

Раздел III. Системы энергетики, приводная и датчиковая аппаратура

УДК 621.3:001.3+14.232

DOI 10.18522/2311-3103-2020-1-156-170

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

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ТРАНСФОРМАТОРА СИСТЕМЫ БЕСКОНТАКТНОГО ЗАРЯДА АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ АНПА

Способ бесконтактной подводной передачи электроэнергии на автономный необитаемый подводный аппарат (АНПА) для заряда его аккумуляторных батарей (АБ) практически не имеет альтернативы при организации подводного базирования аппарата. В подобной системе применяется трансформатор с разделяющимися первичной и вторичной частями, которые разделены конструктивным немагнитным зазором, определяемым суммарной толщиной стыковочных стенок. Конструктивные и электромагнитные характеристики трансформатора в значительной степени влияют на общую эффективность системы при выполнении главной задачи – заряд АБ за выделенное время. Наличие немагнитного зазора требует специальной методики расчета, для которой исходными данными должны быть, наряду с параметрами процесса заряда АБ, еще также значения ошибок позиционирования АНПА при подводном причаливании к базе. В качестве задачи исследования в работе 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 относительной магнитной проницаемости обмотки и обосновано их применение для полной идентификации свойств исследуемого трансформатора. Предложена система относительных единиц, в которой характеризующие параметры имеют постоянное значение для сердечников, связанных определенными геометрическими соотношениями, что позволяет легко выполнять масштабирование результатов полученных технических решений при изменении требований по передаваемой электрической мощности. В результате исследований предложена методика расчета основных конструктивных параметров трансформаторов. Исходные данные в расчете принимаются в виде сочетания требуемых электрических характеристик трансформатора и его геометрических соотношений при выполнении предъявляемых ограничений по допустимой ошибке автоматического причаливания подводного аппарата к средству подводного базирования. Полученные результаты распространяются на трансформаторы с чащечными ферритовыми сердечниками и на трансформаторы с сердечниками в виде плоских ферритовых экранов, позволяющих формировать магнитопроводы необходимых размеров и конфигураций. Результатом расчета является конструкция трансформатора с электрическими характеристиками, наилучшим образом удовлетворяющими условиям его применения. Экспериментальные натурные исследования убедительно подтверждают достоверность методики.

Подводный аппарат; заряд аккумуляторных батарей; бесконтактная передача электроэнергии; высокочастотный трансформатор; конструктивные параметры; магнитные экраны; методика расчета.

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

**TRANSFORMER CALCULATION METHOD DEVELOPMENT OF THE AUV
CONTACT-LESS BATTERY CHARGING SYSTEM**

The method of contactless underwater transmission of electricity to an autonomous underwater vehicle (AUV) for charging its rechargeable batteries has practically no alternative when organizing long underwater operation of the AUV. In such system, transformer with separated primary and secondary parts, which are separated by a constructive non-magnetic gap, determined by the total thickness of the connecting walls, is used. The design and electromagnetic characteristics of the transformer significantly affect the overall system efficiency when performing the main task - battery charge for a given time. The presence of a non-magnetic gap requires a special calculation procedure, for which the initial data should be the values of the AUV positioning errors when underwater approaching the base, along with the parameters of the batteries charge process. The study task is the justification and development of a methodology for calculating the design transformer parameters that meets the specified operating conditions. The research is based on mathematical modeling of electromagnetic processes in a transformer in the ANSYS Maxwell software package in combination with a full-scale experiment. The determining parameters in the form of the magnetic coupling coefficient and the winding relative magnetic permeability are founded; their use is justified for the complete identification of the studied transformer properties. A system of relative units is proposed in which the characterizing parameters have a constant value for cores connected by certain geometric relationships, which makes it easy to scale the results of the obtained technical solutions when changing the requirements for the transmitted electric power. As a result of research, a method for calculating the main design parameters of transformers is proposed. The initial data in the calculation is taken as a combination of the required transformer electrical characteristics and its geometric relations when the required restrictions are met for the permissible error of AUV automatic mooring to the dock-station. The results obtained apply to transformers with cup ferrite cores and with flat magnetic cores, which make it possible to form magnetic cores of the required sizes and configurations. The result of the calculation is the design of the transformer with electrical characteristics that best suit the conditions of its application. Experimental field studies convincingly confirm the correctness of the calculation method.

Autonomous underwater vehicle; battery charge; contactless power transmission; high-frequency transformer; design parameters; flat magnetic cores; calculation method.

Введение. Применение бесконтактной передачи электроэнергии на автономный необитаемый подводный аппарат (АНПА) для заряда его аккумуляторных батарей приобретает повышенную актуальность при организации подводного базирования АНПА. В подобной системе общая эффективность процесса бесконтактной передачи электроэнергии (БПЭ) в значительной мере определяется характеристиками специального высокочастотного трансформатора (ВЧТ), являющегося необходимым функциональным элементом системы [1–5]. Такой трансформатор имеет разделяющиеся первичную и вторичную части, которые представляют собой герметичные оболочки с размещенными внутри обмотками [6–8]. Первичная часть трансформатора устанавливается на базе (например, на донном причальном устройстве), а вторичная часть – на АНПА [9, 10]. За счет немагнитного зазора между обмотками, трансформатор имеет пониженное значение коэффициента k_M магнитной связи. Кроме этого, коэффициент магнитной связи зависит от межосевого смещения между обмотками за счет погрешностей автоматического причаливания АНПА к базе. В общем случае, магнитопровод такого трансформатора может быть выполнен на ферритовых чашечных сердечниках, при этом нетиповой набор исходных данных определяют особенность такого трансформатора, и не позволяют использовать для определения его конструкции принятые в электротехнике методики расчета.

В некоторых условиях применения системы бесконтактного заряда желательно, чтобы контактные поверхности трансформатора совпадали с обводами корпуса АНПА в месте его установки, что определяют предпочтительность использования в качестве магнитопроводов плоских магнитных экранов. Переход к плоским магнитным экранам позволяет создавать конструкции трансформаторов, в ряде случаев, способствующих оптимизации процедуры автоматического пр�ачивания АНПА к базе.

Задачей, которая должна быть решена методикой расчета, является определение типа магнитопровода, а также сечения провода обмоток и числа витков при обеспечении передачи заданного значения активной мощности на АНПА. Возможно, что для удовлетворения поставленным требованиям и ограничениям может потребоваться дробление передаваемой мощности и использование нескольких трансформаторов, включенных последовательно или параллельно [11].

Методика расчета трансформаторов на чашечных сердечниках. В основе предлагаемой методики расчета [12] лежит использование коэффициента магнитной связи k_M между обмотками. Кроме этого, в предложенном подходе в качестве параметра, способствующего полной идентификации характеристик ВЧТ, принята также относительная магнитная проницаемость μ_r его обмотки. Практика показала, что именно эти параметры наиболее удобны для сравнительной оценки эффективности различных исполнений ВЧТ, поскольку они являются максимально обобщенными и, кроме этого, легко измеряются в натурном эксперименте. При этом в методике используются функциональные зависимости указанных электромагнитных характеристик от зазора h между обмотками, а также от межосевого смещения s обмоток.

Число типов магнитопроводов, пригодных для использования в системе бесконтактного заряда и предлагаемых промышленностью, ограничено. Так, например, ферритовые магнитопроводы чашечного типа имеют хорошие энергетические показатели и трансформаторы на их основе удобны для размещения в АНПА и на базе.

В ходе исследований было установлено, что такие сердечники в определенном смысле являются геометрически подобными, что позволило ввести систему относительных единиц с базовой величиной в виде наружного диаметра сердечника D_{MAX} . При этом относительная магнитная проницаемость обмотки трансформатора используется в виде

$$\mu_r = \frac{L}{\mu_0 \cdot w^2 \cdot D_{max}}, \quad (1)$$

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

Параметр (1) в сочетании с коэффициентом k_M магнитной связи позволяет полностью определить свойства конкретного ВЧТ. Это обстоятельство использовано в предлагаемой методике расчета конструкции трансформатора.

Для анализа влияния зазора h между контактными стенками и межосевого смещения s обмоток на эффективность передачи электроэнергии в методике предлагается использовать относительный зазор δ и относительное смещение σ , которые, как и относительная магнитная проницаемость катушки (1), определяются в отношении к наружному диаметру D_{MAX} сердечника.

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

В результате компьютерного эксперимента в программном пакете Maxwell [13] получены двумерные массивы значений коэффициента k_M связи и относительной магнитной проницаемости μ_r в функции зазора δ и смещения σ , которые аппроксимированы полиномами:

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

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

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

Массивы коэффициентов (3) и (4) можно графически представить в виде трехмерных поверхностей, как показано на рис. 1. При этом оказывается, что эти поверхности в принятой системе относительных единиц, построенные, например, для двух конкретных типоразмеров чашечных сердечников, совпадают.

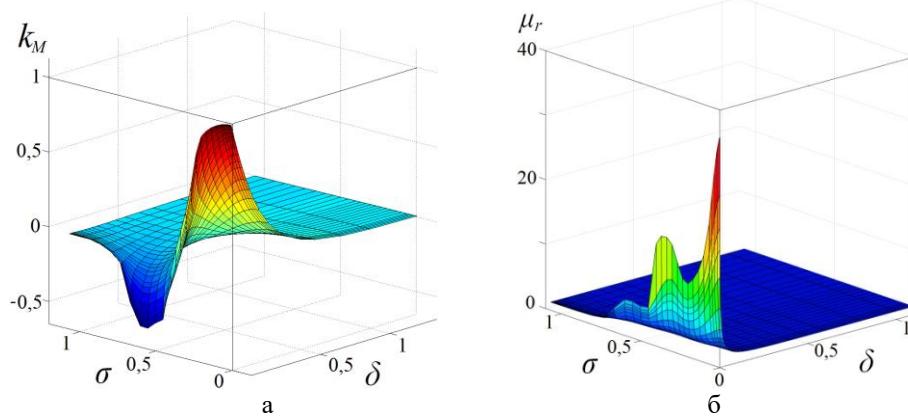


Рис. 1. Зависимости электромагнитных параметров трансформатора от относительного зазора δ и смещения σ : а – коэффициент связи k_M ; б – относительная магнитная проницаемость μ_r .

Учитывая, что один из сердечников имеет наружный диаметр D_{MAX} 150 мм и высоту 30 мм, а для второго сердечника наружный диаметр D_{MAX} составляет 68 мм и высота – 14,5 мм, можно сделать заключение о справедливости гипотезы об эквивалентности геометрического подобия сердечников указанным электромагнитным характеристикам в относительных единицах. Это было положение подтверждено последующими расчетами и экспериментами и является базовым в предлагаемой методике.

Таким образом, если трансформатор выполняется на ферритовых сердечниках чашечного типа, то должны быть определены соответствующие полиномы (3) и (4) для сердечников именно этого типа, с помощью которых можно будет найти коэффициент связи k_M и относительную магнитную проницаемость μ_r обмоток трансформатора, обеспечивающего передачу заданного значения активной электрической мощности.

В качестве основных исходных данных для расчета трансформатора должны быть принятые следующие параметры: номинальный ток I_{AB} заряда и конечное напряжение U_{AB} полностью заряженной аккумуляторной батареи, т.е. значение номинальной передаваемой мощности. Результатом расчета будет определение конструктивных параметров трансформатора, обеспечивающих решение указанной задачи. Под конструктивными параметрами здесь понимается тип, диаметр и количество сердечников, входящих в состав ВЧТ, а также параметры провода его обмоток и числа витков.

Последовательность расчета можно представить алгоритмом действий в виде блок-схемы, показанной на рисунке 2. Расчетные формулы, используемые в методике, были получены в [12, 14].

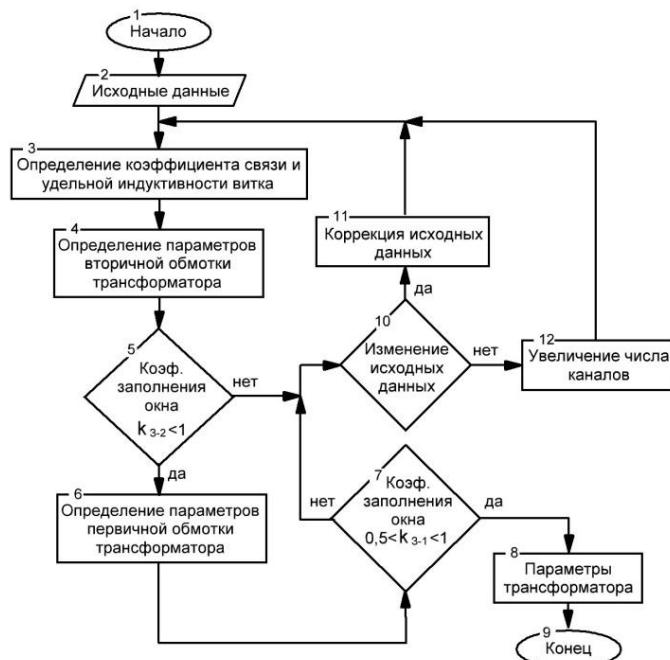


Рис. 2. Блок-схема расчета трансформатора с сердечниками чашечного типа

В методике расчета также должны быть заданы следующие исходные данные:

- ◆ плотность тока в проводе обмоток J ;
- ◆ частота коммутации автономного инвертора f_{MAX} ,
- ◆ коэффициент k_{DC} , учитывающий необходимый запас по входному напряжению зарядного устройства,
- ◆ толщина контактной стенки h_{CT} оболочки трансформатора;
- ◆ напряжение U_1 питания инвертора;
- ◆ предварительно принимается, что ВЧТ состоит из одного трансформатора с сердечником чашечного типа с 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 [12].

Коэффициент связи k_M и относительная магнитная проницаемость обмотки μ_r для заданного относительного зазора δ и относительного смещения σ определяются из полиномов (3) и (4), полученных предварительно (блок 3), и являются основой для дальнейшего расчета.

В соответствии с приведенной блок-схемой расчета и с использованием известных формул [12, 14] определяются число витков W_2 и сечение S_2 провода вторичной обмотки. В случае выполнения условий размещения обмотки в окне выбранного 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.

Необходимость дополнительных итераций расчета появляется, если, например, не выполняется требование по заполнению окна сердечника (блок 5). В этом случае последовательность вычислений через блок 10 переходит к коррекции исходных данных (блок 2), сводящуюся к выбору, например, другого размера сердечника или типа провода.

Возможны иные последовательности вычислений, зависящие от выполнения указанных в блок-схеме условий, и приводящие к корректировке исходных данных (например, изменению числа каналов передачи энергии за счет дробления передаваемой мощности и др.). При этом уточнение параметров провода, типа сердечника, а также числа пар сердечников, образующих трансформатор системы, может потребовать двух – трех итераций.

Справедливость методики подтверждена натурным экспериментом с трансформатором, специально изготовленным для конкретного примера расчета. Оценка достоверности результатов расчета может быть проведена, например, по внешним характеристикам трансформатора для расчетного варианта и для соответствующего эксперимента, показанным на рис. 3.

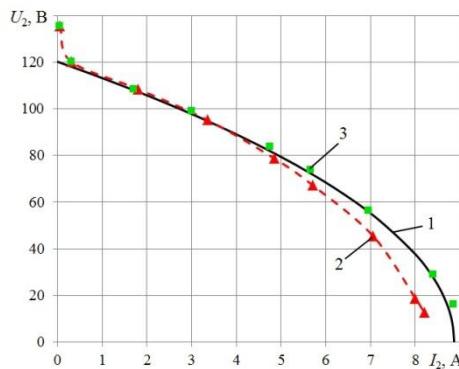


Рис. 3. Внешние характеристики трансформатора: 1 – расчет; 2 – натурный эксперимент; 3 – фактическая характеристика при коррекции частоты инвертора

Следует отметить, что отличие между расчетной характеристикой (график 1) и экспериментальными результатами (график 2) объясняется влиянием дополнительной индуктивности проводов от выводов трансформатора к измерительным приборам, имеющей место в эксперименте и не учтенной в расчетах. Одним из вариантов исключения указанного рассогласования может быть некоторое уменьшение частоты инвертора и, при этом, получение точного соответствия реального трансформатора заданным исходным данным (график 3).

Методика расчета трансформаторов с плоскими экранами. Наряду с трансформаторами на чашечных сердечниках, для которых выше приведена методика расчета, в системах бесконтактной передачи электроэнергии на АНПА могут использоваться трансформаторы с плоскими экранами. Это особая конструкция, нашедшая применение и проявляющая положительные качества только, пожалуй, в такой специфичной области как электрообеспечение АНПА.

Специфика объясняется следующим: здесь действуют ограничения на габариты ВчТ, как правило, в поперечном направлении. Представляя такой трансформатор в виде плоской несимметричной конструкции с удлинением вдоль оси аппарата, можно сохранить электрические характеристики трансформатора при уменьшенном поперечном размере. А это свойство приближает форму контактных

поверхностей к обводам корпуса АНПА в месте его установки. В большинстве случаев отсутствие выступающих деталей на корпусе упрощает процесс позиционирования аппарата в заданном положении при автоматическом причаливании к базе. Кроме этого, отсутствие выступов или углублений конструкций в месте установки трансформаторов улучшает обтекаемость корпуса аппарата и снижает шумность при его движении [15, 16].

Переход к плоским магнитным экранам усложняет идентификацию типа трансформатора. Если для чашечных сердечников в качестве базовой величины можно было принимать их максимальный диаметр [12], то для плоских необходимо учитывать как геометрические размеры сторон плоского экрана, так и соотношение между размерами сторон, т.е. форму магнитного экрана, что должно быть отражено в определении базового параметра для относительной системы единиц.

Исследования показали, что в основу предлагаемой методики следует положить, также как для чашечных сердечников, использование функциональных зависимостей коэффициента k_M магнитной связи и относительной магнитной проницаемости μ_r его обмотки в функции от ошибок причаливания. В качестве базового параметра, при этом, целесообразно принять ширину A экрана и ввести коэффициент формы φ , равный отношению длины B экрана к ширине A . Коэффициент формы φ может изменяться от единицы (для квадрата) до некоторого значения, выбор которого будет определяться рядом факторов (требования к компоновке вторичной части трансформатора на АНПА, габаритные ограничения, условия оптимизации коэффициента магнитной связи при передаче заданной мощности и др.). Как показывает опыт, располагая такими зависимостями, можно однозначно рассчитать конструктивные параметры трансформатора, обеспечивающего передачу заданной мощности, а также достаточно просто выполнять масштабные преобразования этих конструктивных параметров при изменении исходных требований к системе передачи энергии [17].

Суть методики расчета конструктивных параметров заключается в следующем. Для принятого типа сердечников трансформатора рассчитываются двумерные массивы значений коэффициентов k_M и μ_r в функции относительного зазора δ и относительного смещения σ , которые аппроксимируются полиномами:

$$k_M = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \sum_{l=0}^k a_{ijl} \cdot \delta^i \cdot \sigma^j \cdot \varphi^l, \quad (6)$$

$$\mu_r = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \sum_{l=0}^k (b_{ijl} \cdot \delta^i \cdot \tau^j \cdot \varphi^l + c_{ijl} \cdot \delta^i \cdot \sigma^j \cdot \varphi^l). \quad (7)$$

Геометрическое представление полинома (1) в виде трехмерных поверхностей является более сложным по сравнению с аналогичной операцией для чашечных сердечников [12] и представляет набор таких поверхностей $k_M = f(\delta, \sigma)$, каждая из которых соответствует определенному значению коэффициента формы φ .

Общий вид и геометрические соотношения для элементов трансформатора показаны на рис. 4, где обозначено: h – суммарный немагнитный зазор, t – высота обмотки с учётом толщины каркаса, t' – высота обмотки, A – ширина обмотки, B – длина обмотки, S_A , S_B – межосевые смещения по стороне A и по стороне B соответственно. Для выражения таких относительных величин, как высота обмотки или соответствующие зазоры, используется положение средней плоскости, проходящей через середину толщины обмотки. При этом относительный зазор между обмотками определяется как $\delta = (h+t)/A$, а относительные смещения по короткой стороне A и по длинной стороне B – как $\sigma_\alpha = S_A/A$ и $\sigma_\beta = S_B/B$ соответственно.

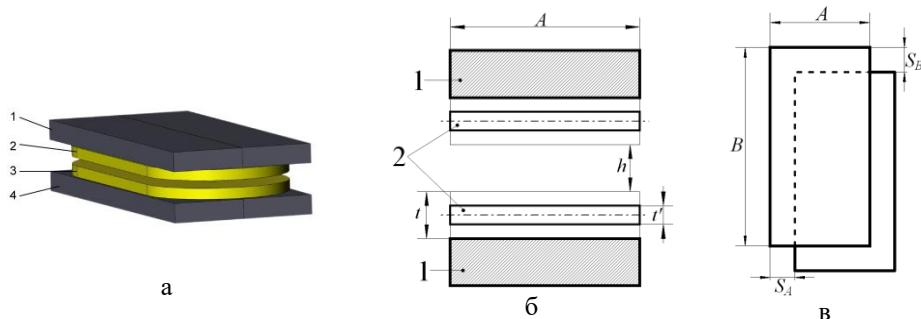


Рис. 4. Геометрические соотношения для плоского трансформатора: а – общий вид (1, 4 – ферромагнитные экраны, 2, 3 – первичная и вторичная обмотки); б – поперечное сечение (1 – экраны, 2 – обмотки); в – вид сверху

Полином (7) можно представить геометрически уже в виде суммы наборов трехмерных поверхностей, расположенных в фазовом пространстве пятого порядка, координатами которого являются δ , δ_μ , σ , τ и φ . Искомыми величинами являются коэффициенты a_{ijl} , b_{ijl} , c_{ijl} . Картина получается достаточно сложная и решение можно найти с помощью математического моделирования, построенного в виде компьютерного эксперимента для моделей трансформаторов с различными сочетаниями исходных данных.

Так, например, на рис. 5,а показана поверхность (6), полученная в результате моделирования плоского трансформатора с квадратным экраном, т.е. для $\varphi = 1$. Аналогично получена трехмерная поверхность (7), показанная на рис. 5,б, также для квадратного экрана. Изменению коэффициента формы экрана φ будет соответствовать некоторая другая поверхность. Полный вид трехмерных картин $k_M = f(\delta, \sigma, \varphi)$ и $\mu_r = f(\delta, \sigma, \tau, \varphi)$ можно получить, повторяя вычисления по выражениям (6) и (7) для различных значений коэффициента формы φ .

Расчеты показали, что трехмерная картина для коэффициента связи k_M при изменении формы экрана будет представлять серию поверхностей, касающихся в точке $\sigma = 0$ и далее незначительно расходящихся с пересечениями в области повышенных значений σ .

Трехмерная картина для магнитной проницаемости μ_r , (7) при изменении коэффициента формы φ представляет серию поверхностей, по форме близких к эквидистантным и располагающихся тем выше, чем больше значение φ . Здесь также направление межосевого смещения обмоток (продольное или поперечное) не влияет на значение относительной магнитной проницаемости μ_r .

Приведенные на рис. 5 трехмерные зависимости позволяют наглядно представить взаимосвязи между основными магнитными характеристиками в виде коэффициента связи k_M и относительной магнитной проницаемости в функции коэффициента формы $\varphi = B/A$ при межосевых относительных смещениях катушек трансформатора $\sigma_\alpha = S_A/A$ или $\sigma_\beta = S_B/B$.

Отметим, что для рабочего диапазона смещений между обмотками, когда взаимное перекрытие обмоток превышает половину соответствующего линейного размера A или B ($\sigma < 0,5$), межосевые смещения σ_α и σ_β в относительном виде влияют на значения k_M и μ_r практически одинаково. По этой причине принято $\sigma_\alpha = \sigma_\beta = \sigma$.

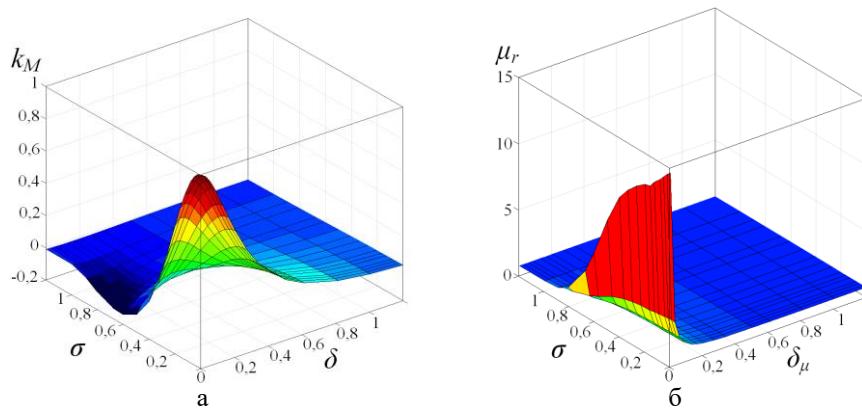


Рис. 5. Зависимости коэффициента магнитной связи k_M и относительной магнитной проницаемости обмотки μ_r от смещения σ и зазора δ для плоского трансформатора

Цель расчета, как и ранее, формулируется в следующем виде: при заданных ограничениях на условия применения и принятых исходных данных определить конструкцию трансформатора, обеспечивающую передачу заданной активной мощности.

В качестве исходных данных принимаются: номинальный ток заряда I_{AB} и конечное напряжение U_{AB} полностью заряженной аккумуляторной батареи, т.е. значение номинальной передаваемой мощности. В результате расчета определяются ширина A и длина B катушки, а также сечение провода и числа витков первичной и вторичной катушек. При этом принимается, что обводы катушки со скругленными углами вписываются в контур прямоугольного ферритового экрана. При ограничении поперечного размера A может потребоваться увеличение числа каналов передачи электроэнергии, т. е. реализация ВЧТ на нескольких отдельных трансформаторах с соответствующим включением обмоток.

Поперечный размер A трансформатора ограничивается отношением к диаметру аппарата. В [11] объясняются причины, связанные с указанным ограничением, при этом предлагается считать, что размер A сердечника трансформатора не должен превышать 15 % от диаметра аппарата в месте установки его приемной части.

Последовательность расчета можно представить в виде блок-схемы, показанной на рисунке 6, в которой общий подход методики аналогичен алгоритму расчета для трансформаторов с чашечными сердечниками, но отличается в деталях.

Предварительно, с использованием полиномов (6), (7) должны быть определены значения коэффициента связи k_M и относительной магнитной проницаемости μ_r обмотки, а также выбрано значение ширины A сердечника с учетом рекомендаций по соотношению размеров сердечника и диаметра АНПА. Далее, в соответствии с приведенной последовательностью расчета определяются число витков W_2 , сечение S_2 , выбирается ширина b_2 и высота h_2 провода вторичной обмотки (блок 4). Для обмоток ВЧТ должен применяться провод литцендрат, при этом наиболее удобно использование проводов прямоугольного сечения с соотношением высоты к ширине от 1 до 3 [18]. Поэтому, если полученное отношение высоты сечения провода к его ширине не превышает трёх (блок 5), то выполняется расчет числа витков W_1 и сечения S_1 , и выбирается ширина b_1 и высота h_1 провода первичной обмотки (блок 6). Если провод первичной обмотки имеет коэффициент соотношения сторон меньше трёх (проверка условия в блоке 7), то расчет завершается.

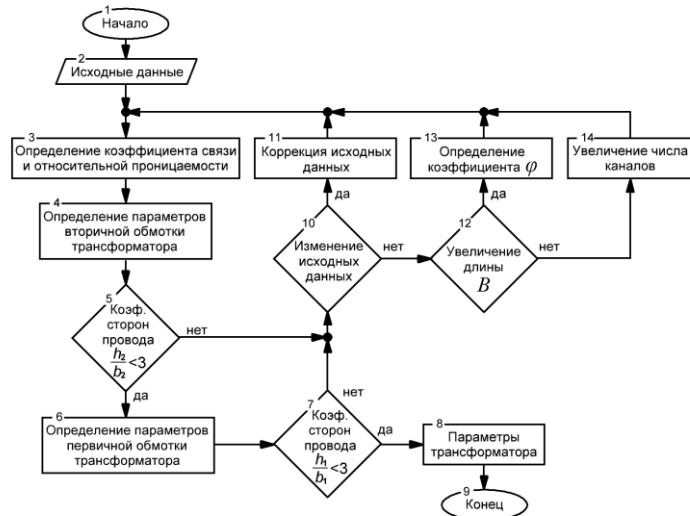


Рис. 6. Блок-схема алгоритма расчёта трансформатора

Приведенная последовательность вычислений имеет место при выполнении условий в соответствующих блоках и является самой короткой, приводящей к конечному решению. Другая, расширенная последовательность вычислений получается, если, например, не выполняется требование по соотношению сторон провода (блок 5). В этом случае вычисления от блока 5 через блок 10 переходят к коррекции исходных данных (блок 11), что сводится к изменению составляющих набора заданных параметров, но приводящих к решению поставленной задачи. Это может быть, например, выбор другого типа провода или увеличение ширины трансформатора A . Если этот вариант неприемлем, то расчет следует к блоку 12, в котором определяется возможность увеличения длины трансформатора B . Далее, если проявляются ограничения по длине трансформатора B , то расчет переходит к блоку 14 и увеличивается общее число каналов передачи энергии, т. е. увеличение числа трансформаторов.

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 трансформаторы системы, может потребовать двух-трех итераций.

Справедливость методики подтверждают графики на рис. 7, где показана внешняя характеристики трансформатора, полученная расчетным путем по известным выражениям [19] (график 1) и результаты натурного эксперимента для трансформатора, изготовленного по результатам расчета предложенной методики (маркеры 2).

Конструкция трансформатора с плоскими магнитными экранами позволяет выполнять ее модификацию с целью максимального повышения эффективности процесса передачи электроэнергии. Так, например, здесь несложно получить трансформатор с изогнутым профилем, практически совпадающим с обводами поперечного сечения АНПА [20]. При этом достигается минимально возможный немагнитный зазор между обмотками, что способствует повышению коэффициента магнитной связи (рис. 8). Кроме этого, полученная гладкая форма корпуса подводного аппарата имеет такое эксплуатационное преимущество как уменьшение лобового сопротивления и шумности при движении.

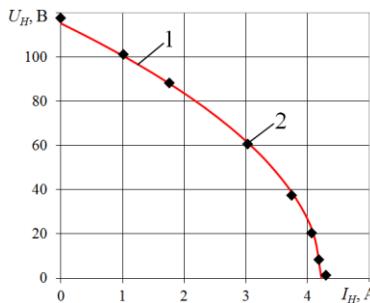


Рис. 7. Внешние характеристики системы бесконтактной передачи электроэнергии: 1 – аналитический расчет; 2 – натурный эксперимент

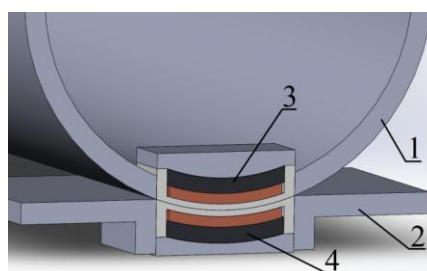


Рис. 8. Размещение трансформатора с изогнутым профилем:
1 – корпус АНПА; 2 – средство базирования; 3, 4 – приёмная и передающая
части трансформатора соответственно

В связи с отсутствием ферритовых экранов с заданной кривизной, как показано на рис. 8, изогнутый профиль можно выполнить с помощью набора ферритовых стержней, плоскости которых будут отклонены в соответствии с кривизной поверхности аппарата. Так как обмотка обладает достаточной гибкостью, то придать ей изогнутый профиль не представляет труда. Однако экран, составленный из наклонных ферритовых стержней, будет соприкасаться с обмоткой только в нескольких точках, а среднее расстояние между обмотками и их экранами будет расти с уменьшением диаметра аппарата.

Можно ожидать, что уменьшение диаметра аппарата приведёт к снижению коэффициента магнитной связи между обмотками трансформатора. Для проверки этого эффекта было выполнено математическое моделирование и экспериментальное измерение коэффициента магнитной связи трансформатора с общей шириной магнитного экрана 74 мм, составленного из двух стержней по 37 мм для различных диаметров АНПА (рис. 9).

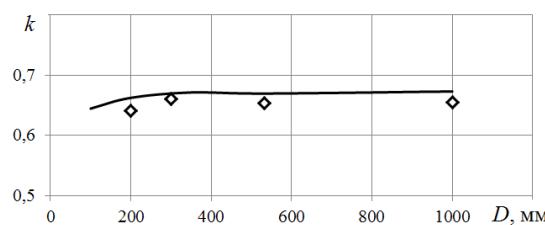


Рис. 9. Зависимость коэффициента магнитной связи от диаметра изгиба профиля трансформатора: маркеры – экспериментальное измерение;
сплошная линия – математическое моделирование

Из рис. 9 следует, что уменьшение диаметра изгиба профиля до 300 мм практически не сказывается на коэффициенте магнитной связи. Таким образом, результаты расчёта конструктивных параметров трансформатора с плоскими экранами сохраняют своё значение при изгибе его профиля до указанного значения.

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 частных методик для двух вариантов выполнения трансформаторов: на чашечных сердечниках и с плоскими магнитными экранами. Выбранные способы представления параметров в относительном виде для указанных исполнений трансформаторов позволяет исключительно просто масштабировать результаты решения с целью изменения передаваемой мощности для заряда аккумуляторных батарей с иными энергетическими характеристиками. Разработка методик расчета сопровождалась сбалансированным сочетанием математического моделирования и натурного эксперимента, обеспечивающих достоверное подтверждение адекватности принятых математических моделей и оптимальное использование материальных ресурсов при постановке эксперимента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. 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.
3. 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 27.02.2020).
4. 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/matecconf/20153108004>.
5. 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.
6. Пат. 2564199 Российской федерации, 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. № 2014123766/02; заявл. 10.06.2014; опубл. 27.09.2015, Бюл. № 27.
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 // International Journal of Control Theory and Applications. – 2016. – Vol. 9, Issue 13. – P. 305-311.
8. 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.
9. Илларионов Г.Ю., Щербатюк А.Ф., Кушнерик А.А. Донные причальные устройства для автономных необитаемых подводных аппаратов // Двойные технологии. – 2011. – № 1. – С. 13-21.
10. 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.
11. 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.

12. Герасимов В.А., Комлев А.В., Красковский М.В., Филоженко А.Ю. Методика расчета конструктивных параметров трансформатора бесконтактной системы заряда аккумуляторных батарей подводного аппарата // Подводные исследования и робототехника. – 2018. – № 1 (25). – С. 21-29.
13. ANSYS Maxwell - Low Frequency Electromagnetic Field Simulation // ANSYS. – Режим доступа: <http://www.ansys.com/Products/Electronics/ANSYS-Maxwell> (дата обращения: 12.02.2018).
14. Герасимов В.А., Комлев А.В., Красковский М.В., Филоженко А.Ю., Чемезов И.А. Определение конструктивных параметров трансформатора системы бесконтактной передачи электроэнергии // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 1 (195). – С. 208-219.
15. Герасимов В.А., Филоженко А.Ю., Илларионов Г.Ю., Пашкеев С.В. Подводное базирование автономных необитаемых подводных аппаратов на донных причальных устройствах // Стратегическая стабильность. – 2018. – № 1 (82). – С. 30-36.
16. Haibing W., Kehan, Zh., Yan Zh., Baowei S. Comparison of two electromagnetic couplers in an inductive power transfer system for Autonomous Underwater Vehicle docking application. – 2016. – Р. 1-5. – 10.1109/OCEANSAP.2016.7485443.
17. Герасимов В.А., Красковский М.В., Филоженко А.Ю. Методика расчёта трансформатора с плоскими экранами для бесконтактной системы заряда аккумуляторных батарей подводного аппарата // Подводные исследования и робототехника. – 2019. – № 2. – С. 13-22.
18. RUPALIT PROFILE – прямоугольные многожильные провода // DACPOL. – URL: <https://www.dacpol.eu/ru/rupalit-profile-prjamougolnye-mnogozhilnye-provoda/product/rupalit-profile> (дата обращения: 27.02.2020).
19. 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.
20. Пат. 2648231 Российской федерации. МПК H02J 50/12 (2016/01). Устройство для бесконтактной передачи электроэнергии на подводный аппарат / Герасимов В.А., Филоженко А.Ю., Красковский М.В. №2017114815, заявл. 26.04.2017, опубл. 23.03.2018, Бюл. №9.

REFERENCES

1. Gerasimov V.A. Filozhenko A.Yu. Chepurin P.I. Struktura sistemy elektrosnabzheniya avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata [Structure of the system noncontact energy issue of the autonomous underwater device], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 3 (140), pp. 47-55.
2. 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.
3. 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 27 February 2020).
4. 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/matecconf/20153108004>.
5. Saishenagha D., Devika M. Wireless charging system using high power, high frequency magnetic interface for underwater electric vehicles, *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016, Vol. 11, pp. 6977-6981.
6. Gerasimov V.A., Kuvshinov G.E., Popov O.S., Filozhenko A.Yu., Chepurin P.I. Ustroystvo dlya beskontaktnoy peredachi elektroenergii na podvodnyy ob'ekt [Device for contactless transmission of electric power to underwater object]. Patent 2564199 Russian Federation, MPK H02J 7/00 (2006/01). No. 2014123766/02; date of filing. 10.06.2014; date of publication. 27.09.2015, Bull. № 27, 13 p.
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, *International Journal of Control Theory and Applications*, 2016, Vol. 9, Issue 13, pp. 305-311.

8. 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.
9. Illarionov G.Yu., Shcherbatyuk A.F., Kushnerik A.A. Donnye prichal'nye ustroystva dlya avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov [Docking station for autonomous underwater vehicles], *Dvoynye tekhnologii* [Dual technology], 2011, No. 1, pp. 13-21.
10. 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.
11. Gerasimov V.A., Kraskovskiy M.V., Filozhenko A.Yu., Chepurin P.I. Obespechenie peredachi zadannoy moshchnosti v sisteme beskontaktnogo zaryada akkumulyatornykh batarey podvodnogo apparata [Provision of transmission of a given power in the system of contactless charge of underwater vehicle batteries], *Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika»* [Bulletin of South Ural State University. Series “Power Engineering”], 2017, Vol. 17, No. 4, pp. 48-58.
12. Gerasimov V.A., Komlev A.V., Kraskovskiy M.V., Filozhenko A.Yu. Metodika rascheta konstruktivnykh parametrov transformatora beskontaktnoy sistemy zaryada akkumulyatornykh batarey podvodnogo apparata [Transformer design parameters calculation method of the non-contact charging system batteries underwater vehicle], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Investigation and Robotics], 2018, No. 1 (25), pp. 21-29.
13. ANSYS Maxwell - Low Frequency Electromagnetic Field Simulation, *ANSYS*. Available at: <http://www.ansys.com/Products/Electronics/ANSYS-Maxwell> accessed 12 February 2018).
14. Gerasimov V.A., Komlev A.V., Kraskovskiy M.V., Filozhenko A.Yu., Chemezov I.A. Opredelenie konstruktivnykh parametrov transformatora sistemy beskontaktnoy peredachi elektroenergii [Determination of structural parameters of the transformer of the system non-contact power transmission], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2018, No. 1 (195), pp. 208-219.
15. Gerasimov V.A., Filozhenko A.Yu., Illarionov G.Yu., Pashkeev S.V. Podvodnoe bazirovaniye avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov na donnykh prichal'nykh ustroystvakh [The basing of an autonomous underwater vehicle on the docking station], *Strategicheskaya stabil'nost'* [Strategic stability], 2018, No. 1 (82), pp. 30-36.
16. Haibing W., Kehan, Zh., Yan Zh., Baowei S. Comparison of two electromagnetic couplers in an inductive power transfer system for Autonomous Underwater Vehicle docking application, 2016, pp. 1-5. 10.1109/OCEANSAP.2016.7485443.
17. Gerasimov V.A., Kraskovskiy M.V., Filozhenko A.Yu. Metodika rascheta transformatora s ploskimi ekranami dlya beskontaktnoy sistemy zaryada akkumulyatornykh batarey podvodnogo apparata [The transformer calculating method with flat screens for the underwater vehicle non-contact battery charge system], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Investigation and Robotics], 2019, No. 2, pp. 13-22.
18. RUPALIT PROFILE – pryamougol'nye mnogozhil'nye provoda [RUPALIT PROFILE - rectangular litz wire], *DACPOL*. Available at: <https://www.dacpol.eu/ru/rupalit-profile-prjamougolnye-mnogozhilnye-provoda/product/rupalit-profile> (accessed 27 February 2020).
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., Kraskovskiy M.V. Ustroystvo dlya beskontaktnoy peredachi elektroenergii na podvodnyy apparat [Device for contactless transmission of electric power to underwater vehicle]. Patent 2648231 Russian Federation. MPK H02J 50/12 (2016/01). No. 2017114815; date of filing. 26.04.2017; date of publication. 23.03.2018, Bull. No. 9, 15 p.

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

Герасимов Владимир Александрович – Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской Академии наук; e-mail: gerasimov@marine.febras.ru; 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а; тел.: +79025223824; к.т.н.; профессор; зав. лабораторией 07.

Комлев Антон Владимирович – e-mail: kom86@bk.ru; тел.: +79502884801; к.т.н.; с.н.с. лаборатории 07.

Филоженко Алексей Юрьевич – e-mail: filozhenko_a@mail.ru; тел.: +79140678041; к.т.н.; с.н.с. лаборатории 07.

Gerasimov Vladimir Aleksandrovich – The Institute of the problems sea technology, Far eastern branch to Russian Academy of the sciences; e-mail: gerasimov@marine.febras.ru; 5a, Suhanova, Vladivostok, 690091, Russia; phone: +79025223824; cand. of eng. sc.; professor; head of the laboratory 07.

Komlev Anton Vladimirovich – e-mail: kom86@bk.ru; phone: +79502884801; cand. of eng. sc.; senior researcher of the laboratory 07.

Filozhenko Aleksey Jurievich – e-mail: filozhenko_a@mail.ru; phone: +79140678041; cand. of eng. sc.; senior researcher of the laboratory 07.

УДК 629.12

DOI 10.18522/2311-3103-2020-1-170-187

Н.К. Киселев, Л.А. Мартынова, И.В. Пашкевич

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ В СОСТАВЕ СТЕНДА ОТЛАДКИ И СОПРОВОЖДЕНИЯ АНПА*

Целью исследований является разработка комплекса математических моделей, обеспечивающих исходными данными математическую модель работы гибридной системы энергообеспечения для последующего встраивания в стенд отладки и сопровождения. Работа является развитием опубликованной ранее математической модели функционирования гибридной системы энергообеспечения автономного необитаемого подводного аппарата. В работе по результатам анализа целей и задач моделирования разработаны математические модели источников электроэнергии – аккумуляторной батареи и электрохимического генератора. Поскольку управления параметрами работы аккумуляторной батареи и электрохимического генератора зависит от параметров движения аппарата, то дополнительно были разработаны математические модели маршевого движителя и интегрированной системы управления аппарата. Внешние условия функционирования аппарата и маршрутное задание задавались в специально разработанном имитаторе тактической обстановки. На основе теории интегрированного иерархического моделирования с изменяемым разрешением была определена наиболее целесообразная степень детализации разрабатываемых математических моделей. Ввиду необходимости учета неравномерности обдува газами топливных элементов в электрохимическом генераторе математическая модель основана на решении нелинейной системы уравнений, включающей в себя уравнение Навье-Стокса, уравнения сохранения импульса, энергии и заряда. При разработке математической модели аккумуляторной батареи была учтена неравномерность заряда отдельных аккумуляторов; математическая модель учитывала параметры отдельных аккумуляторов по данным их изготовителя. Результатами моделирования явились зарядно-разрядные характеристики аккумуляторной батареи. В математической модели основного потребителя электроэнергии – маршевого движителя – реализована зависимость создаваемой тяги от требуемой скорости движения аппарата, что позволило получать объем электроэнергии, потребляемой маршевым движителем. В математической модели интегрированной системы управления в зависимости от текущего положения аппарата реализованы регуляторы движения для формирования управления элементами движительной системы, обеспечивающие типовые режимы маневрирования аппарата. Кроме того, реализовано управление параметрами функционирования гибридной системой энергообеспечения – переключение источников электроэнергии, переключение процессов заряда аккумуляторной батареи. В математической модели имитатора тактической обстановки реализованы возможности задания маршрута и внешних

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты № 19-08-00253, № 20-08-00130.