

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПЕРЕДАЧИ ЗАДАННОЙ МОЩНОСТИ В СИСТЕМЕ БЕСКОНТАКТНОГО ЗАРЯДА АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ПОДВОДНОГО АППАРАТА

В.А. Герасимов, М.В. Красковский, А.Ю. Филоженко, П.И. Чепурин

Институт проблем морских технологий, г. Владивосток, Россия

Объектом исследования в работе является высокочастотный силовой трансформатор с разделяющимися первичной и вторичной частями, который входит в состав системы бесконтактной передачи электроэнергии на автономный обитаемый подводный аппарат (АНПА) для зарядки его аккумуляторных батарей. В качестве задачи исследования поставлено обоснование и разработка методики расчета конструктивных параметров трансформатора, отвечающих поставленным требованиям по передаваемой мощности при заданных условиях эксплуатации.

В основу исследований положено математическое моделирование электромагнитных процессов в трансформаторе в программном пакете ANSYS Maxwell в сочетании с натурным экспериментом. Выделены характеризующие параметры в виде коэффициента магнитной связи и удельной индуктивности витка обмотки и обосновано их применение для полной идентификации свойств объекта. Предложена система относительных единиц, в которой характеризующие параметры имеют постоянное значение для любых сердечников одного типоразмера, что позволяет легко выполнять масштабирование результатов полученных технических решений при изменении требований по передаваемой мощности.

Предложена методика определения аппроксимирующих полиномов, связывающих массивы значений коэффициента связи и удельной индуктивности с относительными значениями зазоров между контактными поверхностями частей трансформатора и межосевыми смещениями, появление которых возможно при выполнении автоматического причаливания подводного аппарата к базе.

Выполненные исследования позволили предложить методику расчета основных конструктивных параметров трансформаторов при исходных данных в виде сочетания заданных электрических характеристик и предъявляемых ограничений по точности стыковки контактных поверхностей частей трансформатора. Экспериментальные натурные исследования выбранных конструктивов трансформаторов, аналогичных принятым при моделировании, убедительно подтверждают достоверность приведенных результатов.

Полученные результаты относятся к ферритовым сердечникам чашечного типа, однако, принятые в исследованиях подходы дают возможность расширения методики расчета к другим конструктивным обликам трансформаторов, которые могут найти применение в системе бесконтактной зарядки аккумуляторных батарей АНПА.

Ключевые слова: подводный аппарат, система бесконтактного заряда, высокочастотный силовой трансформатор, индуктивность, коэффициент магнитной связи, математическое моделирование, натурный эксперимент, конструктивные параметры.

Введение

Задача зарядки аккумуляторных батарей автономного обитаемого подводного аппарата (АНПА) связана с проблемой передачи на его борт электроэнергии [1–3]. Эта операция может быть осуществлена как контактным способом при непосредственном электрическом соединении, так и бесконтактно за счет индукционной связи между катушками специального трансформатора [4–10]. В некоторых случаях зарядка аккумуляторных батарей должна осуществляться под водой, при этом бесконтактный способ зарядки имеет существенные преимущества. Так, например, при организации длительного подводного базирования автономного обитаемого подводного аппарата (АНПА) с использованием донного причального устройства (ДПУ) передача электроэнергии на АНПА бесконтактным способом имеет такие достоинства как пониженные требования к точности автоматического причаливания подводного аппа-

рата к ДПУ, исключаются из системы передачи подвижные механизмы для сочленения электрических контактов, снимаются проблемы, связанные с коррозией контактов, их обрастанием морскими организмами и, соответственно, с необходимостью периодического обслуживания [11, 12]. При этом также упрощается автоматизация процесса зарядки аккумуляторных батарей АНПА и повышается надежность системы в целом.

Функциональная схема системы бесконтактной передачи электроэнергии на АНПА для зарядки его аккумуляторных батарей показана на рис. 1.

Основными элементами этой системы являются: аккумуляторная батарея (АБ), автоматическое зарядное устройство (АЗУ), высокочастотный трансформатор (ВчТ) с разделенными первичной (Т1) и вторичной (Т2) обмотками и автономный инвертор напряжения (АИН) [11, 13].

На рис. 1 не показан подвод электрической энергии на ДПУ. Эта задача, наряду с передачей

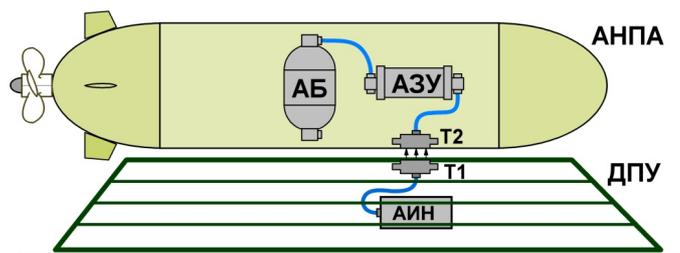


Рис. 1. Функциональная схема системы бесконтактной зарядки аккумуляторных батарей АНПА

энергии от ДПУ на АНПА, является второй составляющей общей проблемы электрообеспечения АНПА и может быть решена, например, путем применения специального подводного кабеля между ДПУ и береговым центром управления, который содержит как информационные волоконно-оптические линии, так и силовые жилы для передачи электроэнергии. Принципиально возможно также автономное электрообеспечение ДПУ с использованием термоэлектрических генераторов с радиоизотопными источниками тепла (РИТЭГ). Таким образом, можно принять, что к входу АИН подводится напряжение постоянного тока с заданными параметрами.

АИН преобразует входное напряжение постоянного тока в переменное выходное высокочастотное напряжение прямоугольной формы, которое подключено к первичной обмотке Т1. При совмещении контактных поверхностей первичной и вторичной частей трансформатора ВчТ возникает магнитная связь между его обмотками и осуществляется трансформация напряжения во вторичную обмотку Т2. Вторичная обмотка подключена к входу АЗУ, которое выполняет необходимые преобразования электроэнергии в соответствии с требуемым алгоритмом зарядки АБ.

Первичная и вторичная части ВчТ представляют собой отдельные прочные герметичные оболочки, в которые помещены его обмотки, при этом первичная часть ВчТ является передающей и устанавливается на ДПУ, а вторичная часть – приемной и размещается на АНПА (см. рис. 1). Каждая из оболочек имеет выполненную из изоляционного материала контактную стенку, толщина которой достигает нескольких миллиметров. В режиме передачи энергии оси обмоток должны совпадать, а их торцы находиться на минимальном расстоянии друг относительно друга [11]. За счет немагнитного зазора между обмотками, равного суммарной толщине контактных стенок первичной и вторичной частей, трансформатор имеет пониженное значение коэффициента k_M магнитной связи. Этот коэффициент $k_M = M / \sqrt{L_1 L_2}$ определяется взаимной индуктивностью M между обмотками ВчТ, а также собственными индуктивностями L_1 и L_2 его первичной и вторичной обмоток.

Как известно, с уменьшением коэффициента магнитной связи для сохранения неизменного уровня передаваемой активной мощности необходимо увеличение намагничивающей составляющей первичного тока трансформатора. Это, в свою очередь, приводит к повышенным токовым нагрузкам на силовые ключи АИН и на провод первичной обмотки ВчТ, снижает эффективность передачи электроэнергии и создает проблемы охлаждения нагруженных компонентов [11]. Коэффициент магнитной связи является в значительной мере интегральным показателем, определяющим в конечном итоге эффективность процесса передачи электроэнергии в рассматриваемой системе, поэтому в качестве критерия оценки качественных характеристик ВчТ может быть выбран именно этот параметр. Располагая значением коэффициента магнитной связи между обмотками для различных конструктивных обликов ВчТ, можно проводить их сравнительную оценку и делать заключение о предпочтительности определенных конструктивных решений, соответствующих максимальной эффективности устройства при выполнении ряда специфических ограничений. Кроме этого, в качестве параметра, способствующего более полной идентификации характеристик ВчТ, можно принять значение удельной индуктивности L витка его обмотки.

Определение коэффициента магнитной связи, учитывающего все особенности конфигурации обмоток, материал и форму магнитных экранов, а также конструкцию и материал прочных герметичных оболочек первичной и вторичной частей трансформатора, является непростой задачей [14–16]. Можно предположить, что успех в этом решении будет получен при рациональном сочетании математического моделирования и экспериментального натурного исследования, взаимно дополняющих друг друга.

С учетом вышеизложенного может быть поставлена актуальная задача разработки методического подхода к достоверному определению коэффициента магнитной связи и удельной индуктивности витка для трансформатора с разделяющимися передающей и приемной частями в зависимости от его конструктивного облика и от погрешностей стыковки его частей. При этом будем считать, что

в понятие «конструктивный облик» входят характеристики материала и конфигурации магнитных экранов обмоток и оболочек частей трансформатора, а также форма исполнения обмоток и их электрические параметры. Представляет также интерес сравнительная оценка чувствительности коэффициента связи от зазора между обмотками и их осевого смещения для различных конструктивных исполнений ВЧТ. Результаты такой оценки особенно актуальны в условиях автоматического приключения АНПА к ДПУ, которое может сопровождаться определенной погрешностью в совмещении контактных поверхностей ВЧТ.

Под специфическими ограничениями на конструктивный облик ВЧТ понимается требование сохранения гидродинамических характеристик обтекаемости корпуса АНПА при установке на нем приемной части ВЧТ при минимально возможной ее массе и заданных габаритных ограничениях.

С учетом приведенных обоснований в качестве количественных характеристик, определяемых в результате математического моделирования, выбраны коэффициент магнитной связи k_M между передающей и приемной обмотками ВЧТ и удельная индуктивность Λ витка. Эти характеристики наиболее удобно использовать для сравнительной оценки эффективности различных исполнений ВЧТ, поскольку являются максимально обобщенными и, кроме этого, легко измеряются в натурном эксперименте. Такой подход дает возможность сопоставлять результаты компьютерного и натурального экспериментов для выбранной конкретной конструкции ВЧТ, делать заключение о точности воспроизведения процессов в модели и создавать условия для распространения методики составления модели на другие исполнения ВЧТ.

Исследование выполнялось путем математического моделирования, а результаты натурального эксперимента с ограниченным числом типоразмеров сердечников использовались как «контрольные точки» для оценки адекватности соответствующей математической модели.

Математическое моделирование силового высокочастотного трансформатора

Для моделирования электромагнитных процессов в ВЧТ системы бесконтактного заряда предпочтение было отдано ведущему программному продукту для проектирования и исследования двумерных и трехмерных электромагнитных полей – ANSYS Maxwell (в дальнейшем Maxwell) [17]. Выбор этого пакета для решения рассматриваемой задачи определяется возможностью учета «тонких» особенностей исследуемой конструкции с достаточной точностью результатов расчета в трехмерной постановке и приемлемом времени решения по сравнению с идентичными программными комплексами.

В качестве примера для исследований выбраны чашечные сердечники цилиндрической формы фирмы Epcos AG типа PS 68×14,5 и РСН 150×30, выполненные из силового низкочастотного феррита. Такой выбор соответствует принятому в практических работах авторов диапазону передаваемой мощности от сотен ватт до нескольких киловатт, свойства материалов этих сердечников отвечают условиям применения, а их геометрические размеры отвечают требованиям размещения на АНПА среднего и большого класса. В условиях ограниченного финансирования научных исследований является также важным наличие указанных сердечников у авторов, что позволяет провести необходимые измерения в натуральных условиях, использовать полученные результаты как «контрольные точки» для оценки качества соответствующих математических моделей ВЧТ и при этом сопровождать решение поставленной задачи минимальными материальными затратами.

В упрощенном виде конструкцию отдельной части ВЧТ (первичной или вторичной) можно представить, как показано на рис. 2. Здесь исключены малые крепежные детали, учёт которых практически не сказывается на точности результатов, но приводит к увеличению времени решения. Торцевая стенка немагнитной оболочки конструк-

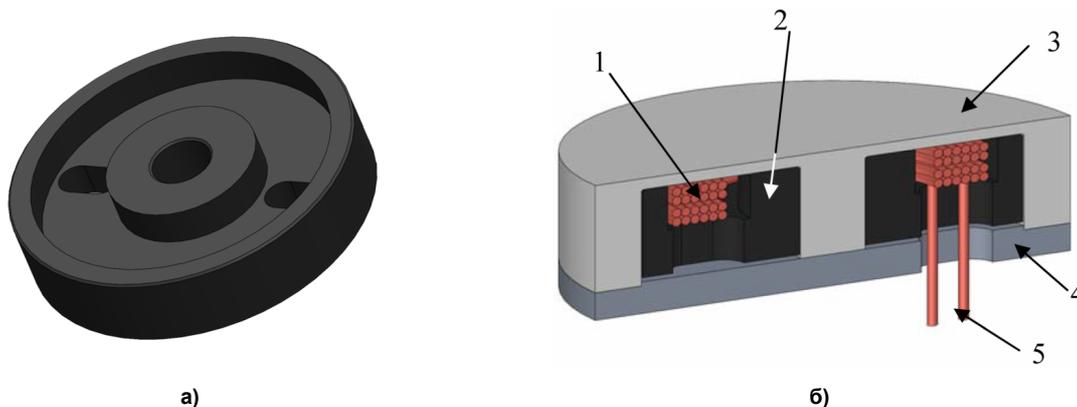


Рис. 2. Упрощенное изображение конструкции одной части ВЧТ: а – внешний вид сердечника чашечного типа; б – отдельная часть ВЧТ в сборе: 1 – обмотка, 2 – сердечник, 3 – немагнитная оболочка корпуса, 4 – металлическая крышка корпуса, 5 – выводы обмотки

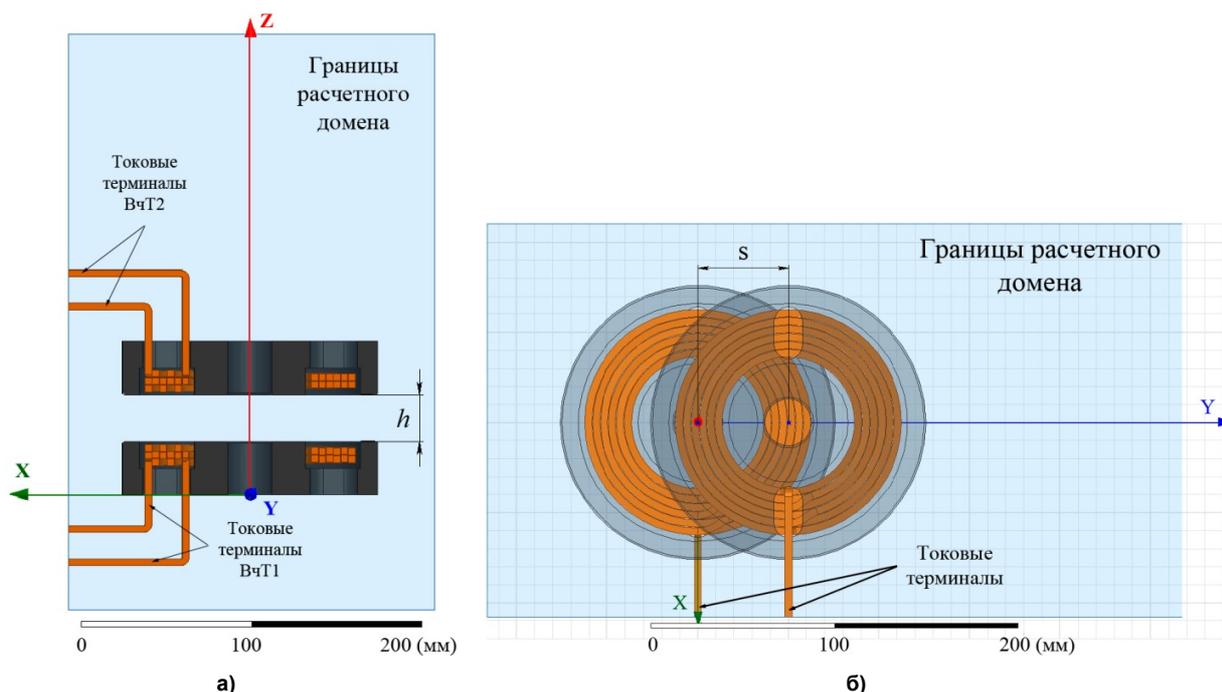


Рис. 3. Расчетная модель трансформатора с чашечными ферритовыми магнитопроводами PCN 150×30 и многослойными медными обмотками: а – осевое сечение; б – вид сверху с полупрозрачными сердечниками

ции является контактной стенкой, которая в режиме передачи электроэнергии соприкасается с аналогичной стенкой второй части ВчТ. Суммарная толщина этих двух стенок определяет немагнитный зазор на пути магнитного потока трансформатора. В качестве примера построения модели ВчТ, выполненной в конструкторской программной среде Solidworks, на рис. 3 приведена расчетная схема моделирования катушки ВчТ, соответствующая конструкции на рис. 2 и выполненная с использованием чашечных ферритовых магнитопроводов Epcos PCN 150×30 с уложенными спиральными многослойными медными обмотками по двенадцать витков каждая.

При автоматическом причаливании АНПА к ДПУ возможны некоторые ошибки стыковки. По этой причине представляет интерес количественные значения отмеченных параметров – коэффициента связи k_M и удельной индуктивности Λ в зависимости от ошибки неточного совмещения контактных поверхностей передающей и приемной частей ВчТ. Эти ошибки можно определить зазором между передающей и приемной обмотками трансформатора и смещением между их осями. На расчетной схеме (см. рис. 3) зазор между сердечниками трансформатора обозначен как h и смещение между осями обмоток трансформатора – s .

Важным этапом подготовки задачи для моделирования является выбор свойств дискретизации исследуемого объекта в форме сеточной модели. При анализе объектов со сложной конфигурацией построение сеточной модели занимает значительное время и является одной из доминирующих

задач на этапе подготовки модели к процессу моделирования. По ряду причин можно отдать предпочтение новой и устойчивой технологии построения объемной сетки TAU mesher, которая позволяет задавать исходную сетку и затем сгущать конечно-элементную сетку по мере выполнения расчетов. При этом форма поперечного сечения провода обмотки при моделировании для сокращения времени разбиения и уменьшения количества конечных элементов совокупной модели принята в виде прямоугольника [18, 19].

В действительности провод обмотки ВчТ представляет собой литцендрат, состоящий из нескольких сотен или тысяч изолированных проводников. Однако, представляя этот провод в виде цельного прямоугольника при сохранении количества витков, а также эквивалентной площади поперечного сечения и среднего диаметра обмотки, можно получить требуемое упрощение модели при сохранении необходимой точности, что подтверждается результатами контрольных натуральных экспериментов.

С учетом особенностей применения ВчТ в системе бесконтактной зарядки аккумуляторных батарей АНПА поставленная задача создания математической модели трансформатора и проведения с ней компьютерного эксперимента в программе Maxwell должна решаться с учетом следующих факторов.

1. Модель обмотки и ее расположение в пределах расчетного домена должны быть такими, чтобы торец токового терминала (вывода) обмотки обязательно был бы плоский и располагался на границе домена, как показано на рис. 3.

При этом токовая нагрузка в настройках программы должна задаваться для каждого токового терминала в отдельности. Для предварительных расчетов обмотку трансформатора можно упростить, если представить ее в виде одного массивного дискового витка, для которого сохраняется прежнее значение магнитодвижущей силы. Такое упрощение позволяет существенно сократить время расчета за счет увеличения шага сетки.

2. Граничные условия (Boundary condition), задаваемые по умолчанию (No Boundary Assigned), реализуют особенности магнитного поля внутри расчетной области, при которых магнитный поток не может пересечь внешние грани расчетного домена. Этому условию соответствует расчетная область, расширенная в несколько раз по сравнению с суммарным объемом моделируемого объекта. При этом должны быть сведены к минимуму расчетные энергетические погрешности системы (Energy Error), влияющие на сходимость результатов моделирования.

3. Для всех объектов моделирования необходимо задать материалы с их уникальными свойствами и характеристиками. Для расчетного домена материалом служит вакуум. Для двух обмоток ВЧТ назначается, соответственно, материал медь. Для ферромагнитных сердечников, в зависимости от их марок материалов, можно в табличной форме задавать начальную кривую намагничивания $B(H)$. Для этого рекомендуется воспользоваться фирменной утилитой EPCOS Ferrite Magnetic Design Tool, которая позволяет строить различные характеристики и функциональные зависимости для наиболее распространенных ферритовых материалов.

4. На завершающем этапе подготовки задачи к решению задаются параметры решателя (Solve setup), где указываются: 1 – максимальное количество проходов (Maximum Number of Passes); 2 – конечная ошибка энергии в процентах (Percent Error); 3 – увеличение количества конечных элементов модели за один проход в процентах (Refinement Per Pass); 4 – минимальное количество проходов (Minimum Number of Passes); 5 – минимальное количество проходов для достижения требуемой конвергенции (Minimum Converged Passes); 6 – уровень нелинейной остаточной погрешности (Nonlinear Residual).

Минимальное количество проходов, необходимое для достижения требуемой точности решения, можно определить с использованием графика зависимости сходимости погрешности энергии модели (Energy Error, %) от количества указанных проходов (Passes). Так, например, на рис. 4 показан такой график для математической модели ВЧТ, где магнитопроводы первичной и вторичной частей трансформатора выполнены на чашечных сердечниках РСН 150×30.

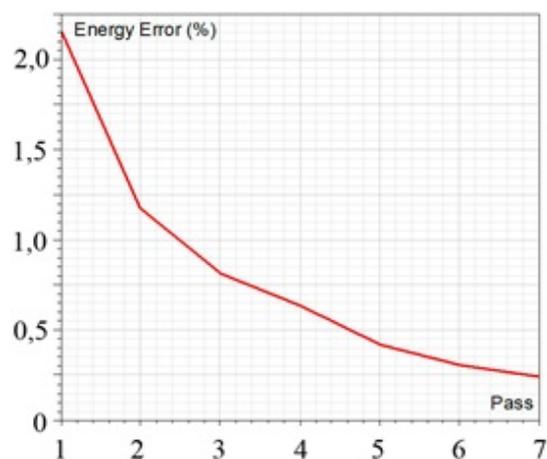


Рис. 4. График сходимости погрешности энергии модели в зависимости от количества проходов

Анализ результатов математического моделирования и последующих натурных экспериментов с ВЧТ показывает, что некоторые относительные параметры являются постоянными для магнитопроводов разного размера, но одного типа. Для сердечников чашечного типа в качестве базовой величины для относительных единиц может быть принят, например, наружный диаметр сердечника D_{MAX} .

В качестве относительного параметра можно ввести, например, понятие удельной относительной индуктивности витка обмотки трансформатора и определить ее в виде

$$\Lambda = \frac{L}{w^2 D_{MAX}}, \quad (1)$$

где L – собственная индуктивность обмотки; w – число витков обмотки; D_{MAX} – наружный диаметр сердечника чашечного типа.

Используя параметр (1) в сочетании с коэффициентом магнитной связи

$$k_M = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}, \quad (2)$$

где M – взаимная индуктивность обмоток ВЧТ, а L_1, L_2 – собственные индуктивности обмоток ВЧТ, можно полностью определить свойства конкретного ВЧТ. В этом случае легко выполняется масштабное преобразование некоторого исходного варианта ВЧТ в другой конструктив трансформатора, меньшей или большей мощности, но выполненного на сердечниках аналогичного типа.

Для анализа влияния зазора h между сердечниками и смещения s между их осями на эффективность передачи электроэнергии также удобно пользоваться относительным зазором δ и относительным смещением σ , которые, как и удельную относительную индуктивность витка (1), можно определить в отношении к наружному диаметру сердечника D_{MAX} :

$$\delta = \frac{h}{D_{MAX}}, \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{s}{D_{MAX}}. \quad (4)$$

Приведенный подход упрощает процесс сопоставления и обобщения результатов моделирования и натурального эксперимента, в которых могут быть использованы сердечники с отличающимися размерами и обмотки с различными числами витков.

Экспериментальные исследования

Запланированные исследования выполнялись с трансформаторами, в которых сочетания первичных и вторичных частей соответствовали комбинациям, представленным ниже. При этом взаимное расположение ферритовых сердечников с обмотками ВчТ и иллюстрация ошибок стыковки показаны на рис. 5.

В исследованиях использовались три сочетания сердечников:

1 – первичная и вторичная части ВчТ выполнены на одинаковых сердечниках РСН 150×30 с наружным диаметром 150 мм и высотой 30 мм;

2 – первичная и вторичная части ВчТ – на одинаковых сердечниках PS 68×14,5 с наружным диаметром 68 мм и высотой 14,5 мм;

3 – первичная часть ВчТ – на сердечнике РСН 150×30, а вторичная часть – на сердечнике PS 68×14,5.

Размеры ВчТ имеют определенную взаимосвязь с диаметром корпуса АНПА, что объясняется требованием обеспечения минимальных массогабаритных показателей при максимальном совпадении внешних обводов АНПА с наружными очертаниями корпуса ВчТ в месте установки его приемной части.

Определение характеристик трансформаторов с указанными сочетаниями сердечников проводилось путем математического моделирования в Maxwell и в результате натурных испытаний маке-

тов ВчТ, выполненных с такими же сердечниками. В результате этих исследований получены зависимости, показывающие связь параметров k_M и Λ трансформатора со значениями погрешностей h и s совмещения стыковочных поверхностей его первичной и вторичной частей.

Важно отметить, что предложенный способ представления параметров трансформатора в относительном виде для одного типоразмера (например, как рассмотрено для сердечников чашечного типа) является удачным решением, поскольку позволяет при проектировании ВчТ оперировать неизменным значением коэффициента магнитной связи вне зависимости от числа витков обмотки, диаметра сердечника, способа укладки витков обмотки в окне сердечника, а также коэффициента заполнения этого окна для конкретного относительного зазора.

Благодаря этому представляется возможность выполнения масштабных пересчетов между трансформаторами разной мощности, что позволяет подойти к созданию методики конструктивного расчета ВчТ по заданным требованиям.

Полученные при моделировании в программе Maxwell двумерные массивы коэффициента связи и удельной индуктивности витка для различных значений δ и σ можно аппроксимировать с помощью непрерывных функций в виде сумм полиномов:

$$k_M = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m a_{ij} \left(\frac{h}{D_{MAX}} \right)^i \left(\frac{s}{D_{MAX}} \right)^j, \quad (5)$$

$$\Lambda = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m b_{ij} \left(\frac{h}{D_{MAX}} \right)^i \left(\frac{s}{D_{MAX}} \right)^j, \quad (6)$$

где a_{ij} , b_{ij} – коэффициенты аппроксимирующих полиномов для коэффициента связи и удельной индуктивности витка обмотки ВчТ соответственно; n , m – степени полиномов.

Наглядное представление о взаимосвязи между параметрами трансформатора и зазором между сердечниками, а также межосевым смещением

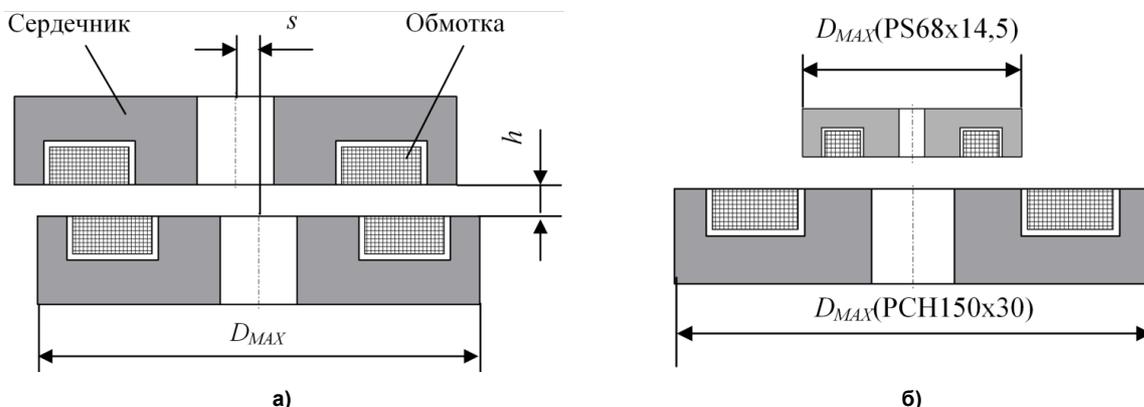


Рис. 5. Сочетания ферритовых сердечников при определении характеристик ВчТ: а – первичная и вторичная части ВчТ выполнены на одинаковых сердечниках; б – первичная часть ВчТ выполнена на сердечнике РСН 150×30, а вторичная часть – на PS 68×14,5

дает рис. 6, на котором массивы коэффициентов связи и значений удельной индуктивности витка для ВчТ с сердечниками РСН 150×30 представлены в виде трехмерных поверхностей. Для сердечников меньшего размера PS 68×14,5 картина зависимости относительного коэффициента связи k_M и удельной индуктивности Λ от относительных значений зазора δ и смещения σ будет совпадать с поверхностью, показанной для первого сердечника.

Для трансформаторов с сочетанием сердечников РСН 150×30 и PS 68×14,5 (рис. 5, б) ход рассуждений остается прежним, изменяются лишь численные значения коэффициентов a_{ij} , b_{ij} полиномов (5), (6). При этом за базу относительных единиц следует принять диаметр меньшего сердечника. Следует отметить, что последнее сочетание может найти применение в системах бесконтактной передачи, где возможны увеличенные ошибки стыковки первичной и вторичной частей ВчТ.

Параметры $k_M(\sigma)$ и $\Lambda(\sigma)$, рассчитанные для математической модели трансформатора и измеренные в натурном эксперименте для его соответствующей реальной конструкции, имеют хорошее совпадение (ошибка не превышает 4...6%), что подтверждает адекватность модели трансформатора реальным электромагнитным процессам и свидетельствует о справедливости принятых при построении модели допущениях.

Полученные зависимости (5) и (6) могут быть положены в основу методики определения конструктивных параметров ВчТ, обеспечивающих заданные требования к системе бесконтактной передачи электроэнергии.

1. В качестве исходных данных в этой методике принимаются:

- номинальное напряжение заряженной аккумуляторной батареи U_{AB} ;

- номинальный ток зарядки батареи I_{AB} ;
- частота коммутации инвертора, нагруженного на первичную обмотку ВчТ f ;
- плотность тока в обмотке j ;
- возможный зазор между контактными поверхностями первичной и вторичной частей трансформатора h_Δ ;
- возможное межосевое смещение ВчТ s .

2. На первом этапе определяется наружный диаметр D_{MAX} сердечника в зависимости от возможной ошибки h_Δ совмещения частей ВчТ из опытного соотношения $D_{MAX} \cong (10...20)h_\Delta$. Полный зазор $h = h_\Delta + h_K$, необходимый для дальнейших расчетов, находится как сумма h_Δ и общей толщины h_K контактных стенок герметичных оболочек первичной и вторичной частей ВчТ.

3. Определяются относительные значения зазора δ и межосевого смещения σ по формулам (3) и (4).

4. Определяется сечение провода вторичной обмотки ВчТ $S_2 = I_{AB} / j$.

5. С помощью полиномов (5) и (6) определяются значения коэффициента связи k_M и удельной индуктивности витка Λ для вычисленных значений δ и σ . Следует отметить, что здесь используется суммарный относительный зазор $\delta = \delta_K + \delta_\Delta$.

6. Число витков вторичной обмотки определяется по выражению, которое несложно получить путем преобразования основных соотношений между напряжениями и токами на вторичной стороне трансформатора ВчТ при условии прямоугольной формы напряжения на выходе инвертора и треугольной формы тока [20]:

$$w_2 = \sqrt{\frac{k_{DC} U_{AB}}{4\sqrt{3} \cdot f I_{AB} \Lambda (1 - k_M^2) D_{MAX}}} \quad (7)$$

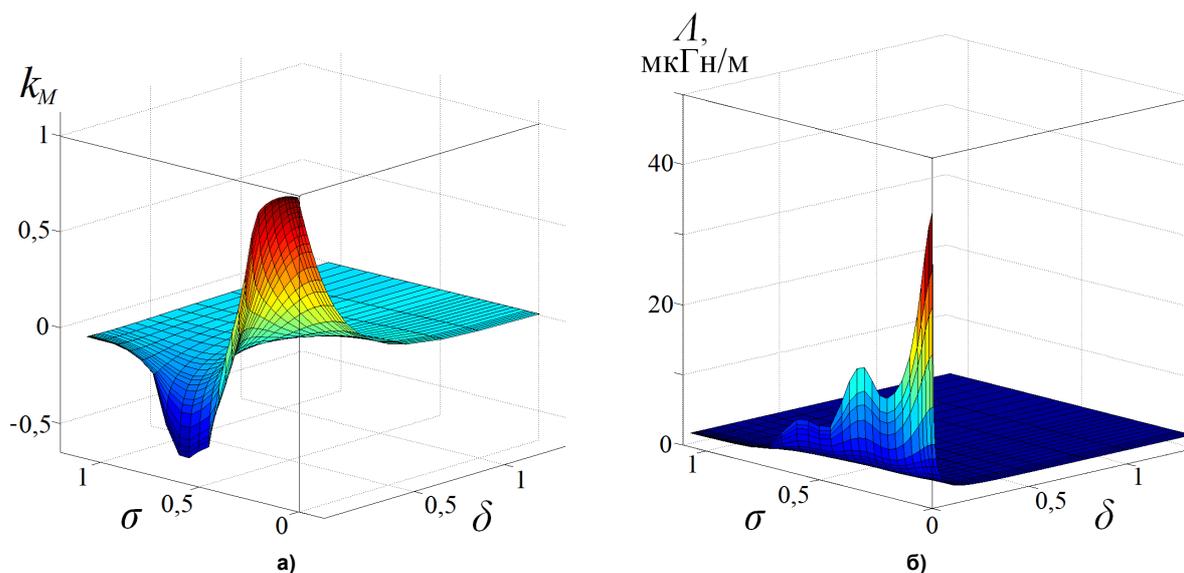


Рис. 6. Обобщенные зависимости коэффициента связи k_M и удельной индуктивности витка Λ для ВчТ с сердечниками РСН 150×30 в функции относительного зазора δ и смещения σ

7. Определяется число витков w_1 первичной обмотки ВчТ:

$$w_1 = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{AB} w_2}{k_M j S_1}. \quad (8)$$

В выражении (8) необходимо задаться сечением S_1 провода первичной обмотки. На первом шаге решения можно принять $S_1 = S_2$.

8. Для принятого значения D_{\max} определяется число витков, которое можно разместить в окне этого сердечника для выбранного типа провода. Обмотки высокочастотных трансформаторов принято изготавливать из провода литцендрата, при этом коэффициент заполнения окна медью получается малым. Например, для одной из разработок для обмотки трансформатора авторы использовали провод литцендрат, составленный из 300 медных проводников диаметром 0,1 мм, типа Rupalit profil прямоугольного сечения производства фирмы DACPOL. При сечении по меди 2,35 мм² геометрические размеры поперечного сечения такого провода составляют 1,6 × 2,5 мм, т. е. площадь поперечного сечения равна 4 мм². Если требуемое число витков w_1 не помещается в окне принятого типоразмера сердечника, то выбирается больший размер из предлагаемого ряда сердечников, или принимается решение увеличить число ВчТ, которые могут включаться последовательно или параллельно.

9. Определяется действующее значение напряжения U_1 на первичной обмотке ВчТ (практически равно напряжению питания автономного инвертора) в соответствии с принятыми значениями частоты f коммутации инвертора и числа витков w_1 первичной обмотки ВчТ:

$$U_1 = \frac{\sqrt{3} \cdot k_{DC} U_{AB} w_1}{k_M w_2}. \quad (9)$$

В результате выполнения расчетов по предложенной методике можно получить основные конструктивные параметры трансформатора системы бесконтактной передачи электроэнергии: тип чашечного сердечника, число витков и сечение провода первичной и вторичной обмоток, соответствующие заданным требованиям. Следует отметить, что эти параметры могут быть первым приближением, которое при необходимости корректируются изменением, например, частоты f коммутации инвертора или напряжением питания инвертора U_1 .

Заключение

Предложен подход к определению конструктивных параметров трансформатора системы бесконтактной передачи электроэнергии для заданных исходных условий, определяющих основные энергетические характеристики системы. Подход предлагается в виде частной методики для случая выполнения трансформаторов на чашечных сер-

дечниках. Выбранный способ представления параметров в относительном виде позволяет исключительно просто масштабировать результаты решения с целью изменения передаваемой мощности для применения системы на АНПА другого типоразмера. Исследования проводились при сбалансированном сочетании математического моделирования и натурного эксперимента, обеспечивающих достоверное подтверждение адекватности принятых математических моделей и оптимальное использование материальных ресурсов при постановке эксперимента.

Некоторые предварительные исследования позволяют считать, что в значительной мере полученные результаты можно будет распространить на другие конструктивные исполнения ВчТ, например, с сердечниками в виде плоских ферритовых экранов, которые в определенных условиях могут иметь преимущества при установке их в АНПА.

Развитие предложенной методики определения конструктивных параметров на другие исполнения ВчТ будет заключаться в уточнении численных значений коэффициентов аппроксимирующих полиномов (5) и (6).

Литература

1. Valtchev, S.S. *Electromagnetic Field as the Wireless Transporter of Energy* / S.S. Valtchev, E.N. Baikova, L.R. Jorge // *Facta Universitatis, Ser: Elec. Energ.* – 2012. – Vol. 25, no. 3. – December 2012. – P. 171–181. DOI: 10.2298/FUEE1203171V
2. *Reviews of Power Systems and Environmental Energy Conversion for Unmanned Underwater Vehicles* / Wang X., Shang J., Luo Z. et al. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* – 2012. – Vol. 16, iss. 4. – P. 1958–1970. DOI: 10.1016/j.rser.2011.12.016
3. Илларионов, Г.Ю. *Угроза из глубины: XXI век / Г.Ю. Илларионов, К.С. Сиденко, Л.Ю. Бочаров.* – Хабаровск: КГУП «Хабаровская краевая типография», 2011. – 304 с.
4. McGinnis, T. *Inductive Power System for Autonomous Underwater Vehicles* / T. McGinnis, C.P. Henze, K. Conroy // *OCEANS.* – 2007. – 1–5. – P. 736–740. DOI: 10.1109/OCEANS.2007.4449219
5. Li-yan, Q. *Research on Design of Plate-type Electromagnetic Coupler in Underwater Inductive Power Transmission* / Q. Li-yan // *MATEC Web of Conferences.* – 2015. – Vol. 31. – 5 p. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20153108004>
6. Saishenagha, D. *Wireless Charging System Using High Power, High Frequency Magnetic Interface for Underwater Electric Vehicles* / D. Saishenagha, M. Devika // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences.* – 2016. – Vol. 11. – P. 6977–6981.
7. *Automatic Wireless Power Supply System to Autonomous Underwater Vehicles by Means of Electromagnetic Coupler* / S. Wang, B. Song, G. Duan, X. Du // *J. Shanghai Jiaotong Univ. (Sci.).* – 2014. – Vol. 19 (1). – P. 110–114. DOI: 10.1007/s12204-014-1478-6

8. Shi, J. *Design and Analysis of an Underwater Inductive Coupling Power Transfer System for Autonomous Underwater Vehicle Docking Applications* / J. Shi, D. Li, C. Yang // *Journal of Zhejiang University SCIENCE C (Computers & Electronics)*. – 2014. – Vol. 15 (1). – P. 51–62. DOI: 10.1631/jzus.C1300171
9. *The Development and Ocean Testing of an AUV Docking Station for a 21" AUV* / B. Hobson, R. McEwen, J. Erickson et al. // *IEEE Xplore*. – 7 p. DOI: 10.1109/OCEANS.2007.4449318.
10. Исследование устройства для беспроводной передачи электрической энергии на необитаемый подводный аппарат / А.А. Мартынов, В.К. Самсыгин, Д.В. Соколов и др. // *Труды Крыловского государственного научного центра*. – 2017. – № 2 (380). – С. 92–100. DOI: 10.24937/2542-2324-2017-2-380-92-100
11. *The Use of Resonance for Current Dnloading of the Transistor Keys of the Inverter* / M.V. Kraskovskiy, V.A. Gerasimov, G.E. Kuvshinov, A.Y. Filozhenko // *International Journal of Control Theory and Applications*. – 2016. – Vol. 9, iss. 30. – P. 305–311.
12. Донные причальные устройства для автономных обитаемых подводных аппаратов / Г.Ю. Илларионов, А.Ф. Щербатюк, А.А. Кушнерик и др. // *Двойные технологии*. – 2011. – № 1. – С. 13–21.
13. *Design Considerations for Electromagnetic Couplers in Contactless Power Transmission Systems for Deep-sea Applications* / Ze-song Li, De-jun Li, Lin Lin, Ying Chen // *Journal of Zhejiang University SCIENCE C (Computers & Electronics)*. – 2010. – Vol. 11 (10). – P. 824–834. DOI: 10.1631/jzus.C09107
14. *Электротехника. В 3 кн. Кн. I: Теория электрических и магнитных цепей. Электрические измерения* / под ред. П.А. Бутырина, Р.Х. Гафиятуллина, А.Л. Шестакова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003. – 505 с.
15. Калантаров, П.Л. *Расчёт индуктивностей: справ. кн.* / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
16. Немцов, М.В. *Справочник по расчёту катушек индуктивности* / М.В. Немцов, Ю.М. Шамаев. – М.: Энергоиздат, 1989. – 192 с.
17. *ANSYS Maxwell – Low Frequency Electromagnetic Field Simulation*. ANSYS. – <http://www.ansys.com/Products/Electronics/ANSYS-Maxwell> (дата обращения: 31.08.2017).
18. *User's Guide – Maxwell 3D ver. 15*. ANSYS. – www.mae.ncsu.edu/buckner/courses/mae535/Maxwell3D.pdf (дата обращения: 31.08.2017).
19. *Antenna Modeling for Inductive RFID Applications Using the Partial Element Equivalent Circuit Method* / P. Scholz, W. Ackermann, T. Weiland, C. Reinhold // *IEEE Trans. Magn.* – 2010. – Vol. 46, no. 8. – P. 2967–2970. DOI: 10.1109/TMAG.2010.2043824
20. Герасимов, В.А. *Управление ключами автономного инвертора и защита от перенапряжений* / В.А. Герасимов, А.Ю. Филоженко, П.И. Чепурин // *Материалы девятой всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления»*. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2014. – С. 300–314.

Герасимов Владимир Александрович, канд. техн. наук, профессор, заведующий лабораторией «Энергетика подводных робототехнических комплексов», Институт проблем морских технологий, г. Владивосток; fobos_v@mail.ru.

Красковский Михаил Владимирович, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории «Энергетика подводных робототехнических комплексов», Институт проблем морских технологий, г. Владивосток; mikhail51289@yandex.ru.

Филоженко Алексей Юрьевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории «Энергетика подводных робототехнических комплексов», Институт проблем морских технологий, г. Владивосток; filozhenko_a@mail.ru.

Чепурин Павел Игоревич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории «Энергетика подводных робототехнических комплексов», Институт проблем морских технологий, г. Владивосток; chepurinp@mail.ru.

Поступила в редакцию 14 сентября 2017 г.

PROVISION OF TRANSMISSION OF A GIVEN POWER IN THE SYSTEM OF CONTACTLESS CHARGE OF UNDERWATER VEHICLE BATTERIES

V.A. Gerasimov, fobos_v@mail.ru,
M.V. Kraskovskiy, mikhail51289@yandex.ru,
A.Yu. Filozhenko, filozhenko_a@mail.ru,
P.I. Chepurin, chepurinp@mail.ru

Institute of Marine Technological Problems, Vladivostok, Russian Federation

The object of the research is a high-frequency power transformer with separating primary and secondary parts making up a system of contactless power transmission at the autonomous unmanned underwater vehicle (AUUV) for charging its storage batteries.

As a research task a delivered justification and development of a methodology for calculating the design parameters of a transformer meeting the delivered requirements for the transmitted power under specified operating conditions is provided.

The research is based on a mathematical modeling of electromagnetic processes in the transformer performed in the software package ANSYS Maxwell combined with a live experiment. The characterizing parameters in the form of the magnetic coupling coefficient and the specific inductance of the coil winding turn are identified and their application for the complete identification of the object properties is justified. A system of relative units is proposed in which the characterizing parameters have a constant value for any cores of the same size which makes it easy to scale the results of the received technical solutions when the requirements for the transmitted power change.

A method is proposed for determining approximate polynomials connecting arrays of values of the coupling coefficient and specific inductance with the relative values of the gaps between the contact surfaces of the transformer parts and the inter-axial displacements which may possibly occur when the underwater vehicle is automatically moored to the base.

The performed studies made it possible to propose a technique for calculating the basic design parameters of the transformers with the initial data in the form of a combination of the specified electrical characteristics and the limitations imposed on the accuracy of the docking of the contact surfaces of the transformer parts. Experimental studies of selected transformer constructs similar to those adopted in the modeling confirm the reliability of the results presented.

The results obtained relate to cup-type ferrite cores, but the approaches adopted in the studies make it possible to extend the calculation technique to other transformer designs that can be used in the systems of AUUV contactless battery charging.

Keywords: underwater vehicle, the system of contactless charging, high frequency power transformer, magnetic coupling coefficient, mathematical modeling, experiment, design parameters.

References

1. Stanimir S. Valtchev, Elena N. Baikova, Luis R. Jorge. Electromagnetic Field as the Wireless Transporter of Energy. *Facta Universitatis, Ser: Elec. Energ.*, 2012, Vol. 25, no. 3, pp. 171–181. DOI: 10.2298/FUEE1203171V
2. Wang X., Shang J., Luo Z., Tang L., Zhang X., Li J. Reviews of Power Systems and Environmental Energy Conversion for Unmanned Underwater Vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, vol. 16, iss. 4, pp. 1958–1970. DOI: 10.1016/j.rser.2011.12.016
3. Illarionov G.Yu., Sidenko K.S., Bocharov L.Yu. *Ugroza iz glubiny: XXI vek* [Threat from the Depths: XXI Century]. Khabarovsk, Khabarovskaya kraevaya tipografiya, 2011. 304 p.
4. McGinnis, T., Henze, C.P., Conroy, K., 2007. Inductive Power System for Autonomous Underwater Vehicles. *OCEANS*, 1–5, pp. 736–740. DOI: 10.1109/OCEANS.2007.4449219
5. Li-yan Q. Research on Design of Plate-type Electromagnetic Coupler in Underwater Inductive Power Transmission. *MATEC Web of Conferences*, 2015, vol. 31, 5 p. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20153108004>
6. Saishenagha D., Devika M. Wireless Charging System Using High Power, High Frequency Magnetic Interface for Underwater Electric Vehicles. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016, vol. 11, pp. 6977–6981.

7. Wang S., Song B., Duan G., Du X. Automatic Wireless Power Supply System to Autonomous Underwater Vehicles by Means of Electromagnetic Coupler. *J. Shanghai Jiaotong Univ. (Sci.)*, 2014, vol. 19 (1), pp. 110–114. DOI: 10.1007/s12204-014-1478-6
8. Shi J., Li D., Yang C. Design and Analysis of an Underwater Inductive Coupling Power Transfer System for Autonomous Underwater Vehicle Docking Applications. *J Zhejiang University-Science C (Computers & Electronics)*, 2014, vol. 15 (1), pp. 51–62. DOI: 10.1631/jzus.C1300171
9. Hobson B., McEwen R., Erickson J., Hoover T., McBride L., Shane F., Bellingham J. The Development and Ocean Testing of an AUV Docking Station for a 21” AUV. *IEEE Xplore*, 7 p. DOI: 10.1109/OCEANS.2007.4449318
10. Martynov A.A., Samsygin V.K., Sokolov D.V., Kokovinov A.A., Nikulkin K.A. [Wireless Charger for the Underwater Unmanned vVehicle]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra* [Proceedings of the Krylov State Research Center], 2017, no. 2 (380), pp. 92–100. (in Russ.) DOI: 10.24937/2542-2324-2017-2-380-92-100
11. Kraskovskiy M.V., Gerasimov V.A., Kuvshinov G.E., Filozhenko A.Y. The Use of Resonance for Current Downloading of the Transistor Keys of the Inverter. *International Journal of Control Theory and Applications*, 2016, vol. 9, iss. 30, pp. 305–311.
12. Illarionov G.Yu., Shcherbatyuk A.F., Kushnerik A.A., Kvashnin A.G. [Seabed Mooring Facilities for Autonomous Underwater Vehicles]. *Dvoynye tekhnologii* [Dual Technologies], 2011, no. 1, pp. 13–21. (in Russ.)
13. Ze-song Li, De-jun Li, Lin Lin, Ying Chen. Design Considerations for Electromagnetic Couplers in Contactless Power Transmission Systems for Deep-Sea Applications. *J Zhejiang University-Science C (Computers & Electronics)*, 2010, vol. 11 (10), pp. 824–834. DOI: 10.1631/jzus.C09107
14. Butyrin P.A., Gafiyatullin R.Kh., Shestakova A.L. (Ed.) *Elektrotekhnika. – V 3-kh knigakh. Kniga I. Teoriya elektricheskikh i magnitnykh tsepey. Elektricheskie izmereniya* [Electrical Engineering. – In 3 Books. Book I. Theory of Electric and Magnetic Circuits. Electrical Measurements]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2003. 505 p.
15. Kalantarov, P.L., Tseytlin, L.A. *Raschet induktivnostey: Spravochnaya kniga* [Calculation of Inductances: Reference Book], Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 488 p.
16. Nemtsov, M.V., Shamaev, Yu.M. *Spravochnik po raschetu katushek induktivnosti* [Reference for Calculation of Inductance Coils], Moscow, Energoizdat Publ., 1989. 192 p.
17. ANSYS Maxwell – Low Frequency Electromagnetic Field Simulation. ANSYS. Available at: <http://www.ansys.com/Products/Electronics/ANSYS-Maxwell> (accessed 31.08.2017).
18. User’s Guide – Maxwell 3D ver. 15. ANSYS. Available at: www.mae.ncsu.edu/buckner/courses/mae535/Maxwell3D.pdf (accessed 31.08.2017).
19. Scholz P., Ackermann W., Weiland T., Reinhold C. Antenna Modeling for Inductive RFID Applications Using the Partial Element Equivalent Circuit Method. *IEEE Trans. Magn.*, 2010, vol. 46, no. 8, pp. 2967–2970. DOI: 10.1109/TMAG.2010.2043824
20. Gerasimov V.A., Filozhenko A.Ju., Chepurin P.I. [Keys Control of the Autonomous Inverter and Surge Protection], *Devyataya vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya “Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya”* [Ninth All-Russian Scientific-Practical Conference “Advanced Systems and Control Problems”]. Taganrog, 2014, pp. 300–314. (in Russ.)

Received 14 September 2017

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Обеспечение передачи заданной мощности в системе бесконтактного заряда аккумуляторных батарей подводного аппарата / В.А. Герасимов, М.В. Красковский, А.Ю. Филоженко, П.И. Чепурин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 48–58. DOI: 10.14529/power170406

FOR CITATION

Gerasimov V.A., Kraskovskiy M.V., Filozhenko A.Yu., Chepurin P.I. Provision of Transmission of a Given Power in the System of Contactless Charge of Underwater Vehicle Batteries. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 48–58. (in Russ.) DOI: 10.14529/power170406
