 \cdot \Delta t}}, \quad (22)$$

при этом размерные взаимосвязи между отдельными элементами будут определяться соотношениями:

$$D_2 = 0,89D; \quad D_3 = 0,45D; \quad H_1 = 0,6D; \quad H_2 = 0,49D. \quad (23)$$

Таким образом, МДС (17) обмотки с учетом выражений (19) и (22) можно представить в виде:

$$F_{МДС} = \sqrt{\frac{k_3 \cdot Q \cdot D \cdot H_2 \cdot (D_2 - D_3)}{\pi \rho \cdot (D_2 + D_3)}}, \quad (24)$$

а число витков W и диаметр провода d_{np} обмотки электромагнита определяются выражениями:

$$\begin{cases} W = \frac{k_3 \cdot U \cdot H_2 \cdot (D_2 - D_3)}{\pi \cdot \rho \cdot F_{МДС} \cdot (D_2 + D_3)} \\ d_{np} = \sqrt{\frac{H_2}{2W} \cdot (D - D_3)}. \end{cases} \quad (25)$$

Последовательность вычислений параметров электромагнита в виде блок-схемы алгоритма расчета показана на рис. 8.

На первом шаге решения блок 2 пропускается, а в блоке 3 блок-схемы определяется диаметр D (22), обеспечивающий заданное усилие притяжения F при рабочем зазоре δ и заданном допустимом перегреве Δt над температурой окружающей среды. При этом становятся известны размеры элементов магнитопровода (23).

Используя начальное значение удельного теплового сопротивления ρ_T , в блоке 4 с использованием тепловой модели электромагнита и полученных размеров электромагнита уточняется расчетное значение удельного теплового сопротивления ρ_T^P и если отличие полученного значения от принятого начального ρ_T не превышает, например 10 % (блок 5), то расчет переходит к блоку 6, где выполняется определение ампер-витков обмотки с использованием выражения (23). Далее, в блоке 7 путем математического моделирования с использованием модели FEMM определяется усилие F электромагнита и если полученный результат отличается от заданного усилия F_3 не более чем на 10 % (блок 8), то выполняется определение параметров обмотки: числа витков W и диаметра провода d_{np} (блок 9).

Полученные размеры окна магнитопровода должны соответствовать объему обмоточного провода, который, в свою очередь, обеспечивает требуемую намагничивающую силу $F_{МДС}$, определяемую выражением (24). Это соответствие определяется в блоке 10 посредством вычисления расчетного коэффициента заполнения окна k_3^P . Если окажется, что для размещения провода требуется окно большего размера ($k_3^P \geq k_3$), то расчет уточняется за счет перехода к блоку 2 повторения вычислений.

После проверки условия размещения полученного провода в окне сердечника магнитопровода (блок 10) расчет заканчивается.

Как следует из рис. 8, блок-схема расчета содержит три условных перехода (блоки 5, 8, 10), в которых осуществляется проверка отклонения расчетных значений соответствующих параметров от принятых исходных и при выполнении поставленных условий происходит переход к блоку 2 с целью уточнения этих параметров. Указанные расчетные циклы являются сходящимися, и примеры показывают, что число итераций не превышает двух.

Применение предложенной методики расчета покажем на примере определения конструктивных параметров удерживающего электромагнита со следующими исходными данными:

- рабочий зазор – $\delta = 5$ мм;
- требуемое усилие – $F = 50$ Н;
- начальное значение удельного теплового сопротивления электромагнита – $\rho_T = 59^\circ \text{C} \cdot \text{см}^2 / \text{Вт}$;
- заданный перегрев обмотки электромагнита над температурой окружающей среды – $\Delta t = 25$ °С;
- номинальное напряжение питания обмотки электромагнита – $U = 60$ В;
- начальное значение коэффициента заполнения окна магнитопровода медью обмотки – $k_3 = 0,49$.

В соответствии с принятым алгоритмом на первом шаге расчета в блоке 3 определится наружный

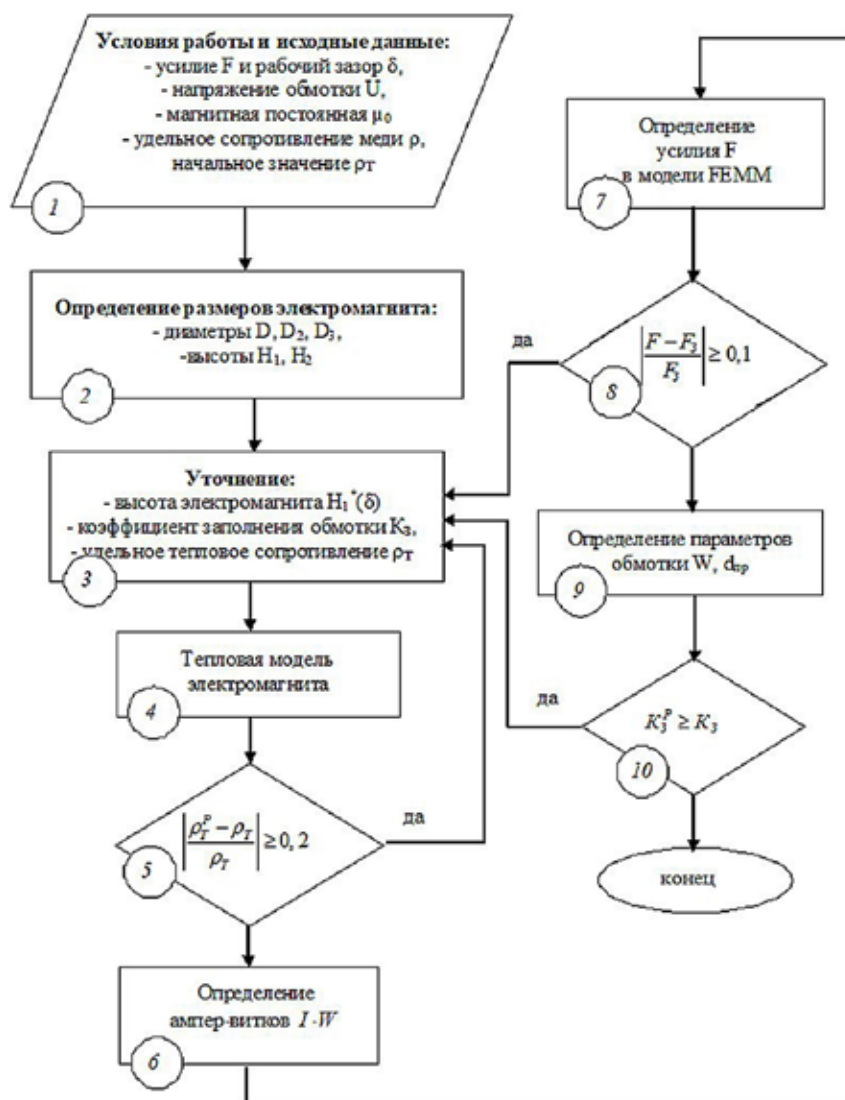


Рис. 8. Блок-схема алгоритма расчета параметров удерживающего электромагнита

диаметр D по выражению (22), обеспечивающий выполнение указанных исходных данных, а также, для принятого значения коэффициента усилия $k_f = 2,6$, постоянных физических параметров в виде магнитной постоянной $\mu_0 = 1,26 \text{ мкГн/м}$, удельного сопротивления меди обмотки $\rho_{20} = 17,3 \text{ мОм} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$, температурного коэффициента сопротивления меди $\alpha = 0,0043$ и начального значения относительной высоты $H_1^* = 0,6$ электромагнита.

Указанное начальное значение $H_1^* = 0,6$ получается из установленной связи между коэффициентом эффективности электромагнита, рабочим зазором и высотой электромагнита (рис. 7), откуда следует, что в реальном диапазоне рабочих зазоров коэффициент эффективности k_3 достигает максимальных значений при относительной высоте, равной 0,6.

Таким образом, расчет по выражению (22) дает значение диаметра электромагнита $D = 90 \text{ мм}$, при этом размеры всех элементов магнитопровода определяются по соотношениям (23).

В блоке 4, с использованием полученных в блоке 3 размеров магнитопровода, путем математического моделирования тепло-

вой модели электромагнита определяется расчетное значение удельного теплового сопротивления $\rho_T^P = 48,7^\circ \text{C} \cdot \text{см}^2 / \text{Вт}$.

В блоке 5 оценивается отличие расчетного значения удельного теплового сопротивления от принятого начального значения ($\rho_T = 59^\circ \text{C} \cdot \text{см}^2 / \text{Вт}$) и, поскольку разница превышает 10%, расчет возвращается в блок 2 и уточняется. В примере после уточнения размеров электромагнита по результатам второй итерации получено $\rho_T^P = 47^\circ \text{C} \cdot \text{см}^2 / \text{Вт}$.

Далее расчет переходит в блок 6, где выполняется определение ампер-витков по выражению (23), что дает результат $F_{МДС} = 1493 \text{ А} \cdot \text{в}$.

В блоке 7 посредством математического моделирования в программе FEMM определяется усилие F , затем в блоке 8 это значение сравнивается с заданным значением усилия F_3 . В примере получено $F = 53,4 \text{ Н}$, при этом, поскольку отличие не превышает 10%, осуществляется определение параметров обмотки в виде числа витков W и диаметра провода $d_{пр}$ в блоке 9. Если же условие блока 8 выполняется, то расчет переходит в блок 2, где уточняются размеры электромагнита и цикл вычислений повторяется.

Полученные параметры обмотки наряду с рассчитанными размерами электромагнита дают возможность в блоке 10 определить расчетный коэффициент k_3^P заполнения обмотки, который оказывается равен 0,69. Поскольку полученное значение этого коэффициента $k_3^P = 0,69$ превышает принятое начальное значение $k_3 = 0,49$, то расчет необходимо повторить путем перехода к блоку 2 и уточнения размеров электромагнита. После этой итерации расчет можно считать законченным с полученными результатами в виде размеров электромагнита и параметров обмотки, которые обеспечивают требуемое усилие удержания при заданном рабочем зазоре между электромагнитом и внешним якорем.

■ Заключение

Выполненное исследование позволяет решить важную практическую задачу проектирования удерживающих электромагнитов. Получены расчетные формулы, позволяющие определить габаритные размеры электромагнита и параметры его обмотки в виде числа витков и диаметра провода, соответствующих заданному усилию при максимальном рабочем зазоре и принятом напряжении питания. Исследование проведено при сочетании теоретических выводов и математического моделирования с контролем адекватности моделей параллельным натурным экспериментом. Предложенная методика расчета проиллюстрирована практическим примером определения конструктивных параметров электромагнита. Полученные результаты могут найти применение при проектировании подводных робототехнических систем, где требуется обеспечивать удержание подводных аппаратов на объекте при наличии определенного рабочего немагнитного зазора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сливинская А.Г. Электромагниты и постоянные магниты. Учебное пособие для студентов вузов. М.: Энергия, 1972. 248 с.
2. Лакота О.Б. Электрические и электронные аппараты. СПб, 2001. 57 с.
3. NauticExpo: официальный сайт. ТНПА для очистки корпуса. – URL: <https://www.nauticexpo.ru/prod/fleet-cleaner/product-194109-522908.html> (дата обращения: 20.10.2023 г.).
4. David Meeker. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual. 2015.
5. Ansys: официальный сайт. Ansys Maxwell Low Frequency EM Field Simulation – URL: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell#tab1-1> (дата обращения: 20.10.2023).
6. ELCUT: официальный сайт. Функциональность – Санкт-Петербург. – URL: https://elcut.ru/pack_r.htm (дата обращения: 20.10.2023).

Для цитирования:

Герасимов В.А., Комлев А.В., Филоженко А.Ю. ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА БЕСКОНТАКТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ ДЛЯ СРЕДСТВ ПОДВОДНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ // Подводные исследования и робототехника. 2023. № 4 (46). С. 4–15. DOI: 10.37102/1992-4429_2023_46_04_01. EDN: KTLIEW.

Об авторах

ГЕРАСИМОВ Владимир Александрович, канд. техн. наук, профессор, заведующий лабораторией энергетики подводных робототехнических комплексов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН

Адрес: Россия, 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, д. 5а

Область научных интересов: энергетика подводных аппаратов, бесконтактная передача электроэнергии, силовая преобразовательная техника

Тел.: +79025223824

E-mail: gerasimov@marine.febras.ru, fobos_v@mail.ru

ORCID 0000-0003-0246-475X

КОМЛЕВ Антон Владимирович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории энергетики подводных робототехнических комплексов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН

Адрес: Россия, 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, д. 5а

Область научных интересов: энергетика подводных аппаратов, бесконтактная передача электроэнергии, силовая преобразовательная техника

Тел. +79502884801

E-mail: kom86@bk.ru

ORCID 0000-0001-8862-8676

ФИЛОЖЕНКО Алексей Юрьевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории энергетики подводных робототехнических комплексов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН

Адрес: Россия, 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, д. 5а

Область научных интересов: энергетика подводных аппаратов, бесконтактная передача электроэнергии, силовая преобразовательная техника

Тел. +79140678041

E-mail: filozhenko_a@mail.ru

ORCID 0000-0003-1684-3849



RESEARCH AND DESIGN OF ELECTROMAGNETS FOR UNDERWATER ROBOTICS

V.A. Gerasimov, A.V. Komlev, A.Yu. Filozhenko

Relevance. In underwater robotics, a special group of electromagnets can be defined. These electromagnets are retaining by their purpose and work with a certain non-magnetic working gap between the outer anchor and the core. When designing a retaining electromagnet, it is necessary to determine the design parameters that provide the required attractive force at a given operating gap and supply voltage with restrictions on weight and overheating of the winding. There are no calculation methods in the literature that allow solving this problem. Therefore, the study of the characteristics of an electromagnet in holding modes and the development of a methodology for determining the design parameters of an electromagnet that meets the specified requirements is an urgent task.

Purpose and method. The purpose of this work is to present the study results of the characteristics and the developed methodology for calculating the electromagnets design used as retention (the presence of a certain non-magnetic gap is the operating mode.). The research methods combine analytical conclusions, field experiments and mathematical modeling.

Results. The results of the study contain the proposed methodology for calculating the retaining electromagnet design parameters. This methodology provides the necessary force of attraction at a given working gap while minimizing the mass at a certain supply voltage of the winding and the permissible temperature of overheating of the wire.

Key words: electromagnet, working gap, attractive force, permissible overheating, mass minimization, calculation method, thermal (thermal) modeling, modeling of electromagnetic fields.

References

1. Slivinskaya A.G. Elektromagnity i postoyannye magnity. Uchebnoe posobie dlya studentov vuzov [Electromagnets and permanent magnets. Study guide for university students]. Moscow, «Energiya». 1972 year. 248 p.
2. Lakota O.B. Elektricheskie i elektronnye apparaty [Electrical and electronic devices]. St. Petersburg Mining Institute. 2001 year. 57 p.
3. NauticExpo: official website. Hull cleaning ROV. – URL: <https://www.nauticexpo.com/prod/fleet-cleaner/product-194109-522908.html> (Date of application 20.10.2023).
4. David Meeker. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual. 2015.
5. Ansys: official website. Ansys Maxwell Low Frequency EM Field Simulation – URL: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell#tab1-1> (Date of application 20.10.2023).
6. ELCUT: official website. Functionality – . St. Petersburg. – URL: https://elcut.ru/pack_r.htm (Date of application 20.10.2023).

About the authors

GERASIMOV Vladimir Alexandrovich, Head of the Laboratory of Power Engineering of Underwater Robotic Complexes, Institute for Marine Technology Problems, Russian Academy of Sciences, Far Eastern Branch

Research interests: power engineering of underwater vehicles, contactless transmission of electricity, power converter equipment

Phone: +79025223824.

E-mail: gerasimov@marine.febras.ru, fobos_v@mail.ru.

ORCID: 0000-0003-0246-475X

KOMLEV Anton Vladimirovich, senior Researcher at the Laboratory of Power Engineering of Underwater Robotic Complexes, Institute for Marine Technology Problems, Russian Academy of Sciences, Far Eastern Branch

Research interests: power engineering of underwater vehicles, contactless transmission of electricity, power converter equipment

Phone: +79502884801. **E-mail:** kom86@bk.ru.

ORCID: 0000-0001-8862-8676

FILOZHENKO Alexey Yuryevich, senior Researcher at the Laboratory of Power Engineering of Underwater Robotic Complexes, Institute for Marine Technology Problems, Russian Academy of Sciences, Far Eastern Branch

Research interests: power engineering of underwater vehicles, contactless transmission of electricity, power converter equipment

Phone: +79140678041. **E-mail:** filozhenko_a@mail.ru

ORCID: 0000-0003-1684-3849