

МЕТОДИКА РАСЧЁТА ТРАНСФОРМАТОРА С ПЛОСКИМИ ЭКРАНАМИ ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОЙ СИСТЕМЫ ЗАРЯДА АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ПОДВОДНОГО АППАРАТА

**В.А. Герасимов, М.В. Красковский,
А.Ю. Филоженко**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем морских технологий ДВО РАН¹

Эффективность работы системы заряда аккумуляторных батарей автономного необитаемого подводного аппарата с использованием бесконтактного способа передачи в значительной степени зависит от конструктивных особенностей силового высокочастотного трансформатора. В работе представлена методика расчета конструктивных параметров трансформатора, удовлетворяющего заданным условиям эксплуатации. Для полной идентификации свойств системы используются параметры, определяющие эффективность передачи энергии: коэффициент магнитной связи и относительная магнитная проницаемость обмотки. Предложена система относительных единиц, в которой данные параметры имеют постоянное значение для плоских сердечников, связанных определенными геометрическими соотношениями. Это позволяет легко выполнять масштабирование результатов полученных технических решений при изменении требований по передаваемой электрической мощности. Достоверность разработанной методики расчета подтверждается результатами натурного эксперимента.

ВВЕДЕНИЕ

Применение бесконтактной передачи электроэнергии на автономный необитаемый аппарат (АНПА) для заряда его аккумуляторных батарей (АБ) в ряде случаев имеет очевидные преимущества перед другими способами при выполнении этой операции под водой [1]. Преимущества выражаются в основном в отсутствии корродируемых электрических контактов и предъявлении менее жестких требований к точности причаливания аппарата к базе, что является актуальным при выполнении этой операции в автоматическом режиме.

Необходимость заряда АБ под водой возникает при подводном базировании АНПА, которое может осуществляться с использованием некоторой базы в виде донного причального устройства (ДПУ) или специального подводного устройства в виде «гаража». Донное причальное устройство устанавливается на грунте и, как правило, связано с береговым центром управления специальным подводным кабелем, по которому выполняются передача электроэнергии на ДПУ и информационный обмен центра управления с ДПУ и АНПА. Второй вид подводного базирования предполагает наличие судна-носителя, с борта

которого «гараж» опускается на заданную глубину на кабель-тросе, посредством которого также производятся энергоснабжение и информационный обмен [2, 3].

В общем случае в состав системы бесконтактной передачи энергии (БПЭ) входят такие основные элементы, как автономный инвертор напряжения (АИН) и силовой высокочастотный трансформатор (ВЧТ) с разделенными первичной и вторичной обмотками. Питание АИН осуществляется электроэнергией, которая каким-либо образом, указанным выше, передается на базу, а выход АИН соединен с первичной обмоткой ВЧТ. Нагрузкой вторичной обмотки ВЧТ является автоматическое зарядное устройство (АЗУ) и подсоединенная к его выходу АБ. Первичная и вторичная обмотки размещены в прочных герметичных оболочках, представляющих отдельные части ВЧТ, при этом его первичная часть устанавливается на базе, а вторичная часть – на АНПА. Каждая из оболочек имеет выполненную из немагнитного изоляционного материала контактную стенку, толщина которой достигает нескольких миллиметров.

¹ 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а. Тел.: +7 (4232) 432578.
E-mail: gerasimov@marine.febras.ru

При необходимости заряда АБ подводный аппарат должен осуществить причаливание к базе, при этом контактные стенки первичной и вторичной частей ВчТ совмещаются, и за счет возникшей магнитной связи между обмотками осуществляется передача электроэнергии. Для обеспечения заданной эффективности этого процесса межосевое смещение обмоток, а также зазор между обмотками не должны превышать допустимых значений, которые обуславливаются требуемыми параметрами заряда АБ [4].

Общая эффективность системы БПЭ в значительной мере определяется характеристиками ВчТ, под которыми здесь следует понимать совокупность электрических параметров трансформатора, обусловленных его конструктивным обликом. Влияние конструктивного облика на эффективность объясняется спецификой использования системы БПЭ при установке вторичной части трансформатора на АНПА. Во-первых, здесь действуют ограничения на габариты ВчТ. Во-вторых, желательно, чтобы контактные поверхности трансформатора совпадали с обводами 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.

Необходимость исполнения трансформатора для бесконтактной передачи в виде двух разделяющихся первичной и вторичной частей с немагнитными контактными стенками приводит к возникновению немагнитного зазора на пути магнитного потока. За счет этого зазора между обмотками, равного, как минимум, суммарной толщине контактных стенок первичной и вторичной частей, трансформатор имеет пониженное значение коэффициента магнитной связи k_M , который главным образом и определяет эффективность передачи энергии. Влияют на коэффициент связи k_M в сторону его уменьшения также межосевое смещение между обмотками и дополнительный зазор, вероятность появления которых нельзя исключить при автоматическом причаливании аппарата к базе.

При разработке системы БПЭ актуальным является определение на стадии проектирования конструктивных параметров ВчТ, под которыми здесь следует понимать форму и размеры магнитопровода, число витков и сечение провода обмоток, а также число трансформаторов, участвующих в передаче энергии и включенных параллельно или последо-

вательно. Необходимость дробления передаваемой мощности объясняется ограничениями по габаритам и, в ряде случаев, предпочтительно использовать несколько малых трансформаторов вместо одного большого. Выбранная реализация трансформатора в итоге должна соответствовать главной функции системы БПЭ – передаче определенной электрической мощности, обеспечивающей заряд конкретных аккумуляторных батарей АНПА за требуемое время с учетом заданных допустимых ошибок стыковки в виде межосевого смещения и зазора между обмотками трансформатора [5].

Указанные особенности применения и нетиповой набор исходных данных не позволяют использовать для трансформатора известные в электротехнике методики расчета, и определение нового решения этой задачи является проблемой актуальной.

В работе [6] предложен подход к созданию подобной методики. В ее основу положено использование коэффициента магнитной связи k_M между обмотками ВчТ с чашечным сердечником.

Как известно, коэффициент k_M определяется взаимной индуктивностью M между обмотками ВчТ, а также собственными индуктивностями L_1 и L_2 его первичной и вторичной обмоток и является в значительной мере интегральным показателем, определяющим эффективность процесса передачи электроэнергии в системе. 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 [7, 8]. Кроме этого, в предложенном подходе в качестве параметра, способствующего полной идентификации характеристик ВчТ, принята также удельная индуктивность Λ витка его обмотки. Практика показала, что именно коэффициент k_M и удельную индуктивность Λ наиболее удобно использовать для сравнительной оценки эффективности различных исполнений ВчТ, поскольку эти параметры являются максимально обобщенными и легко измеряются в натурном эксперименте.

Эти причины определили предпочтительность использования в основе предлагаемой методики функциональных зависимостей коэффициента k_M магнитной связи и удельной индуктивности Λ в функции от ошибок причаливания. Кроме указанной зависимости от межосевого смещения и зазора между обмотками параметры k_M и Λ трансформатора зависят также и от типа магнитопровода. 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 бесконтактной передачи энергии.

Приведенный обширный набор исходных данных требует применения в методике расчета относительной формы представления параметров. Подобная форма впервые предложена в [6], при этом начальный подход к этой задаче ограничивался рассмотрением магнитопроводов чашечного типа. Такие магнитопроводы широко применяются в силовой преобразовательной технике и, в частности, позволяют создавать достаточно компактные трансформаторы для бесконтактной системы передачи электроэнергии с хорошими энергетическими характеристиками. Кроме этого, в исследованиях было замечено, что для ограниченного ряда типоразмеров сердечников чашечного типа, практически применимых в системе бесконтактной передачи электроэнергии мощностью от сотен ватт до нескольких киловатт и имеющих наружный диаметр в диапазоне 50–150 мм, геометрические размеры являются подобными. То есть высота сердечника, высота и ширина окна, а также диаметр центрального ядра пропорциональны наружному диаметру. При этом оказалось, что такая закономерность вызывает, как следствие, подобие электромагнитных характеристик, что было успешно использовано в предложенной методике расчета.

Таким образом, анализ промышленной номенклатуры сердечников чашечного типа и предварительные расчеты показали, что для них в качестве базового параметра в системе относительных единиц может быть принято значение наружного диаметра сердечника D_{MAX} . В отношении к этому диаметру в предложенной методике представляются удельная индуктивность витка обмотки A , относительный зазор δ и относительное смещение σ . При этом:

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

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

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

где h – зазор между обмотками и s – межосевое смещение обмоток трансформатора в абсолютных единицах.

Коэффициент магнитной связи определяется известным выражением и зависит от взаимной индуктивности M обмоток, а также от собственных индуктивностей L_1, L_2 первичной и вторичной обмоток соответственно:

$$k_M = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}. \quad (3)$$

Общий подход методики расчета конструктивных параметров заключается в следующем. Для принятого типа сердечников трансформатора, в данном случае чашечных, должны быть рассчитаны двумерные массивы значений коэффициентов k_M и A в функции относительного зазора δ и относительного смещения σ , которые аппроксимируются полиномами:

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

$$A = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m b_{ij} \cdot \delta^i \cdot \sigma^j, \quad (5)$$

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

Последовательность дальнейших действий зависит от постановки задачи. К первому варианту относится задача, при которой заданы 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 D_{MAX} и количество сердечников, входящих в состав ВчТ, а также сечение провода обмоток и число витков.

Для второго варианта расчета считается 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, например, по условиям размещения вторичной части ВчТ на АНПА или первичной части ВчТ – на ДПУ. В результате этого расчета определяется значение максимальной передаваемой мощности.

Справедливость предложенного алгоритма и расчетных формул полностью подтверждается результатами натурального эксперимента, в котором испытывались трансформаторы, модели которых с единичным масштабом использовались в расчетах зависимостей (4) и (5).

Правомерность выбора значения D_{MAX} чашечного сердечника в качестве базы для относительных единиц подтверждается результатами

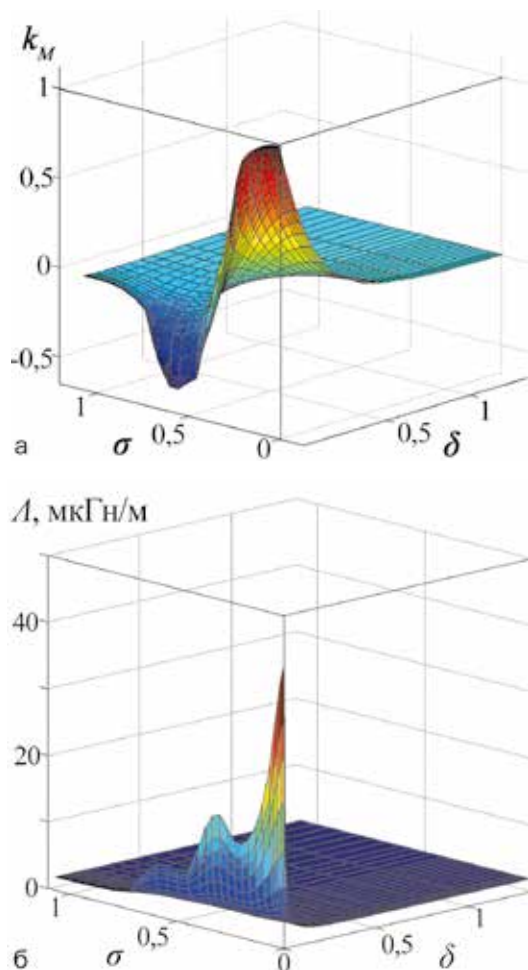


Рис. 1. Обобщенные зависимости коэффициента связи k_M и удельной индуктивности витка L в функции относительного зазора δ и смещения σ

компьютерного эксперимента, представленными в виде трехмерных поверхностей на рис. 1. Эти поверхности показывают зависимости массивов коэффициента связи k_M (4) и значений удельной индуктивности L (5) в функции относительного зазора δ между сердечниками и от относительного межосевого смещения σ . Полученные поверхности полностью совпадают для двух типов сердечников, выбранных для примера: сердечники фирмы Epcos типа PCN 150×30 с наружным диаметром D_{MAX} 150 мм и высотой 30 мм и типа PS $68 \times 14,5$ с наружным диаметром D_{MAX} 68 мм и высотой 14,5 мм.

Отметим, что использование предложенной методики [6] в данном случае ограничено применением только для сердечников чашечного типа. Трансформаторы на таких сердечниках имеют достаточно высокое значение коэффициента магнитной связи при малых относительных зазорах между обмотками, что позволяет в ряде случаев создавать компактные трансформаторы для системы бесконтактной пере-

дачи электроэнергии. Вместе с тем у чашечных сердечников есть недостатки, к которым можно отнести следующие:

- сравнительно малые размеры окна магнитопровода;
- ограниченный ряд типоразмеров в требуемом диапазоне передаваемых мощностей (2–3 наименования);
- заметное снижение коэффициента магнитной связи при межосевом смещении обмоток трансформатора, обусловленное большим относительным перекрытием пути для магнитного потока трансформатора.

Первый и второй недостатки приводят к необходимости увеличивать число параллельных каналов путем применения нескольких трансформаторов для передачи требуемой мощности при заданных ограничениях на габариты системы.

Проявление третьего недостатка критично при автоматическом причаливании АНПА к ДПУ, когда возможны ошибки в совмещении контактных поверхностей первичной и вторичной частей трансформатора и, как следствие, снижение эффективности системы передачи.

Решение этих проблем можно найти при использовании в качестве магнитопровода ферритовых плоских экранов. В этом случае первичная и вторичная части трансформатора содержат плоские обмотку и экран, которые помещаются в герметичную оболочку соответствующих размеров. Ферритовый экран может быть выполнен как в виде одной пластины, так и набран из отдельных пластин, при этом результирующие размеры и форма экрана и обмотки определяются заданным значением передаваемой мощности и условиями компоновки частей трансформатора на АНПА. Общий вид обмоток и экранов такого трансформатора показан на рис. 2.

Предлагаемый промышленностью набор типоразмеров ферритовых пластин позволяет составлять плоские экраны нужных размеров практически без ограничений. В этом случае предоставляется

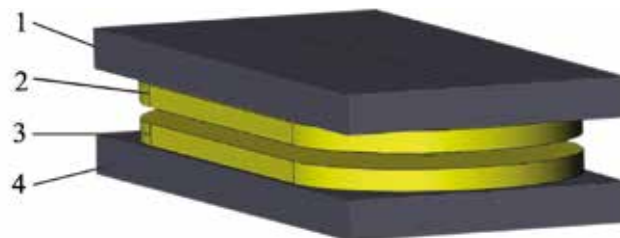


Рис. 2. Трансформатор с плоскими экранами: 1, 2 – соответственно магнитный экран и обмотка первичной части трансформатора; 3, 4 – соответственно обмотка и магнитный экран вторичной части трансформатора

возможность передавать заданную мощность одним трансформатором и отпадает необходимость дробления передаваемой мощности путем использования нескольких трансформаторов, как в случае использования чашечных сердечников. Для трансформаторов с плоскими экранами в меньшей степени также уменьшается коэффициент магнитной связи при межосевом смещении обмоток. Следует учитывать еще одно полезное свойство конструкции с плоскими экранами – это возможность получать трансформатор с контактной поверхностью, совпадающей с обводами корпуса АНПА. При этом плоскости обмотки и магнитного экрана также выполняются с изгибом по требуемому радиусу. Для экрана получение соответствующей формы достигается применением отдельных пластин, с помощью которых формируется ломаная поверхность, аппроксимирующая требуемый изгиб.

Использование изогнутой формы корпуса трансформатора особенно актуально для аппаратов круглого поперечного сечения малого диаметра, так как при этом увеличивается коэффициент магнитной связи за счет минимизации расстояния между первичной и вторичной обмотками. Отсутствие выступающих элементов или углублений облегчает задачу совмещения контактных поверхностей первичной и вторичной частей трансформатора при автоматическом причаливании АНПА к ДПУ, кроме этого уменьшается также шумность аппарата при движении под водой.

Учитывая изложенное, следует признать применение в системах бесконтактной передачи электроэнергии трансформаторов с плоскими экранами перспективным и развитие полученной методики расчета для чашечных сердечников на такую конструкцию – задачей актуальной.

■ Метод определения обобщенных характеристик трансформатора с плоскими магнитными экранами

В основу методики расчета трансформаторов с плоскими экранами целесообразно положить подход, успешно апробированный в методике для чашечных сердечников. Однако здесь возникает вопрос: какой параметр использовать в качестве базового для перехода к относительным единицам? Если для чашечных сердечников выбор базовой величины был однозначным в виде наружного диаметра D_{MAX} в связи с геометрическим подобием формы сердечников различных размеров, то для плоских сердечников такое подобие

отсутствует, поскольку возможны как изменения их размеров, так и различные соотношения между их длиной и шириной.

Логическим шагом было выбрать в качестве базового параметра ширину A экрана и ввести коэффициент, учитывающий отличие формы магнитного экрана от квадрата, т.е. коэффициент формы φ , равный отношению длины B экрана к ширине A . При этом число φ , очевидно, 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 оптимизация коэффициента магнитной связи при передаче заданной мощности др.).

Согласно упомянутой методике требуется рассчитать массивы значений коэффициента магнитной связи k_M и удельной индуктивности Λ или, что более удобно, относительной магнитной проницаемости обмотки $\mu_r = L/(w^2\varphi A \mu_0)$, где L – индуктивность обмотки с плоским экраном шириной A , w – число витков обмотки, $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ Гн/м}$.

Массивы значений k_M должны определяться в функции как от относительного зазора δ и относительного смещения σ , так и от коэффициента формы φ , т.е. $k_M = f(\delta, \sigma, \varphi)$. Массивы значений магнитной проницаемости μ_r для трансформаторов с такими сердечниками определяются более сложной зависимостью: $\mu_r = f(\delta_r, \delta_u, \sigma, \varphi, \tau)$.

Геометрические соотношения элементов трансформатора показаны на рис. 3, где h – суммарный немагнитный зазор, t – высота передачи заданной мощности другой обмотке с учетом 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.

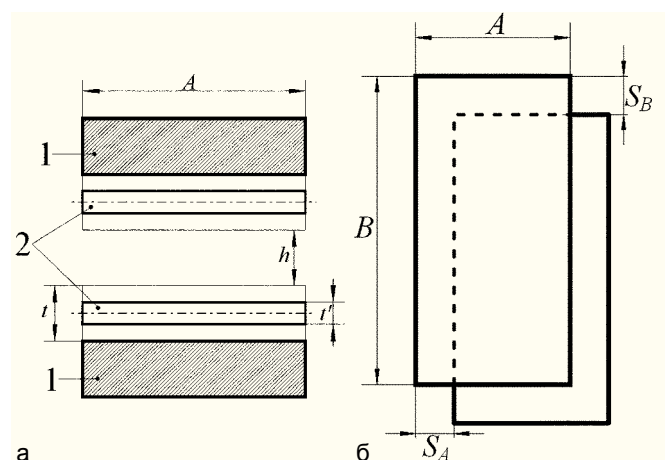


Рис. 3. Основные размерные соотношения для трансформатора с плоскими ферритовыми экранами: а – поперечное сечение; 1 – экраны, 2 – обмотки; б – вид сверху

С учетом показанных на рис. 3 размерных соотношений приняты следующие обозначения:

- относительный зазор между обмотками:
 $\delta = (h+t)/A$;

- относительное смещение по короткой стороне A : $\sigma_\alpha = S_A/A$;

- относительное смещение по длинной стороне B : $\sigma_\beta = S_B/B$;

- расстояние между средней плоскостью обмотки и магнитным экраном: $\delta_\tau = t/2A$;

- относительный зазор между магнитными экранами: $\delta_\mu = (h+2t)/A$;

- коэффициент формы магнитного экрана: $\varphi = B/A$;

- относительная высота обмотки: $\tau = t'/A$.

Для выражения таких относительных величин, как высота обмотки или соответствующие зазоры, используется положение средней плоскости, проходящей через середину толщины обмотки.

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:

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

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

Геометрическое представление полинома (6) в виде трехмерных поверхностей является более сложным по сравнению с рис. 1 для чашечных сердечников и представляет набор таких поверхностей $k_M = f(\delta, \sigma)$ каждая из которых соответствует определенному значению коэффициента формы φ .

Полином (7) можно представить геометрически уже в виде суммы наборов трехмерных поверхностей, расположенных в фазовом пространстве пятого порядка, координатами которого являются δ_τ , 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, на рис. 4, 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. 4, 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 . Вместе с тем влияние коэффициента формы на вид указанных трехмерных зависимостей можно представить, используя двумерные графики. Так, на рис. 5 показаны результаты расчета коэффициента связи k_M и μ_r для прямоугольного экрана с $\varphi = 2$ в зависимости от относительного смещения σ при неизменном рабочем зазоре δ . Относительное смещение σ в общем случае может изменяться как в поперечном направлении плоскости трансформатора, т.е. вдоль стороны A , так и в продольном направлении вдоль стороны B . Анализ результатов расчета показал, что в данном случае удобно использовать значения относительного смещения, вычисленного в отношении к той стороне, относительно которой и рассматривается смещение.

Графики $k_M = f(\sigma)$ на рис. 5, а показывают, что изменение формы экрана от квадратной с $\varphi = 1$ до продольной с $\varphi = 2$ приводит к сравнительно незначительной деформации этих кривых. При этом коэффициент связи k_M не зависит от направления смещения – в поперечном или продольном направлении. Указанный результат приводит к выводу, 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 .

Графики относительной магнитной проницаемости $\mu_r = f(\sigma)$ на рис. 5, б свидетельствуют о том, что трехмерная картина (7) для магнитной проницаемости μ_r при изменении коэффициента формы φ будет представлять серию поверхностей, по форме близких к эквидистантным и располагающихся тем выше, чем больше значение φ . Здесь также направление смещения (продольное или поперечное) не влияет на значение магнитной проницаемости μ_r .

Приведенные на рис. 4 трехмерные зависимости (с учетом дополнительных пояснений на основании рис. 5) 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 $\sigma_\beta = SB/B$.

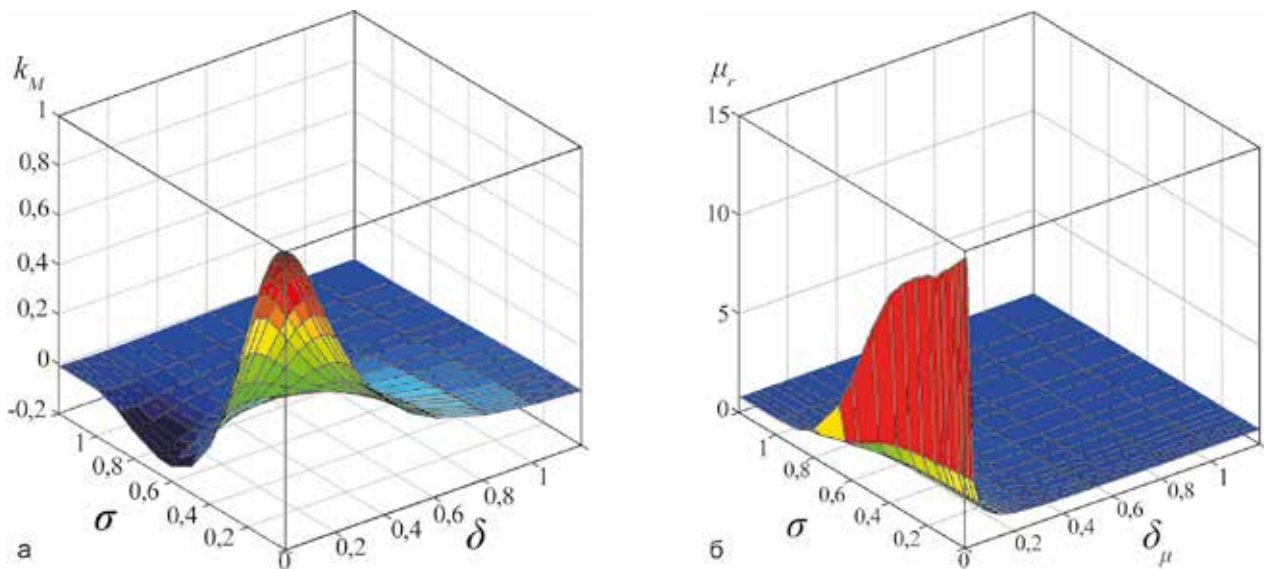


Рис. 4. Зависимости коэффициента магнитной связи k_M и относительной магнитной проницаемости обмотки μ_r (а) от относительных смещения и зазора (б) (пояснения в тексте)

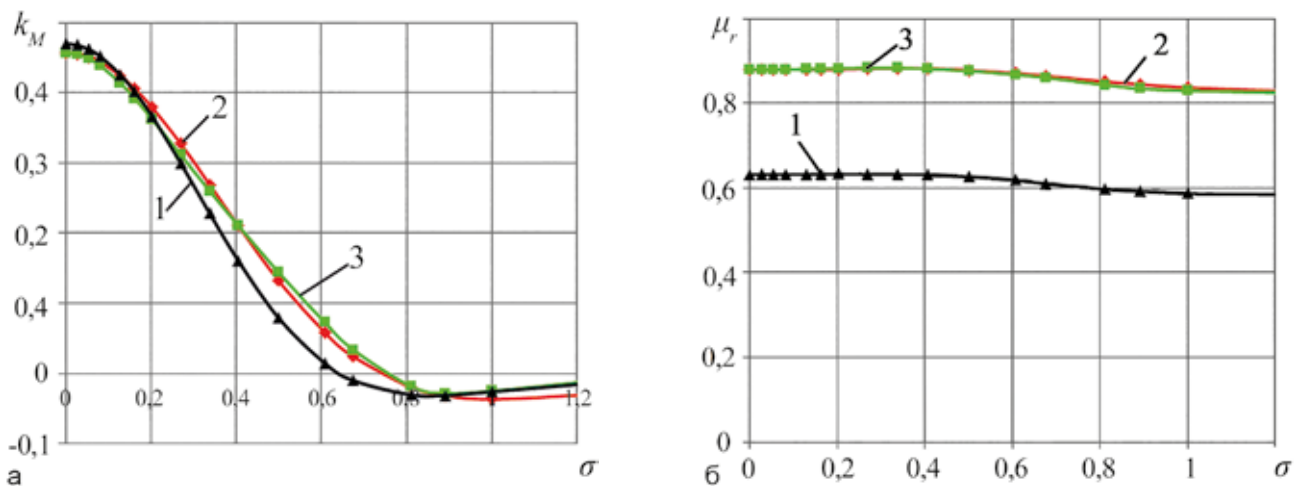


Рис. 5. Магнитные характеристики катушки в зависимости от относительного смещения σ :

а – зависимость коэффициента связи k_M от σ при рабочем зазоре; б – зависимость магнитной проницаемости катушки от σ при рабочем зазоре (графики 1 соответствуют коэффициенту формы $\varphi = 1$, графики 2 – $\varphi = 2$ при поперечном смещении, графики 3 – $\varphi = 2$ при продольном смещении)

Анализ приведенных результатов расчета подтверждает также, что выбор значения ширины A прямоугольной катушки в качестве базы является удобной формой представления параметров трансформатора в относительных единицах.

■ Методика расчета 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, как и в случае с трансформаторами на чашечных сердечниках, здесь

может возникнуть необходимость увеличивать число трансформаторов в составе системы передачи энергии. Заметим, что вероятность такого решения здесь ниже, поскольку для плоских сердечников получение необходимого размера и конфигурации магнитного экрана значительно шире за счет использования для этой цели отдельных ферритовых пластин.

В общем случае расчет трансформатора с плоскими магнитными экранами, так же как и трансформаторов с чашечными сердечниками для системы бесконтактной передачи электроэнергии, может быть выполнен в двух вариантах.

К первому варианту относится задача, при которой заданы ток номинальный заряда I_{AB} и конечное напряжение U_{AB} полностью заряженной аккумуля-

торной батарее, 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 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. Возможно также увеличение числа трансформаторов при ограниченном поперечном размере A .

Заметим, что для обмотки высокочастотного трансформатора должен применяться провод литцендрат, который предлагается в виде круглого сечения или прямоугольного. Для изготовления обмотки более удобным является провод прямоугольного сечения, обеспечивающий более полное заполнение окна трансформатора, поэтому в расчетах будет использоваться такой провод с высотой b и шириной h сечения [9].

Для второго варианта расчета считается заданным сердечник трансформатора, т.е. известны его ширина A и длина B . Такой вариант расчета выбирается, когда размеры сердечника ограничиваются какими-либо условиями его размещения в АНПА, при этом в результате расчета определяется возможное значение максимальной передаваемой мощности для этого сердечника. Трансформатор с $\varphi > 1$ должен располагаться на АНПА так, чтобы его продольная ось была бы направлена вдоль аппарата. При этом поперечный размер A трансформатора ограничивается отношением к диаметру аппарата. В [6] объясняются причины, связанные с указанным ограничением, и, следуя приведенным в этой статье рекомендациям, будем 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 рис. 6 и объединяющей указанные два варианта. Расчетные формулы, используемые в методике, были получены в [5].

В соответствии с приведенной последовательностью расчета и с использованием известных формул определяются число витков W_2 , сечение S_2 , выбирается ширина b_2 и высота h_2 провода вторичной обмотки (блок 4). Опыт изготовления ВчТ показывает, что наиболее удобно использование проводов с соотношением высоты к ширине от 1 до 3. 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 , выбирается ши-

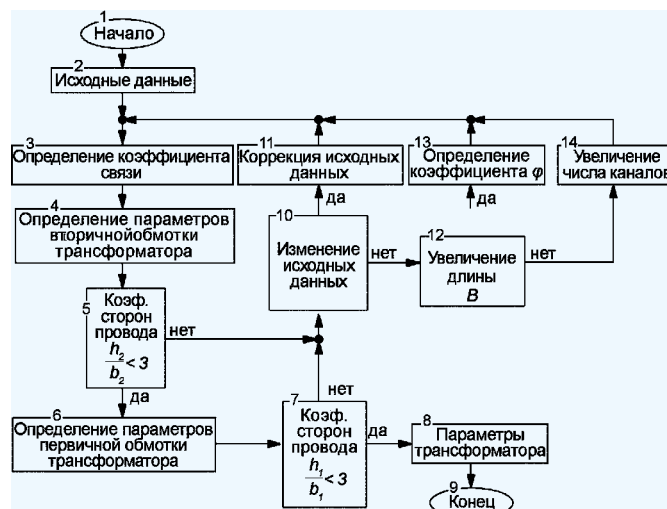


Рис. 6. Блок-схема алгоритма расчета трансформатора

рина b_1 и высота h_1 провода первичной обмотки (блок 6). Если и провод первичной обмотки имеет коэффициент соотношения сторон меньше трёх (проверка условия в блоке 7), то расчет завершается.

Приведенная последовательность вычислений имеет место при выполнении условий в соответствующих блоках и является самой короткой, приводящей к законченному 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), возможно, к уменьшению допустимых ошибок стыковки, увеличению 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, что достигается увеличением 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 более одной итерации. Основные расчетные формулы для приведенной методики имеют следующий вид [5].

1. Число витков вторичной обмотки:

$$W_2 = \sqrt{\frac{k_{DC} U_{AB}}{4\sqrt{3} I_{AB} f \varphi A \mu_0 \mu_r (1 - k_M^2)}}, \quad (8)$$

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;

• $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнитная постоянная;

• μ_r – относительная магнитная проницаемость обмотки;

• A – ширина обмотки, м;

• k_M – коэффициент магнитной связи.

2. Сечение провода вторичной обмотки:

$$S_2 = \frac{I_2}{J}, \text{ мм}^2, \quad (9)$$

где I_2 – ток вторичной обмотки, можно принять $I_2 = I_{AB}$; J – плотность тока во вторичной обмотке, А/мм².

3. Число витков первичной обмотки:

$$W_1 = \frac{k_M U_1 W_2}{\sqrt{3} k_{DC} U_{AB}}, \quad (10)$$

где U_1 – напряжение питания автономного инвертора.

4. Сечение провода первичной обмотки по меди:

$$S_1 = \frac{k_{DC} U_{AB}}{4 f W_1 W_2 k_M \varphi A \mu_0 \mu_r J (1 - k^2)}, \text{ мм}^2. \quad (11)$$

Предварительно, с использованием полиномов (6), (7), должны быть определены значения коэффициента связи k_M и относительной магнитной проницаемости обмотки, а также выбрано значение ширины A 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.

Примем, что для некоторых конкретных условий использования трансформатора в системе бесконтактной передачи энергии исходные данные должны быть следующие:

• номинальное напряжение аккумуляторной батареи, $U_{AB} = 60 \text{ В}$;

• ток заряда, $I_{AB} = 3 \text{ А}$;

• напряжение питания инвертора, $U_1 = 200 \text{ В}$;

• частота инвертора, $f = 20 \text{ кГц}$;

• коэффициент запаса по напряжению, $k_{DC} = 1,2$;

• плотность тока в проводе обмоток трансформатора, $J = 4 \text{ А/мм}^2$;

• суммарный немагнитный зазор между сердечниками $h = 11,3 \text{ мм}$;

• межосевое смещение обмоток, $s = 0 \text{ мм}$;

• ширина сердечника трансформатора, $A = 74 \text{ мм}$;

• длина сердечника трансформатора, $B = 170 \text{ мм}$.

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

• число витков вторичной обмотки $W_2 = 37,3$, принято 37;

• сечение провода по меди вторичной обмотки $S_2 = 1,06 \text{ мм}^2$,

• число витков первичной обмотки $W_1 = 34,2$, принято 37;

• сечение провода по меди первичной обмотки $S_1 = 2,12 \text{ мм}^2$.

По имеющейся номенклатуре многожильных проводов прямоугольного сечения [9] для первичной обмотки выбран провод сечением по меди $2,36 \text{ мм}^2$, шириной $1,6 \text{ мм}$ и высотой $2,5 \text{ мм}$. В целях технологичности изготовления ВЧТ для его вторичной обмотки целесообразно принять провод такого же типа.

Оценка справедливости предложенной методики может быть проведена по экспериментальной внешней характеристике трансформатора с конструктивными параметрами, полученными в результате расчета. Так, на рис. 7 показаны внешние характеристики для рассчитанного трансформатора в системе бесконтактной передачи энергии, при этом характеристика 1 получена в результате аналитического расчета по известному выражению [10]:

$$U_2 = U_{XX} \sqrt{1 - \frac{I_2}{I_{K3}}}, \quad (12)$$

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



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

$$U_{XX} = k_M \frac{W_2}{W_1} U_1, \quad (13)$$

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

$$I_{K3} = \frac{k_M \cdot U_1}{8 f W_1 W_2 \varphi A \mu_0 \mu_r (1 - k_M^2)}. \quad (14)$$

Результаты натурального эксперимента в виде маркеров 2 на рис. 7 показывают хорошее совпадение с аналитическим расчётом по предложенной методике, что подтверждает её справедливость.

Таким образом, в результате выполнения расчетов по предложенной методике определяются основные конструктивные параметры: размеры магнитного экрана, число витков и типоразмер провода первичной и вторичной обмоток. Эти параметры могут быть первым приближением, которое при необходимости легко корректируются 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 натурального эксперимента, обеспечивающих достоверное подтверждение адекватности принятых математических моделей и оптимальное использование материальных ресурсов при постановке эксперимента.

В общем случае развитие предложенной методики определения конструктивных параметров на другие исполнения ВЧТ будет заключаться в определении численных значений коэффициентов аппроксимирующих полиномов (6) и (7) и базового параметра, с помощью которого зазор и межосевое смещение можно представить в относительном виде. Методика и последовательность вычислительных процедур при этом остаются неизменными.

Представляет интерес развитие предложенной методики расчета на трансформаторы с плоскими магнитными экранами, выгнутыми по обводам поперечного сечения подводного аппарата [11], что может быть поставлено в качестве цели дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Илларионов Г.Ю., Щербатюк А.Ф., Кушнерик А.А., Квашнин А.Г. Донные причальные устройства для автономных необитаемых подводных аппаратов // Двойные технологии. 2011. № 1 (54). С. 13–21.
3. 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.
4. Герасимов В.А., Кувшинов Г.Е., Филоженко А.Ю., Чепурин П.И. Исследование режимов работы системы энергообеспечения автономного необитаемого подводного аппарата с бесконтактной передачей энергии // Подводные исследования и робототехника. 2013. № 2. С. 24–32.
5. 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-Уральского университета. Серия «Энергетика». 2017. Т. 17, № 4. С. 48–58.
6. 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.
7. 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. № 01–02. С. 108–118.
8. 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 // Int. Jour. of Control Theory and Applications. 2016. Vol. 9, Is. 30. P. 305–311.
9. RUPALIT PROFILE - прямоугольные многожильные провода. Dacpol. – URL: <https://www.dacpol.eu/ru/rupalit-profile-prjamougolnye-mnogozhilnye-provoda/product/rupalit-profile> (дата обращения: 29.03.2019).
10. Герасимов В.А., Копылов В.В., Кувшинов Г.Е. и др. Математическая модель устройства для бесконтактной передачи электроэнергии на подводный объект // Подводные исследования и робототехника. 2012. № 2 (14). С. 27–33.
11. Пат. 2648231 РФ, МПК H02J 50/00. Устройство для бесконтактной передачи электроэнергии на подводный аппарат / Герасимов В.А., Филоженко А.Ю., Красковский М.В.; ИПИТ ДВО РАН. – № 2017114815; заявл. 26.04.2017; опубл. 23.03.2018, Бюл. № 9.