

Medvedev Mikhail Yurievich – Research Institute of Robotics and Control Processes of the Southern Federal University; e-mail: medvmihal@sfedu.ru; 2, Shevchenko street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79198927349; dr. of eng. sc.; leading researcher.

Kostyukov Vladimir Alexandrovich – e-mail: vakostukov@sfedu.ru; phone: +79054787016; the department of electrical engineering and mechatronics; cand. of eng. sc.; associate professor.

Maevsky Andrey Mikhailovich – e-mail: maevskiy_andrey@mail.ru; phone: +79885789938; the department of electrical engineering and mechatronics; graduate student.

Pavlenko Dmitry Dmitrievich – e-mail: d.d.pavlenko@mail.ru; phone: +79889472618; the department of electrical engineering and mechatronics; student.

УДК 621.3(001.3+14.232)

**В.А. Герасимов, А.В. Комлев, М.В. Красковский, А.Ю. Филоженко,
И.А. Чemezov**

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСФОРМАТОРА СИСТЕМЫ БЕСКОНТАКТНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Рассматриваются вопросы построения системы бесконтактной передачи (СБПЭ) электроэнергии на борт автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) для заряда его аккумуляторных батарей. Объектом исследования в статье является специальный высокочастотный силовой трансформатор с разделяющимися первичной и вторичной частями, который входит в состав СБПЭ и в значительной степени определяет свойства системы. В качестве задачи исследования поставлено обоснование и разработка методики расчета конструктивных параметров трансформатора, удовлетворяющего заданным условиям эксплуатации и обеспечивающего передачу требуемой мощности. 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 исследуемого трансформатора. 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 объекту подводного базирования. Выполненные исследования позволили предложить и обосновать методику расчета основных конструктивных параметров трансформаторов при наборе исходных данных в виде сочетания заданных электрических характеристик и предъявляемых ограничений по точности стыковки контактных поверхностей частей трансформатора. Алгоритм расчета как определенная последовательность вычислительных блоков и условных переходов оформлен в виде блок-схемы. Блок-схема в наглядном виде представляет взаимосвязи вычислительных операций и неформальным образом показывает пути оптимизации конструкции трансформатора. 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.

Автономный необитаемый подводный аппарат; заряд аккумуляторных батарей; бесконтактная передача электроэнергии; высокочастотный трансформатор; методика расчета.

V.A. Gerasimov, A.V. Komlev, M.V. Kraskovskiy, F.Yu. Filozhenko,
I.A. Chemezov

DETERMINATION OF STRUCTURAL PARAMETERS OF THE TRANSFORMER IN THE NON-CONTACT POWER TRANSMISSION SYSTEM

The issues of non-contact power transmission system construction on underwater vehicle for charge batteries are considered. The research object is a special high-frequency power transformer with multiple primary and secondary parts, which is part of the power transmission system and determines its properties to a large extent. The substantiation and development of the method for calculation of the structural parameters of a transformer, which satisfies the specified conditions of operation and provides the required capacity, is assigned as a research task. The research is based on mathematical modeling of electromagnetic processes in a transformer using the software package ANSYS Maxwell in combination with full-scale experiment. The magnetic coupling coefficient and the specific inductance of the winding coil are highlighted for the complete identification of the transformer properties. Proposed is a system of relative units, in which the characterizing parameters have a constant value for any cores of the same type, that makes it easy to scale the results of the received technical solutions in conditions of changing the requirements for the transmitted power. The method approximating polynomials definition connecting arrays of a magnetic coupling ratio and specific inductance values with relative gaps values between contact surfaces of transformer parts and interaxial shifts is offered. The executed researches have allowed proposing and substantiating the basic transformers structural parameters calculation method. The calculation algorithm as a certain sequence of computational blocks and conditional transitions is executed in the form of a flowchart. The flowchart in a visual form represents the interconnection of computational operations and in an informal way shows ways of transformer design optimization. The obtained results refer to the ferrite P cores type, but the approaches taken in the studies give an opportunity to expand the calculation method to other structural forms of transformers that can find application in the system of underwater vehicle batteries non-contact charging.

Autonomous unmanned underwater vehicle; battery charge; non-contact power transmission; high frequency transformer; methods of calculation.

Введение. При организации длительного подводного базирования автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) на донном причальном устройстве (ДПУ) проблема передачи электроэнергии на АНПА обычно решается за счет использованием индукционной связи между обмотками специального высокочастотного трансформатора (ВЧТ) с разделяющимися первичной и вторичной частями [1, 2]. Подобный бесконтактный способ имеет такие достоинства, как пониженные требования к точности автоматического причаливания подводного аппарата 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 [3–12]. При этом также упрощается автоматизация процесса зарядки аккумуляторных батарей АНПА и повышается надежность системы в целом.

Первичная и вторичная части трансформатора 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. Каждая из оболочек имеет выполненную из изоляционного материала контактную стенку, толщина которой дости-

гает нескольких миллиметров. В режиме передачи энергии оси обмоток должны совпадать, а их торцы находиться на минимальном расстоянии друг относительно друга [13–16]. За счет немагнитного зазора между обмотками, который равен суммарной толщине контактных стенок первичной и вторичной частей, трансформатор имеет пониженное значение коэффициента k_M магнитной связи. Это обстоятельство является особенностью системы бесконтактной передачи электроэнергии на АНПА, которая в значительной мере определяет характеристики, как самого трансформатора, так и системы в целом.

Коэффициент магнитной связи k_M 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 принято решение выбрать именно этот параметр. Более полной идентификации характеристик ВЧТ способствует также использование удельной индуктивности L витка его обмотки.

Обеспечению желаемых характеристик ВЧТ в заданных условиях использования будет способствовать решение актуальной задачи разработки методики определения значений коэффициента k_M магнитной связи и удельной индуктивности L витка для трансформатора с разделяющимися первичной (передающей) и вторичной (приемной) частями в зависимости от его конструктивного облика, а также от погрешности стыковки этих частей. При этом понятие «конструктивный облик» объединяет характеристики материала, конфигурации магнитных экранов обмоток, исполнение оболочек частей трансформатора, а также геометрическую форму обмоток и их электрические параметры. Практическим результатом такой методики должно быть определение функциональной связи между электрическими характеристиками трансформатора и его конструктивными параметрами, позволяющими обеспечить передачу на борт АНПА заданной электрической мощности. Представляет также практический интерес сравнительная оценка чувствительности значения коэффициента k_M магнитной связи от зазора h между обмотками и от осевого смещения s между ними для различных конструктивных исполнений ВЧТ. Результаты такой оценки особенно актуальны в условиях автоматического причаливания АНПА к ДПУ, которое может сопровождаться определенной погрешностью в совмещении контактных поверхностей ВЧТ.

Поставленная задача может быть решена путем математического моделирования в сочетании с натурным экспериментом, результаты которого следует использовать как «контрольные точки» для оценки адекватности соответствующей математической модели. В качестве первого шага исследования принято решение рассмотреть трансформатор с чашечными сердечниками, для которых наиболее просто выявляются признаки подобия при изменении их размеров. В случае приемлемых результатов такой оценки принятый подход можно расширять на иные конструкции ВЧТ, отличающиеся формой магнитного экрана и конфигурацией обмоток.

Математическое моделирование силового высокочастотного трансформатора. При моделировании электромагнитных процессов в ВЧТ системы бесконтактного заряда предпочтение следует отдать 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.

Расчетную геометрическую модель в рассматриваемом случае целесообразно создавать в какой-либо специализированной конструкторской программе для построения 3D моделей, например, в Solidworks, и экспортировать ее в расчетную программную среду Maxwell. Результаты этих действий приведены на рис. 1.

Результаты математического моделирования, выполненного таким образом, и последующих натуральных экспериментов с ВчТ показывают, что некоторые параметры при представлении их в относительном виде являются постоянными для магнитопроводов разного размера, но одного типа [18]. При этом оказывается, для сердечников чашечного типа (рис. 1) в качестве базовой величины для относительных единиц может быть принят наружный диаметр сердечника D_{MAX} .

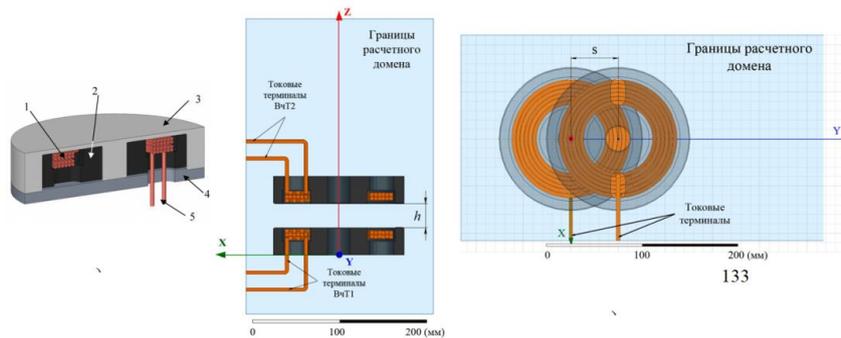


Рис. 1. Расчетная схема ВчТ: а – отдельная часть ВчТ на чашечном сердечнике в сборе (1 – обмотка, 2 – сердечник, 3 – немагнитная оболочка корпуса, 4 – металлическая крышка корпуса, 5 – выводы обмотки); б – осевое сечение расчетной модели ВчТ; в – вид сверху на расчетную модель

В качестве параметра, идентифицирующего свойства ВчТ, предлагается использовать понятие удельной индуктивности витка обмотки трансформатора:

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

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

Используя параметр (1) в сочетании с коэффициентом k_M магнитной связи, можно полностью определить свойства конкретного ВчТ.

Как было отмечено, процесс автоматического причаливания АНПА к подводному причальному устройству может сопровождаться некоторой ошибкой во взаимном позиционировании, что приводит к неточному совмещению стыковочных стенок первичной и вторичной частей ВчТ. Для анализа влияния зазора h между контактными стенками и межосевого смещения s на эффективность передачи электроэнергии предлагается использовать относительный зазор δ и относительное смещение σ , которые, как и удельную индуктивность витка (1), можно определить в отношении к наружному диаметру D_{MAX} сердечника чашечного типа

$$\delta = \frac{h}{D_{max}}, \quad \sigma = \frac{s}{D_{max}}. \quad (2)$$

Приведенные рассуждения применимы для трансформаторов с сердечниками чашечного типа. Для таких сердечников выбор в качестве базового параметра значения наружного диаметра D_{MAX} является удобным решением, что будет показано ниже. Для других конфигураций сердечников базовый параметр, очевидно, будет каким-то другим. Например, для трансформатора с плоской обмоткой прямоугольной формы и плоским магнитопроводящим экраном в качестве базового па-

раметра может подойти некоторая комбинация из значений линейных размеров обмотки. Вероятно, возможны и другие конфигурации обмоток и экранов трансформаторов и определение наилучшего варианта конструкции для конкретных условий применения является задачей дальнейших исследований.

Практическая ценность такой методики проявляется в удобстве масштабного пересчета трансформаторов различной мощности для удовлетворения заданным энергетическим показателям системы бесконтактной передачи электроэнергии с учетом определенных ограничений по условиям ее применения. Это полезное свойство позволяет использовать уже наработанные решения и получать новые результаты с наименьшими затратами.

В результате компьютерного эксперимента в программном пакете Maxwell на примере чашечных сердечников Ersos двух типов РСН150х30 и PS68х14,5 получены двумерные массивы значений коэффициента k_M связи и удельной индуктивности Λ в функции зазора δ и смещения σ , которые аппроксимированы полиномами:

$$k_M = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m a_{ij} \cdot \delta^i \cdot \sigma^j, \quad (3)$$

$$\Lambda = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m b_{ij} \cdot \delta^i \cdot \sigma^j, \quad (4)$$

где a_{ij} , b_{ij} – коэффициенты аппроксимирующих полиномов; n , m – степени полиномов.

В приведенном примере сердечник РСН150х30 имеет наружный диаметр D_{MAX} 150 мм и высоту 30 мм, а для сердечника PS68х14,5 наружный диаметр D_{MAX} составляет 68 мм и высота – 14,5 мм.

Наглядное представление о зависимости параметров трансформатора от относительного зазора δ между сердечниками и от относительного межосевого смещения σ дает рис. 2, на котором массивы коэффициентов связи k_M и значений удельной индуктивности Λ витка для ВчТ с сердечниками РСН150х30 представлены в виде трехмерных поверхностей. Если построить такую же поверхность для сердечников меньшего размера PS68х14,5, то оказывается, что картина зависимости значений относительных параметров k_M и Λ от относительного зазора δ и относительного смещения σ полностью совпадает с графиками в относительных единицах, показанными для первого сердечника.

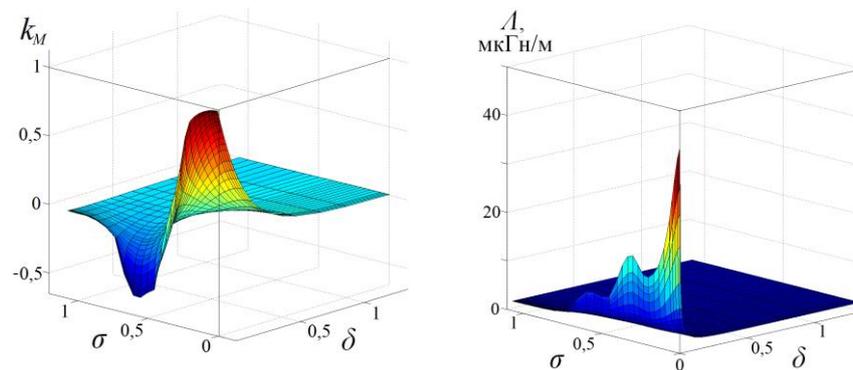


Рис. 2. Обобщенные зависимости коэффициента связи k_M и удельной индуктивности витка Λ для ВчТ с сердечниками РСН150х30 в функции относительного зазора δ и смещения σ

Проведенные исследования и выявленные закономерности дают основания предложить методику расчета конструктивных параметров трансформатора, удовлетворяющего заданным условиям применения.

Методика расчета трансформатора. Цель расчета формулируется в следующем виде: при заданных ограничениях и исходных данных определить конструкцию трансформатора, обеспечивающую передачу заданной активной мощности, при этом в состав трансформатора может входить несколько пар первичных и вторичных частей, обмотки которых включаются последовательно или параллельно.

Такой вариант исполнения трансформатора объясняется тем, что максимальный поперечный размер применяемого сердечника и наружный диаметр подводного аппарата связаны определенным соотношением, выполнение которого сохраняет условия обтекаемости его корпуса и ограниченной шумности при движении, а также не усложняет процесс совмещения контактных поверхностей трансформатора при посадке аппарата на ДПУ. Так, например, для АНПА средних размеров с круглым поперечным сечением, диаметр которого составляет 400 – 600 мм, диаметр D_{MAX} сердечника трансформатора не должен превышать 15 % диаметра аппарата в месте установки приемной части ВчТ.

В общем случае расчет трансформатора может быть выполнен в двух вариантах (напомним, что методика рассматривает сердечники чашечного типа).

К первому варианту относится задача, при которой задан ток номинальный заряда I_{AB} и конечное напряжение U_{AB} полностью заряженной аккумуляторной батареи, т.е. значение номинальной передаваемой мощности. В этом случае результатом расчета будет определение вида и параметров конструктивного облика ВчТ, обеспечивающего решение указанной задачи. Под конструктивным обликом здесь понимается диаметр и количество сердечников, входящих в состав ВчТ, а также параметры провода обмоток и числа витков.

Для второго варианта расчета считаем заданным сердечник трансформатора, т.е. известен диаметр D_{MAX} сердечника. Такой вариант принимается, когда необходимо произвести расчёт для определенного сердечника, размеры которого не должны превышать заданных ограничений, и при этом определяется значение максимальной передаваемой мощности.

Последовательность расчета можно представить в виде обобщенной блок-схемы, показанной на рис. 3 и объединяющей указанные два варианта, причем отличие расчетов по этим вариантам сводится к различным наборам исходных данных. Расчетные формулы, используемые в методике, были получены в [19, 20].

Для первого варианта расчета должны быть заданы следующие исходные данные (блок 2):

- ◆ плотность тока J ;
- ◆ номинальное напряжение U_{AB} полностью заряженной аккумуляторной батареи;
- ◆ ток I_{AB} заряда аккумуляторной батареи;
- ◆ частота коммутации автономного инвертора f_{MAX} ;
- ◆ коэффициент k_{DC} , учитывающий необходимый запас по входному напряжению зарядного устройства;
- ◆ толщина контактной стенки $h_{СТ}$ оболочки трансформатора;
- ◆ напряжение U_I питания инвертора;
- ◆ предварительно принимается, что ВчТ состоит из одного трансформатора с сердечником чашечного типа наружным диаметром

$$D_{max} = (0,1 \dots 0,15)D_A, \quad (5)$$

где D_A – диаметр корпуса аппарата в месте установки приемной части ВчТ.

Коэффициент связи k_M и удельная индуктивность витка L для заданного относительного зазора δ и относительного смещения σ определяются из полиномов (3, 4), полученных предварительно для принятого в расчетах типа сердечника (блок 3), и являются основой дальнейшего расчета.

В соответствии с приведенной последовательностью расчета и с использованием известных формул определяются число витков W_2 и сечение S_2 провода вторичной обмотки. В случае выполнения условий размещения обмотки в окне сердечника, выполняется расчет числа витков W_1 и сечения провода S_1 первичной обмотки. Если и первичная обмотка размещается в окне сердечника, то расчет завершается.

Приведенная последовательность вычислений имеет место при выполнении условий в соответствующих блоках и является самой короткой и приводящей к законченному решению. Если, например, не выполняется требование по заполнению окна сердечника (блок 5), то последовательность вычислений через блок 10 переходит к коррекции исходных данных, сводящуюся, в данном случае, к выбору другого типоразмера сердечника.

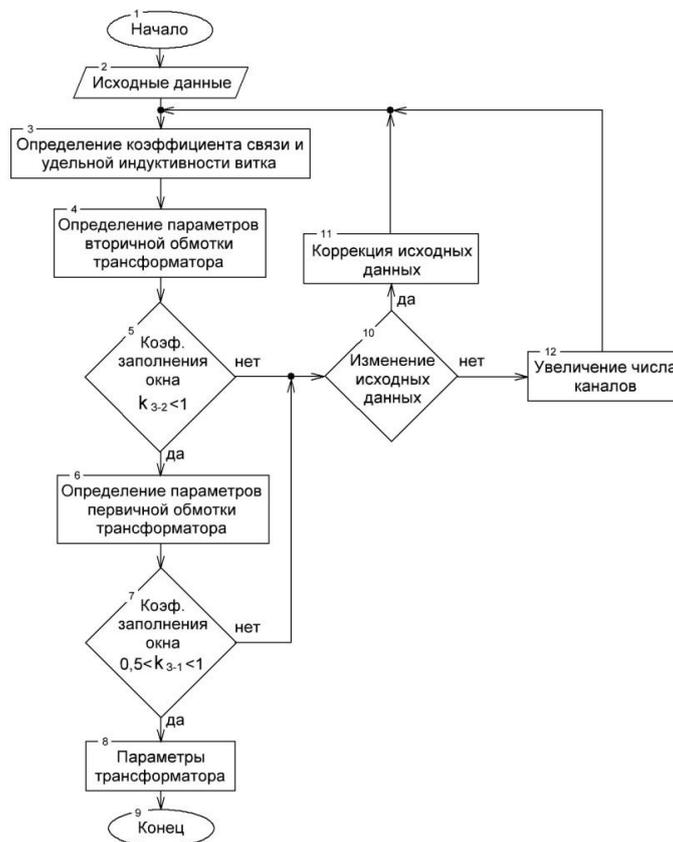


Рис. 3. Блок-схема алгоритма расчёта трансформатора

Возможны и другие последовательности вычислений, зависящие от выполнения указанных в блок-схеме условий и приводящие к корректировке исходных данных (например, изменению числа каналов передачи энергии за счет введения

дополнительных пар сердечников и др.). При этом уточнение параметров провода, типа сердечника, а также числа пар сердечников, образующих трансформатор системы, может потребовать двух – трех итераций.

Натурный эксперимент с конкретным исполнением трансформатора и сопоставление его результатов с аналитическим расчетом позволили предложить одно уточнение. На рис. 4 приведены внешние характеристики системы передачи энергии, представляющие собой зависимости напряжения U_2 на выходе системы от тока I_2 нагрузки.

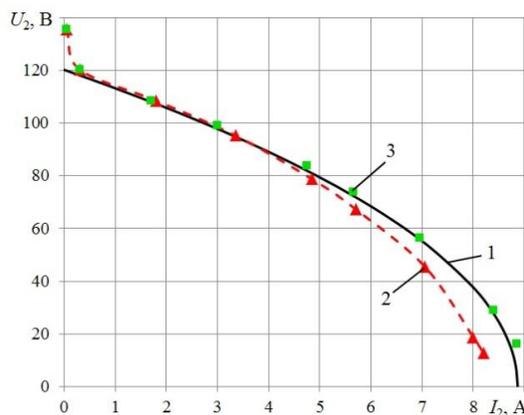


Рис. 4. Внешние характеристики системы бесконтактной передачи электроэнергии: 1 – аналитический расчет; 2 – натурный эксперимент; 3 – фактическая характеристика при коррекции частоты инвертора

Результаты аналитического расчета внешней характеристики системы с трансформатором, параметры которого были определены по предложенной методике, представлены графиком 1. На этом же рисунке показана внешняя характеристика (график 2), полученная в натурном эксперименте с конкретным исполнением такого трансформатора. Отличие между аналитической характеристикой и экспериментом объясняется влиянием паразитной индуктивности выводов обмоток трансформатора. Одним из вариантов исключения указанного рассогласования может быть некоторое уменьшение частоты инвертора. Экспериментально установлено, что для принятых условий интеграции системы бесконтактной передачи энергии в конструкцию АНПА и выполнением забортного монтажа достаточно уменьшения частоты инвертора примерно на 10 %. При этом экспериментальные точки 3 фактической внешней характеристики системы практически совпадают с графиком 1.

Заключение. Предложен подход к определению конструктивных параметров трансформатора системы бесконтактной передачи электроэнергии на подводный аппарат. 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. В основу исследований положено сбалансированное сочетание математического моделирования и натурального эксперимента, обеспечивающих достоверное подтверждение адекватности принятых математических моделей и оптимальное использование материальных ресурсов при постановке эксперимента.

Проведенные исследования позволяют считать, что в значительной мере принятый подход и полученные результаты можно будет распространить и 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 определении численных значений коэффициентов аппроксимирующих полиномов (3) и (4) и базового параметра для представления зазора и межосевого смещения в относительном виде. Методический подход и вычислительные процедуры при этом остаются неизменными.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Stanimir S. Valtchev, Elena N. Baikova, Luis R. Jorge Electromagnetic Field as the Wireless Transporter of Energy // Facta Universitatis, Ser: Elec. Energ. – December 2012. – Vol. 25, No. 3. – P. 171-181.
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, Issue 4. – P. 1958-1970. – URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111006095> (дата обращения 12.02.2018).
3. Илларионов Г.Ю., Щербатюк А.Ф., Кушнерик А.А., Квашинин А.Г. Донные причальные устройства для автономных необитаемых подводных аппаратов // Двойные технологии. – 2011. – № 1.
4. Илларионов Г.Ю., Сиденко К.С., Бочаров Л.Ю. Угроза из глубины: XXI век. – Хабаровск: КГУП «Хабаровская краевая типография», 2011. – 304 с. – ISBN 978-5-8570-311-6.
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. – P. 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). – P. 110-114.
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). – P. 51-62.
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. Пат. 2564199 Российская федерация, МПК H02J 7/00 (2006/01). Устройство для бесконтактной передачи электроэнергии на подводный объект / Герасимов В.А., Кувшинов Г.Е., Попов О.С., Филоженко А.Ю., Чепурин П. И., заявитель и патентообладатель ИПМТ ДВО РАН. – № 2014123766/02; заявл. 10.06.2014; опубл. 27.09.2015, Бюл. № 27. – 13 с.
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. Issue 30. – P. 305-311.
12. McGinnis T., Henze C.P., Conroy K. Inductive power system for autonomous underwater vehicles // OCEANS. – 2007. – 6 p. – URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4449219/> (дата обращения 22.02.2018).
13. Кувшинов Г.Е., Наумов Л.А., Филоженко А.Ю., Чушина К.В. Бесконтактная передача электроэнергии на морской подвижный объект // Научно-техническая конференция: Матер. конф. Технические проблемы освоения мирового океана. – Владивосток: Дальнаука, 2007. – С. 141-146.

14. Герасимов В.А., Филоженко А.Ю., Чепурин П.И. Структура системы электроснабжения автономного необитаемого подводного аппарата // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 3 (140). – С. 47-55.
15. Герасимов В.А., Красковский М.В., Филоженко А.Ю. Повышение эффективности системы бесконтактного заряда аккумуляторных батарей автономного необитаемого подводного аппарата // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 1-2 (186-187). – С. 108-118.
16. Герасимов В.А., Красковский М.В., Кувишинов Г.Е., Филоженко А.Ю. Повышение эффективности бесконтактной передачи электроэнергии на автономный подводный аппарат // Подводные исследования и робототехника. – 2016. – № 1. – С. 24-30.
17. ANSYS Maxwell – Low Frequency Electromagnetic Field Simulation // ANSYS. – URL: <http://www.ansys.com/Products/Electronics/ANSYS-Maxwell> (дата обращения: 12.02.2018).
18. Герасимов В.А., Красковский М.В., Филоженко А.Ю., Чепурин П.И. Обеспечение передачи заданной мощности в системе бесконтактного заряда аккумуляторных батарей подводного аппарата // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 48-58.
19. Герасимов В.А., Копылов В.В., Кувишинов Г.Е., Наумов Л.А., Себто Ю.Г., Филоженко А.Ю., Чепурин П.И. Математическая модель устройства для бесконтактной передачи электроэнергии на подводный объект // Подводные исследования и робототехника. – 2012. – № 2/14. – С. 28-34.
20. Герасимов В.А., Филоженко А.Ю., Чепурин П.И. Управление ключами автономного инвертора и защита от перенапряжений // Материалы девятой всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2014. – С. 300-314.

REFERENCES

1. Stanimir S. Valtchev, Elena N. Baikova, Luis R. Jorge Electromagnetic Field as the Wireless Transporter of Energy, *Facta Universitatis, Ser: Elec. Energ.*, December 2012, Vol. 25, No. 3, pp. 171-181.
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, Issue 4, pp. 1958-1970. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111006095> (accessed 12 February 2018).
3. Iarionov G.Yu., Shcherbatyuk A.F., Kushnerik A.A., Kvashnin A.G. Donnye prichal'nye ustroystva dlya avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov [Bottom berthing devices for Autonomous unmanned underwater vehicles], *Dvoynye tekhnologii [Dual technologies]*, 2011, No. 1.
4. Illarionov G.Yu., Sidenko K.S., Bocharov L.Yu. Ugroza iz glubiny: XXI vek [Threat from the depths: the XXI century]. Khabarovsk: KGUP «Khabarovskaya kraevaya tipografiya», 2011, 304 p.
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, *ARNP 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.
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.
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. Gerasimov V.A., Kuvshinov G.E., Popov O.S., Filozhenko A.Yu., Chepurin P.I. Ustroystvo dlya beskon-taktnoy peredachi elektroenergii na podvodnyy ob"ekt [Device for contactless power transmission for underwater object]. Patent 2564199 Rossiyskaya federatsiya, MPK H02J 7/00 (2006/01). applicant and patentee IPMT DVO RAN. No. 2014123766/02; declared 10.06.2014; published 27.09.2015, Bull. No. 27, 13 p.
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. Issue 30, pp. 305-311.
12. McGinnis T., Henze C.P., Conroy K. Inductive power system for autonomous underwater vehicles, *OCEANS*, 2007, 6 p. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4449219/> (accessed 22 February 2018).
13. Kuvshinov G.E., Naumov L.A., Filozhenko A.Yu., Chupina K.V. Beskontaktnaya peredacha elektroenergii na morskoy podvizhnyy ob"ekt [Contactless transmission of electric power to the marine mobile object], *Nauchno-tehnicheskaya konferentsiya: Mater. konf. "Tekhnicheskie problemy osvoeniya mirovogo okeana"* [Scientific and technical conference: Proceedings of the conference "Technical problems of the world ocean development"]. Vladivostok: Dal'-nauka, 2007, pp. 141-146.
14. Gerasimov V.A., Filozhenko A.Yu., Chepurin P.I. Struktura sistemy elektrosnabzheniya avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata [The structure of the power supply system of the Autonomous uninhabited underwater vehicle], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 3 (140), pp. 47-55.
15. Gerasimov V.A., Kraskovskiy M.V., Filozhenko A.Yu. Povyshenie effektivnosti sistemy beskontaktnogo zaryada akkumulyatornykh batarey avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata [Improving the efficiency of the contactless battery charging system of the Autonomous unmanned underwater vehicle], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 1-2 (186-187), pp. 108-118.
16. Gerasimov V.A., Kraskovskiy M.V., Kuvshinov G.E., Filozhenko A.Yu. Povyshenie effektivnosti beskontaktnoy peredachi elektroenergii na avtonomnyy podvodnyy apparat [Improving the efficiency of contactless power transmission to an Autonomous underwater vehicle], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 2016, No. 1, pp. 24-30.
17. ANSYS Maxwell – Low Frequency Electromagnetic Field Simulation, ANSYS. Available at: <http://www.ansys.com/Products/Electronics/ANSYS-Maxwell> (accessed 12 February 2018).
18. Gerasimov V.A., Kraskovskiy M.V., Filozhenko A.Yu., Chepurin P.I. Obespechenie pere-dachi zadannoy moshchnosti v sisteme beskontaktnogo zaryada akkumulyatornykh batarey podvodnogo apparata [Ensuring the transfer of the specified power in the system of contactless battery charge of the underwater vehicle], *Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika»* [Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"], 2017, Vol. 17, No. 4, pp. 48-58.
19. Gerasimov V.A., Kopylov V.V., Kuvshinov G.E., Naumov L.A., Sebto Yu.G., Filozhenko A.Yu., Chepurin P.I. Matematicheskaya model' ustroystva dlya beskontaktnoy peredachi elektroenergii na podvodnyy ob"ekt [Mathematical modeling for contactless electric power transfer to underwater vehicle], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Investigation and Robotics], 2012, No. 2/14, pp. 28-34.
20. Gerasimov V.A., Filozhenko A.Yu., Chepurin P.I. Upravlenie klyuchami avtonomnogo invertora i zashchita ot perenapryazheniy [Key management bridge inverter and surge protection], *Materialy devyatoy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya»* [Materials of the Ninth All-Russian Scientific and Practical Conference "Perspective Systems and Control Problems"]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2014, pp. 300-314.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.Ф. Веревкин.

Герасимов Владимир Александрович – Институт проблем морских технологий (ИПМТ ДВО РАН); e-mail: fobos_v@mail.ru; 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а; тел.: 89025223824; к.т.н.; профессор; зав. лаборатории «Энергетика подводных робототехнических комплексов».

Филоженко Алексей Юрьевич – e-mail: filozhenko_a@mail.ru; тел.: 89140678041; к.т.н.; старший научный сотрудник лаборатории «Энергетика подводных робототехнических комплексов».

Комлев Антон Владимирович – e-mail: kom86@bk.ru; тел.: 89502884801; ведущий инженер лаборатории «Энергетика подводных робототехнических комплексов».

Красковский Михаил Владимирович – e-mail: mikhail51289@yandex.ru; тел.: 89502937111; соискатель, младший научный сотрудник лаборатории «Энергетика подводных робототехнических комплексов»

Чемезов Иван Александрович – ДВФУ; e-mail: chemezov.i@inbox.ru; 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 8; тел.: 89940239824; студент кафедры «Автоматизация и управление».

Gerasimov Vladimir Aleksandrovich – Institute of Marine Technological Problems (IMPT FEBRAS); e-mail: fobos_v@mail.ru; 690091, Vladivostok, Sukhanova street 5a; phone: +79025223824; Underwater research and robotics candidate of technical science; professor; head of the Energy Underwater Robotic Systems Laboratory.

Filozhenko Aleksey Yurievich – e-mail: filozhenko_a@mail.ru; phone: +79140678041; Underwater research and robotics Senior Researcher of the Energy Underwater Robotic Systems Laboratory.

Komlev Anton Vladimirovich – e-mail: kom86@bk.ru; phone: +79502884801; leading engineer of the Energy Underwater Robotic Systems Laboratory.

Kraskovskiy Mikhail Vladimirovich – e-mail: mikhail51289@yandex.ru; phone: +79502937111; postgraduate; junior researcher of the Energy Underwater Robotic Systems Laboratory.

Chemezov Ivan Aleksandrovich – Far Eastern Federal University (FEFU); e-mail: chemezov.i@inbox.ru; Russia, 690091, Vladivostok, Sukhanova street 8; phone: +79940239824; student of the Automation and Control department.