### УДК 621.3:001.3+14.232

# МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСФОРМАТОРА БЕСКОНТАКТНОЙ СИСТЕМЫ ЗАРЯДА АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ПОДВОДНОГО АППАРАТА

В.А. Герасимов<sup>1</sup>, А.В. Комлев<sup>2</sup>,
М.В. Красковский<sup>1</sup>,
А.Ю. Филоженко<sup>1</sup>

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН<sup>1</sup> Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Дальневосточный федеральный университет<sup>2</sup>

Объектом исследования в статье является специальный высокочастотный силовой трансформатор с разделяющимися первичной и вторичной частями.

В качестве задачи исследования поставлено обоснование и разработка методики расчета конструктивных параметров трансформатора, удовлетворяющего заданным условиям 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 предложена система относительных единиц, в которой эти параметры имеют постоянное значение для любых сердечников одного типоразмера,

Предложена методика расчета основных конструктивных параметров трансформатора, отвечающего требуемым электрическим характеристикам и допустимой ошибке автоматического причаливания подводного аппарата к средству подводного базирования. Экспериментальные натурные исследования убедительно подтверждают достоверность приведенных результатов, которые могут найти применение в системе бесконтактного заряда аккумуляторных батарей автономных необитаемых подводных аппаратов.

#### введение

Задача зарядки аккумуляторных батарей автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) связана с проблемой передачи на его борт электроэнергии [1]. При этом заряд может быть осуществлен как контактным способом при непосредственном электрическом соединении, так и бесконтактно за счет индукционной связи между катушками специального трансформатора [2, 3]. Бесконтактный способ пе-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а. Тел.: 8 (423) 2226416. E-mail: gerasimov@marine. febras.ru

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> 690000, Владивосток, ул. Суханова, 8. Тел.: 8 (423) 2433472. E-mail: kom86@bk.ru

редачи электроэнергии имеет существенные преимущества при необходимости выполнения заряда батарей под водой. Подобная задача возникает, например, при организации длительного подводного базирования автономного необитаемого подводного аппарата с использованием донного причального устройства (ДПУ). Преимущества такого способа заключаются в пониженных требованиях 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 [4]. При этом также упрощается автоматизация процесса зарядки аккумуляторных батарей АНПА и повышается належность 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 такие функциональные блоки, как аккумуляторная батарея (АБ), автоматическое зарядное устройство (АЗУ), высокочастотный трансформатор (ВчТ) с разделёнными первичной (Т1) и вторичной (Т2) обмотками и автономный инвертор напряжения (АИН) [5].

ДПУ может получать энергию, например, с помощью подводного кабеля от берегового центра управления или содержать автономный источник электроэнергии. Электроэнергия от ДПУ с помощью АИН преобразуется в переменное высокочастотное напряжение прямоугольной формы, которое подводится 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 (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 [6]. За счет немагнитного зазора между обмотками, равного суммарной тол-



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

щине контактных стенок первичной и вторичной частей, трансформатор имеет пониженное значение коэффициента  $k_M$  магнитной связи. Этот коэффициент пропорционален взаимной индуктивности M между обмотками ВчТ, а также зависит от индуктивностей  $L_1$  и  $L_2$  его первичной и вторичной обмоток.

Как известно, с уменьшением коэффициента магнитной связи для сохранения неизменного уровня перелаваемой активной мошности 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 [6–10]. 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 того, в качестве параметра, способствующего полной идентификации характеристик ВчТ, можно принять значение удельной индуктивности  $\Lambda$  витка его обмотки.

Эти параметры наиболее удобно использовать для сравнительной оценки эффективности различных исполнений ВчТ, поскольку они являются максимально обобщенными и, кроме того, легко измеряются в натурном эксперименте. Использование функциональных зависимостей коэффициента магнитной связи и удельной индуктивности витка от ошибок причаливания подводного аппарата к ДПУ лежит в основе предлагаемой методики расчета конструктивных параметров трансформатора.

Указанные функциональные зависимости однозначно соответствуют определенному конструктивному облику трансформатора, под которым здесь понимается сочетание характеристик материала магнитных экранов и их конфигурация, вид электрических обмоток и исполнение прочных оболочек частей трансформатора. Располагая такими зависимостями, можно просто выполнять масштабные преобразования конструктивных параметров трансформатора при изменении требований по исходным данным, например, по передаваемой мощности. Устанавливая функциональные закономерности и определяя характеризующую базовую величину для применения системы относительных единиц, можно распространить полученные результаты на другие конструктивные облики трансформатора, конкретное применение которых наилучшим образом удовлетворяет условиям размещения и эксплуатации системы бесконтактной передачи электроэнергии на подводный аппарат.

Определение функциональных зависимостей коэффициента связи и удельной индуктивности витка от ошибок причаливания можно выполнить путем математического моделирования, а результаты натурного эксперимента с ограниченным числом типоразмеров сердечников использовать как «контрольные точки» для оценки адекватности соответствующей математической модели. Такой подход дает возможность сопоставлять результаты компьютерного и натурного 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.

### 1. Математическое моделирование процессов в трансформаторе с немагнитным зазором

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 [11]. Выбор этого пакета для решения рассматриваемой задачи определяется возможностью учета «тонких» особенностей исследуемой конструкции с достаточной точностью результатов расчета в трехмерной постановке и приемлемым временем 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 PCH 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 также важным является наличие указанных сердечников v авторов, что позволяет провести необходимые измерения в натурных 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 конструкции 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



Рис. 2. 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

модели ВчТ, выполненной в конструкторской программной среде Solidworks, на рис. 3 приведена расчетная схема моделирования катушки ВчТ, используемая при расчете в программном пакете ANSYS Maxwell. Эта расчетная схема соответствует конструкции трансформатора, которая представлена на рис. 2 и выполнена с использованием чашечных ферритовых магнитопроводов Epcos PCH  $150 \times 30$ , с уложенными в них спиральными многослойными обмотками из провода литцендрата по двенадцать витков каждая. Ошибки причаливания подводного аппарата к ДПУ показаны как зазор h и смещение между осями обмоток s.

Анализ результатов математического моделирования и последующих натурных экспериментов с ВчТ показал, что некоторые относительные параметры являются постоянными для магнитопроводов разного размера, но одного типа. При этом оказалось, что для сердечников чашечного типа в качестве базовой величины для относительных единиц может быть принят наружный диаметр сердечника  $D_{max}$ . В этом случае удельную индуктивность витка обмотки можно определить в виде

$$A = \frac{L}{W^2 D_{\text{max}}},\tag{1}$$

где L- собственная индуктивность обмотки; W – число витков обмотки;  $D_{\rm max}$  – наружный диаметр сердечника чашечного типа.

Использование параметра (1) в сочетании с коэффициентом магнитной связи:

$$k_M = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

где M – взаимная индуктивность обмоток ВчТ, а  $L_1, L_2$  – собственные индуктивности первичной и вторичной обмоток, позволяет полностью определить свойства конкретного ВчТ. При этом легко выполняется пересчет конструктивных параметров для масштабного преобразования некоторого исходного варианта ВчТ в другой конструктив трансформатора, меньшей или большей мощности, но выполненного на сердечниках аналогичного типа.

Для анализа влияния зазора *h* между контактными стенками и межосевого смещения *s* на эффективность передачи электроэнергии предлагается использовать относительный зазор  $\delta$  и относительное смещение  $\sigma$ , которые, как и удельную индуктивность витка (1), можно определить в отношении к наружному диаметру  $D_{\text{max}}$  сердечника чашечного типа:

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

В результате компьютерного эксперимента в программном пакете ANSYS Maxwell на примере чашечных сердечников Ерсоз двух типов PCH 150 × 30 и PS 68 × 14,5 получены двумерные массивы значений коэффициента  $k_M$  связи и удельной индуктивности  $\Lambda$  в функции зазора  $\delta$  и смещения  $\sigma$ , которые аппроксимированы полиномами:

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

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

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

В приведенном примере сердечник РСН 150 × 30 имеет наруж-



*Puc. 3.* Расчетная схема трансформатора в программе ANSYS Maxwell: а – осевое сечение расчетной модели ВчТ; б – вид сверху на расчетную модель



Рис. 4. Обобщенные зависимости коэффициента связи  $k_{_M}$  (а) и удельной индуктивности витка Λ (б) в функции относительного зазора δ и смещения σ

ный диаметр  $D_{\max}$  150 мм и высоту 30 мм, а для сердечника PS 68 × 14,5 наружный диаметр  $D_{\max}$  составляет 68 мм и высота 14,5 мм.

Наглядное подтверждение правомерности выбора в качестве базы наружного диаметра  $D_{\rm max}$  чашечного сердечника дают результаты компьютерного эксперимента, представленные в виде трехмерных поверхностей на рис. 4. Эти поверхности, представляющие зависимости массивов коэффициента связи  $k_M$  (3) и значений удельной индуктивности  $\Lambda$  (4) в функции относительного зазора  $\delta$  между сердечниками и относительного межосевого смещения  $\sigma$  (2), полностью совпадают для указанных сердечников.

Выбор в качестве базового параметра значения наружного диаметра  $D_{\rm max}$  является удобным решением для сердечников чашечного типа, 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 магнитным экраном в качестве базового параметра 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.

# 2. Экспериментальные исследования

Целью экспериментальных исследований являлись оценка адекватности моделей, принятых в компьютерных экспериментах, и подтверждение правомерности представления параметров трансформатора в принятой системе относительных единиц.

Натурные эксперименты проводились с трансформаторами на сердечниках тех же типоразмеров, которые были использованы для математического моделирования.

Для экспериментального определения коэффициента магнитной связи между обмотками использовалась известная формула [12]:

$$k_{M} = \sqrt{1 - \frac{L_{K1}}{L_{1}}} = \sqrt{1 - \frac{L_{K2}}{L_{2}}},$$

где  $L_1, L_2$  – индуктивности первичной и вторичной обмоток трансформатора;

*L*<sub>*K1*</sub>, *L*<sub>*K2*</sub>–индуктивности первичной и вторичной обмоток при коротко-

замкнутых вторичной и первичной обмотках трансформатора соответственно.

Удельная индуктивность витка  $\Lambda$  определялась с использованием выражения (1). Результаты экспериментального определения  $k_M$  и  $\Lambda$  при изменении относительного зазора  $\delta$  и нулевом межосевом смещении  $\sigma$  показаны на рис. 5.

Графики на рис. 5 показывают, что в принятой системе относительных единиц коэффициент связи и удельная индуктивность витка имеют постоянное значение для конкретного значения относительного зазора вне зависимости от размера сердечника.

Экспериментальное определение коэффициента  $k_M$  связи и удельной индуктивности  $\Lambda$  витка при изменении межосевого смещения обмоток трансформатора подтверждает, что здесь также эти параметры в относительных единицах имеют постоянные значения для относительного зазора  $\delta$  независимо от наружного диаметра  $D_{\rm max}$  сердечника (рис. 6).

Сопоставление приведенных на рис. 5 и 6 результатов математического моделирования и натурных экспериментов подтверждает правомерность принятых решений



Рис. 5. Зависимости коэффициента связи k<sub>M</sub> (а) и удельной индуктивности витка обмотки Λ (б) в функции относительного зазора δ при смещении σ = 0:
график 1 – результаты моделирования трансформатора на сердечниках PCH 150 × 30;
маркеры 2 – результаты эксперимента для трансформатора на сердечниках PCH 150 × 30;
маркеры 3 – результаты эксперимента для трансформатора на сердечниках PCH 30 × 30;

и свидетельствует об адекватности принятых математических моделей трансформаторов характеристикам реальных объектов исследования.

Полученные в результате компьютерного эксперимента двумерные массивы значений коэффициента  $k_M$  связи и удельной индуктивности  $\Lambda$  в функции зазора  $\delta$  и смещения  $\sigma$ , которые аппроксимированы полиномами (3) и (4) соответственно, положены в основу предлагаемой методики конструктивного расчета трансформатора.

Важно отметить, что предложенный способ представления параметров трансформатора в от-

k

0,6

0,4

0,2

0

-0.2

2

носительном виде позволяет при проектировании ВчТ оперировать практически 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.

Предлагаемая методика предполагает наличие полиномов (3) и (4) и численных значений коэффициентов  $a_{ij}$ ,  $b_{ij}$ , которые являются характерными для сердечника конкретного типа. В настоящей статье исследования ограничены сердечниками чашечного типа. Ис-





26 ПОДВОДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РОБОТОТЕХНИКА. 2018. № 1(25)

пользование сердечников другой формы, например в виде плоских ферромагнитных экранов, потребует определения соответствующих коэффициентов для указанных полиномов, но методика расчета трансформатора при этом остается неизменной.

## 3. Методика расчета параметров трансформатора

Цель расчета формулируется в следующем виде: при заданных ограничениях на условия применения и принятых исходных данных определить конструкцию трансформатора, обеспечивающую передачу заданной активной мощности. При этом в состав эквивалентного 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. Например, для АНПА средних размеров с круглым поперечным сечением, диаметр которого составляет 400-600 мм, диаметр  $D_{\rm max}$  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 (в статье методика ограничена сердечниками чашечного типа).

σ

К первому варианту относится задача, при которой заданы ток номинальный заряда  $I_{AB}$  и конечное напряжение  $U_{AE}$  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 сечение 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 расчет для определенного сердечника, размеры которого не должны превышать заданных ограничений, например, по условиям применения. В результате расчета определяется значение максимальной передаваемой мощности.

Последовательность расчета можно представить в виде обобщенной блок-схемы, показанной на рис. 7 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 [13].

В соответствии с приведенной последовательностью расчета и с использованием известных формул определяются число витков  $W_2$  и сечение  $S_2$  провода вторичной обмотки (блок 4). В случае выполнения условий размещения обмотки в окне сердечника (блок 5), выполняется расчет числа витков  $W_1$  и сечения провода  $S_1$  первичной обмотки (блок 6). Если и первичная обмотка размещается в окне сердечника (проверка условия в блоке 7), то расчет завершается.

Приведенная последовательность вычислений имеет место при выполнении условий в соответст-



Рис. 7. Блок-схема алгоритма расчёта трансформатора

вующих блоках и является самой короткой, приводящей к законченному решению. Другая, увеличенная последовательность вычислений получается, если, например, не выполняется требование по заполнению окна сердечника (блок 5). В этом случае вычисления от блока 5 через блок 10 переходят к коррекции исходных данных (блок 11), возможно, к выбору сердечника большего размера. Если этот вариант неприемлем, то расчет должен следовать к блоку 12, что приведет к увеличению числа каналов в составе трансформатора.

Возможны и другие последовательности вычислений, зависящие от выполнения указанных в блок-схеме условий и приводящие к корректировке исходных данных. При этом уточнение параметров провода, типа сердечника, а также числа пар сердечников, образующих трансформатор системы, может потребовать более одной итерации. Основные расчетные формулы для приведенной методики имеют следующий вид [13]. 1. Число витков вторичной обмотки:

$$W_2 = \sqrt{\frac{k_{DC} \cdot U_{AB}}{4\sqrt{3} \cdot I_{AB} \cdot f \cdot \Lambda \cdot D_T \cdot (1 - k_M^2)}},$$

где  $k_{DC}$  – коэффициент запаса по напряжению, необходимый для регулирования тока и напряжения заряда аккумуляторной батареи посредством зарядного устройства;  $U_{AB}$ ,  $I_{AB}$  – номинальные значения напряжения (В) и тока (А) заряда аккумуляторной батареи соответственно; f – частота коммутации автономного инвертора, Гц;  $\Lambda$  – удельная индуктивность витка обмотки, Гн/м;  $D_{max}$  – наружный диаметр сердечника, м;  $k_M$  – коэффициент магнитной связи.

2. Сечение провода вторичной обмотки:

$$S_2 = \frac{I_2}{J}, \text{ MM}^2,$$

где  $I_2$  – ток вторичной обмотки, можно принять  $I_2 = I_{AB}$ ; J – плотность тока во вторичной обмотке, А/мм<sup>2</sup>.

3. Число витков первичной обмотки:

$$W_1 = \frac{k_M \cdot U_1 \cdot W_2}{\sqrt{3} \cdot k_{DC} \cdot U_{AB}}$$

где  $U_1$  – напряжение питания автономного инвертора.

4. Сечение провода первичной обмотки:

$$S_1 = \frac{k_{DC} \cdot U_{AB}}{4 \cdot f \cdot W_1 \cdot W_2 \cdot k_M \cdot \Lambda \cdot D_{\max} \cdot J \cdot (1 - k^2)}, \text{ mm}^2$$

Предварительно, с использованием полиномов (3), (4), должны быть определены значения коэффициента связи  $k_M$  и удельной индуктивности  $\Lambda$  витка обмотки, а также выбран типоразмер сердечника с учетом рекомендаций по соотношению размеров сердечника и диаметра АНПА.

В качестве примера, иллюстрирующего применение методики, можно показать требуемый набор исходных данных и полученные при этом результаты расчета конструктивных параметров трансформатора.

Для некоторых конкретных условий использования трансформатора в системе бесконтактной передачи энергии примем исходные данные в следующем виде:

- номинальное напряжение аккумуляторной батареи,  $U_{AB} = 60$  В;
- ток заряда,  $I_{AB} = 6,5$  А;
- частота инвертора,  $f = 40 \ \kappa \Gamma \mu$ ; - плотность тока в прово-
- де обмоток трансформатора,  $J = 7,5 \text{ A/mm}^2$ ;
- суммарный немагнитный зазор между сердечниками *h* = 7 мм;
- межосевое смещение обмоток, s = 0 мм;
- коэффициент запаса по напряжению, k<sub>DC</sub> = 1,2;
- напряжение питания инвертора, U<sub>1</sub> = 200 В;
- диаметр АНПА 533 мм.

Следуя принятым рекомендациям и проводя необходимые вычисления, можно получить искомые конструктивные параметры трансформатора:

- трансформатор может быть выполнен на одной паре сердечников, выбран тип PS 68 × 14,5 производства Ерсоз с наружным диаметром D<sub>max</sub> = 68 мм;
- число витков вторичной обмотки W<sub>2</sub> = 19;
- сечение провода вторичной обмотки S<sub>2</sub> = 0,87 мм<sup>2</sup>;
- число витков первичной обмотки  $W_1 = 19;$
- сечение провода первичной обмотки S<sub>1</sub> = 2,4 мм<sup>2</sup>.

Оценка справедливости предложенной методики может быть проведена по экспериментальной внешней характеристике трансформатора с конструктивными параметрами, полученными в результате расчета. Так, на рис. 8 показаны внешние характеристики для рассчитанного трансформатора в системе бесконтактной передачи энергии, при этом характеристика 1 получена в результате аналитического расчета по известному выражению [12]:

$$U_2 = U_{XX} \sqrt{1 - \frac{I_2}{I_{K3}}},$$

где  $U_{XX}$  – напряжение холостого хода на вторичной стороне трансформатора,

$$U_{XX} = k_M \frac{W_2}{W_1} U_1$$

 $I_{K3}$  – ток короткого замыкания на вторичной стороне трансформатора.

$$I_{K3} = \frac{k_M \cdot U_1}{8f \cdot W_1 \cdot W_2 \cdot \Lambda \cdot D_{MAX} \cdot \left(1 - k_M^2\right)}.$$
 (5)

График 2 на рис. 8 показывает характеристику, полученную в натурном эксперименте с этим же трансформатором. Отличие между аналитической характеристикой и экспериментальной объясняется влиянием дополнительной не учтенной в расчетах 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 скомпенсировать влияние дополнительной индуктивности забортного монтажа можно за счет уменьшения частоты инвертора примерно на 10%. При этом экспериментальные точки 3 внешней ха-



Рис. 8. Внешние характеристики системы бесконтактной передачи электроэнергии: 1 – аналитический расчет; 2 – натурный эксперимент; 3 – фактическая характеристика при коррекции частоты инвертора

рактеристики системы практически совпадают с расчетным графиком 1.

Следует заметить, что округление полученных в расчете числа витков до целых значений вносит некоторую погрешность, которая проявляется в смещении номинальной рабочей точки системы. Поскольку это округление проводится в большую сторону, то уменьшается значение тока І<sub>кз</sub> короткого замыкания (5), при этом на полученной внешней характеристике заданному рабочему току  $I_{4B} = 6,5$  A соответствует меньшее напряжение на вторичной стороне трансформатора  $U_{2} = 62,5$  В. Необходимую подстройку системы для получения требуемого значения напряжения, заданного в начальных условиях  $(U_{2B} = U_{AB} \cdot k_{DC} = 60B \cdot 1, 2 = 72B),$ можно получить небольшим увеличением напряжения U<sub>1</sub> питания автономного инвертора при пропорциональном увеличении частоты f его коммутации.

Таким образом, в результате выполнения расчетов по предложенной методике определяются основные конструктивные параметры трансформатора системы бесконтактной передачи электроэнергии: тип чашечного сердечника, число витков и сечение провода первичной и вторичной обмоток, соответствующие заданным требованиям. Эти параметры могут быть первым приближением, которое при необходимости легко корректируется в нужную сторону изменением, например, частоты f коммутации инвертора или напряжения питания инвертора  $U_1$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методика определения конструктивных параметров трансформатора, являющегося базовым узлом 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 в соответствии заданием. В основу исследований положено сбалансированное сочетание математического моделирования и натурного 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. Методика и последовательность вычислительных процедур при этом остаются неизменными.

#### ЛИТЕРАТУРА

6. Герасимов В.А., Красковский М.В., Филоженко А.Ю. Повышение эффективности системы бесконтактного заряда аккумуляторных батарей автономного необитаемого подводного аппарата // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2017. № 1. С. 108–118.

7. Kraskovskiy M.V., Gerasimov V.A., Kuvshinov G.E., Filozhenko A. Yu. The use of resonance for current downloading of the transistor keys of the inverter // Int. Journ. of Control Theory and Applications. 2016. Vol. 9, Is. 30. P. 305–311.

8. Герасимов В.А, Красковский М.В., Кувшинов Г.Е., Филоженко А.Ю. Повышение эффективности бесконтактной передачи электроэнергии на автономный подводный аппарат // Подводные исследования и робототехника. 2016. № 1. С. 24–30.

9. Герасимов В.А., Красковский М.В., Филоженко А.Ю. Автономный инвертор напряжения с последовательным резонансным контуром // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2016. № 4. С. 147–158.

10. Герасимов В.А., Красковский М.В., Кувшинов Г.Е., Филоженко А.Ю. Использование резонанса для токовой разгрузки транзисторных ключей инвертора // Двойные технологии. 2016. № 4(77). С. 55–60.

11. ANSYS Maxwell – Low Frequency Electromagnetic Field Simulation [Электронный ресурс]. – URL: http://www.ansys.com/Products/Electronics/ ANSYS-Maxwell (дата обращения: 12.07.2016).

12. Герасимов В.А., Копылов В.В., Кувшинов 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.

13. Герасимов В.А., Красковский М.В., Филоженко А.Ю., Чепурин П.И. Обеспечение передачи заданной мощности в системе бесконтактного заряда аккумуляторных батарей подводного аппарата // Вестн. Южно-Урал. гос. ун-та. 2017. Т. 17, № 4. С. 48–58.

<sup>1.</sup> Wang X., Shang J., Luo Z., Tang L., Zhang X., Li J. Reviews of Power Systems and Environmental Energy Conversion for 1. Reviews of Power Systems and Environmental Energy Conversion for Unmanned Underwater Vehicles [Электронный pecypc] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012. Vol. 16, Is. 4. P. 1958–1970. – URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111006095 (дата обращения: 12.01.2017).

<sup>2.</sup> Пат. 2564199 РФ, МПК Н02Ј 7/00. 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.

<sup>3.</sup> McGinnis T., Henze C.P., Conroy K. Inductive power system for autonomous underwater vehicles [Электронный ресурс] // OCEANS. 2007. 6 p. – URL: http://ieeexplore.ieee.org/document/4449219/ (дата обращения: 15.06.2017).

<sup>4.</sup> Илларионов Г.Ю, Щербатюк А.Ф., Кушнерик А.А., Квашинин А.Г. Донные причальные устройства для автономных необитаемых подводных аппаратов // Двойные технологии. 2011. № 1. С. 13–21.

<sup>5.</sup> Герасимов В.А., Филоженко А.Ю., Чепурин П.И. Структура системы электроснабжения автономного необитаемого подводного аппарата // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2013. № 3(140). С. 47–55.