

В.А. Герасимов, А.Ю. Филоженко

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗОНАНСА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ БЕСКОНТАКТНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПОДВОДНЫЙ АППАРАТ

Рассмотрен способ повышения эффективности системы бесконтактной передачи электроэнергии за счет организации резонансных режимов. Определены особенности системы, заключающиеся в использовании такого обязательного элемента, как специальный высокочастотный трансформатор с разделяющимися первичной и вторичной частями, выполненными в виде герметичных оболочек. Наличие конструктивных контактных стенок приводит к образованию немагнитного зазора в трансформаторе, что существенно влияет на свойства всей системы. Повышенное значение индуктивной составляющей тока намагничивания требует применения особых способов построения системы бесконтактной передачи энергии. Актуальность такой задачи определяется требованиями к условиям использования системы с компоновкой электронных блоков в контейнерах ограниченного объема, что создает проблемы как отвода тепла от силовых ключей автономного инвертора системы передачи, так и усложняет электромагнитную совместимость блоков электроники. Решение предложено найти за счет организации резонансных режимов. Систематизированы варианты резонансных четырехполюсников, применение которых на выходе автономного инвертора и на вторичной стороне трансформатора приводят к требуемым изменениям характеристик системы заряда аккумуляторных батарей подводного аппарата. Рассмотрено эффективное сочетание некоторых видов резонансных цепей как пример одновременного решения задачи токовой разгрузки транзисторных ключей инвертора при увеличении передаваемой активной мощности. Существенным преимуществом предложенных реализаций является практически независимое формирование требуемых эффектов токовой разгрузки на первичной стороне трансформатора и деформация в нужном направлении внешней характеристики системы бесконтактной передачи электроэнергии. Путем математического моделирования системы определены параметры резонансных элементов, обеспечивающие «мягкое переключение» силовых транзисторов автономного инвертора одновременно с выполнением условий резонанса напряжений на вторичной стороне трансформатора. Предложенные решения позволили увеличить передаваемую на подводный аппарат мощность при минимизации потерь в инверторе. Результаты исследований имеют практическое применение, защищены патентами Российской Федерации и позволяют повысить надежность и эффективность работы системы, которая заключается в полноценной зарядке аккумуляторных батарей аппарата за требуемый интервал времени. Приведенные теоретические выводы хорошо подтверждаются натурным экспериментом.

Подводный аппарат; бесконтактная передача электроэнергии; автономный инвертор напряжения; «мягкая коммутация»; последовательная резонансная цепь; параллельный резонанс.

V.A. Gerasimov, F.Yu. Filozhenko

THE RESONANCE USE TO INCREASE THE EFFICIENCY OF THE NON-CONTACT POWER TRANSMISSION SYSTEM ON THE UNDERWATER VEHICLE

A method for increasing the non-contact power transmission system efficiency due to the resonance modes organization is considered. The system peculiarities, consisting in use of such obligatory element as special high-frequency transformer with multiple primary and secondary parts, executed in the form of hermetic shells are defined. The constructive presence contact walls leads to the non-magnetic gap formation in the transformer, which essentially affects the entire system properties. The increased inductive component magnetization current requires the application special methods applica-

tion of non-contact energy transmission system. The relevance of such a task is determined by requirements for the conditions of use of the system with the electronic blocks in limited volume containers layout. This creates problems as the heat dissipation from the transmission system inverter power keys, and complicates the electronics blocks electromagnetic compatibility. The decision is offered to be found at the expense of resonant regimes organization. The variants of quadripole resonance are systematized, the which use at the inverter output and on the secondary side transformer of the lead to a desired change in the characteristics of rechargeable battery power system of the underwater vehicle. Considered effective combination of parallel and serial resonance circuit as a simultaneous solution addressing current discharging transistor inverter keys and increasing the transmitted active power. A significant advantage of the proposed implementations is the almost independent required effects formation of current unloading on the transformer primary side and deformation in the desired direction of the non-contact system power transmission external characteristics. By means of system mathematical modeling the resonant elements parameters, providing "soft switching" of inverter power transistors simultaneously with fulfillment of voltage resonance conditions on the transformer secondary side, are defined. The proposed solutions allowed increasing the power transferred to the underwater vehicle while minimizing losses in the inverter. The research results have practical application, are protected by patents of the Russian Federation, and allow increasing reliability and efficiency of system operation which consists in full batteries charging of the vehicle for the required time interval. These theoretical conclusions are well confirmed by full-scale experiment.

Autonomous unmanned underwater vehicle; non-contact power transmission; autonomous voltage inverter; "soft switching"; series resonant circuit; parallel resonance.

Введение. Расширение функциональных возможностей применения автономных необитаемых аппаратов (АНПА) обеспечивается при использовании подводного базирования, где отдельной задачей представляется процесс зарядки аккумуляторных батарей аппарата. В качестве базы, на которую причаливает подводный аппарат, часто используется стационарное донное причальное устройство (ДПУ). В этом случае электроэнергия к ДПУ может подводиться, например, по кабелю от берегового центра управления, а от ДПУ на борт АНПА – бесконтактным способом [1–4]. В процессе бесконтактной передачи электроэнергии участвует специальный высокочастотный трансформатор с разделяющимися первичной и вторичной частями, которые представляют собой прочные герметичные оболочки с размещенными внутри электрическими обмотками определенной конфигурации. Первичная часть такого трансформатора помещается на ДПУ, а вторичная устанавливается на АНПА. При причаливании аппарата к ДПУ и совмещении контактных поверхностей первичной и вторичной частей трансформатора осуществляется передача электроэнергии на борт подводного аппарата за счет возникающей индукционной связи между его обмотками [5–11]. Для питания первичной обмотки трансформатора применяется автономный инвертор напряжения (АИН), выполняющий преобразование электроэнергии базового источника в напряжение высокой частоты.

Особенностью трансформатора является наличие немагнитного зазора, определяемого суммарной толщиной контактных стенок и достигающего обычно значения 6–8 мм. Указанная особенность конструкции проявляется в низком значении коэффициента k магнитной связи между обмотками трансформатора, что вызывает повышенный ток намагничивания последнего и, как следствие, увеличенные потери мощности на транзисторных ключах автономного инвертора. Это требует применения дополнительных мер по отводу тепла от транзисторов, что усложняется требованием выполнения плотной компоновки инвертора в ограниченных размерах прочного контейнера.

Определение решений, позволяющих уменьшить ток ключей инвертора при сохранении значения передаваемой мощности, представляется актуальным, так как уменьшение тепловых нагрузок на электронные элементы приводит к повышению надежности устройства и увеличению эффективности процесса бесконтактного заряда аккумуляторных батарей подводного аппарата в целом.

Указанное пониженное значение коэффициента связи приводит еще к одному негативному эффекту – это появление значительного статизма внешней характеристики системы бесконтактной передачи энергии, что приводит к пониженному КПД системы. Поиск решения, позволяющий компенсировать такой эффект, тоже следует признать актуальной задачей.

Виды резонансных четырехполюсников. Изменение в желаемом направлении свойств системы бесконтактной передачи энергии можно осуществить за счет организации резонансных режимов. При этом появляется возможность как нейтрализации негативных эффектов, обусловленных наличием значительного немагнитного зазора в трансформаторе, так и выполнения независимой деформации внешней характеристики системы в желаемом направлении. Некоторые виды резонансных цепочек, которые могут быть использованы для решения указанных задач, представлены в виде четырехполюсников и показаны на рис. 1.

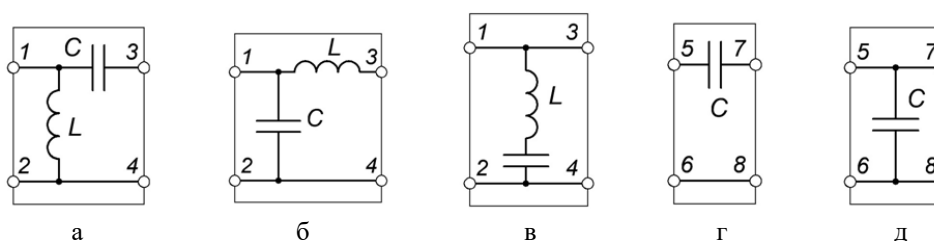


Рис. 1. Виды резонансных цепочек

Структурную схему системы бесконтактной передачи энергии для заряда аккумуляторных батарей, в которой показано включение этих резонансных четырехполюсников с указанием нумерации выводов, можно представить, как показано на рис. 2.

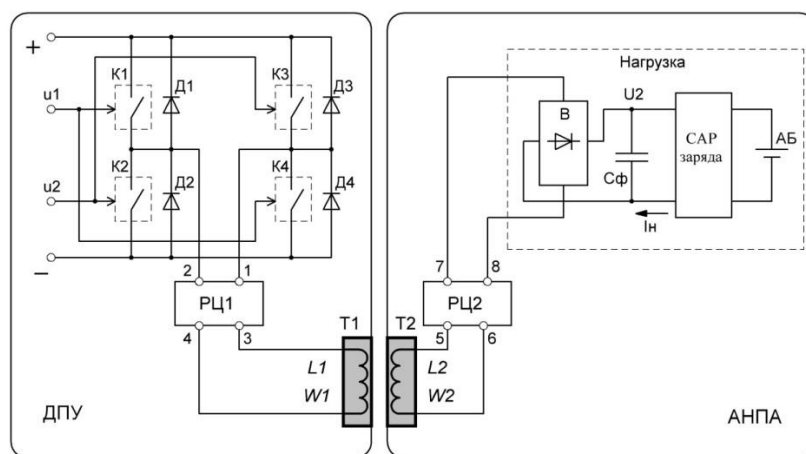


Рис. 2. Структурная схема системы бесконтактной передачи электроэнергии: К1–К4, Д1–Д2 – транзисторные ключи автономного инвертора напряжения и обратные диоды соответственно; В – выпрямитель; С_ф – фильтр; АБ – аккумуляторная батарея; Т1, Т2 – первичная и вторичная части трансформатора; РЦ1, РЦ2 – резонансные четырехполюсники на первичной и на вторичной стороне трансформатора соответственно

Практика показывает, что существуют предпочтительные применения этих цепочек. Так, например, Г-образные фильтры верхних частот (рис. 1,а), нижних частот (рис. 1,б) и последовательную LC-цепь (рис. 1,в) целесообразно использовать на первичной стороне, включая их в разрыв линии между выходом инвертора и выводами первичной обмотки трансформатора. Последовательное (рис. 1,г) или параллельное (рис. 1,д) включение конденсатора дает хорошие результаты при использовании этих элементов на вторичной стороне, включая их между выводами вторичной обмотки трансформатора и входными клеммами выпрямителя.

Выбор конкретных типов резонансных четырехполюсников для применения на первичной и на вторичной стороне зависит от начальных условий. Это, например, соотношение между располагаемым значением напряжения питания АИН и требуемым напряжением заряда АБ, ограничения на условия размещения трансформатора в АНПА, применяемая номенклатура сердечников и вид обмоточного провода и др.

Например, Г-образный фильтр верхних частот (см. рис. 1,а) применяется при необходимости снизить ток инвертора, а также ограничить ток первичной обмотки трансформатора без увеличения частоты и снижения входного напряжения [12]. При этом ток инвертора и соответственно первичной обмотки трансформатора обратно пропорционален индуктивности резонансного реактора.

Другой Г-образный фильтр нижних частот (см. рис. 1,б) обеспечивает снижение тока инвертора без ограничения тока первичной обмотки трансформатора [13]. Однако из-за падения напряжения на реакторе искажается внешняя характеристика системы бесконтактной передачи и уменьшается передаваемая мощность.

Снижение токовой нагрузки на ключи инвертора за счет компенсации индуктивной составляющей тока намагничивания трансформатора, повышенное значение которого вызывается немагнитным зазором, можно получить с помощью резонансного четырехполюсника, подключаемого на первичной стороне (см. рис. 1,в). При этом снижение тока инвертора достигается без уменьшения передаваемой мощности [14, 15].

Для увеличения тока короткого замыкания при неизменном значении напряжения холостого хода на вторичной стороне трансформатора целесообразно использовать резонансный элемент в виде последовательного конденсатора (см. рис. 1,г) [16], а параллельное включение конденсатора (см. рис. 1,д) приведет к увеличению напряжения при прежнем значении тока. Степень деформации исходных характеристик системы при введении резонансных элементов ограничена лишь допустимыми токовыми нагрузками на элементы системы. На конкретное применение показанных резонансных четырехполюсников накладывается также ограничение по габаритам входящих в их состав реактивных элементов, которые требуется размещать в прочных контейнерах блоков электроники.

Анализ работы автономного инвертора при холостом ходе на вторичной стороне трансформатора. В общем случае суммарные потери мощности на ключах инвертора складываются из динамических потерь переключения и статических потерь в открытом состоянии ключа, при этом потери от токов утечки в закрытом состоянии можно не учитывать как малые. В [13] уделяется основное внимание минимизации динамических потерь при включении, что достигается созданием условий включения при нулевом напряжении на ключе – режимом ZVS (zero voltage switching). Такой режим носит название «мягкой коммутации» при включении. Вместе с тем расчеты и эксперименты показывают, что динамические потери как при выключении, так и потери мощности на ключах в открытом состоянии вносят значительный вклад в общую сумму потерь.

Уменьшение динамических потерь при включении достигается организацией режима «мягкой коммутации», что достигается, очевидно, выключением при нулевом токе – режимом ZCS (zero current switching) [17, 18]. Вторую составляющую полных потерь на ключах в интервале открытого состояния ключей можно уменьшить за счет частичной компенсации индуктивной составляющей тока намагничивания трансформатора путем введения емкостного элемента параллельно первичной обмотке. Эту задачу успешно решает включение резонансного четырехполюсника, показанного на рис. 1, в.

Указанная цепь практически не влияет на форму и значения токов обмоток трансформатора, т.е. обеспечивается снижение действующего значения выходного тока инвертора при сохранении уровня передаваемой мощности. Резонансная цепь имеет собственную резонансную частоту f_U , соответствующую резонансу напряжений:

$$f_U = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}, \quad (1)$$

где L и C – соответственно индуктивность и ёмкость резонансной цепи.

Вместе с тем рабочая частота f коммутации АИН должна соответствовать частоте f_I резонанса токов в нагрузке АИН, состоящей из параллельно включенных LC -цепи и первичной обмотки трансформатора, так как при этом условии обеспечивается минимальная токовая нагрузка на транзисторные ключи АИН. Для первой гармоники переменного напряжения на выходе АИН справедливо соотношение

$$f = f_I = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L+L_1)C}}. \quad (2)$$

Ниже будет показано, что для выходного напряжения в виде меандра частота f коммутации АИН должна отличаться от резонансной частоты f_I и это отличие можно определить относительной частотой $n_I = f/f_I$.

Если ограничить анализ работы АИН первой гармоникой его выходных колебаний, то индуктивность L реактора и ёмкость C конденсатора последовательной резонансной цепи можно определить по формулам [19, 20]:

$$L = \frac{L_1}{m^2 - 1}. \quad (3)$$

$$C = \frac{m^2 - 1}{(2\pi \cdot m \cdot f)^2 L_1}, \quad (4)$$

где параметр $m = f_U/f_I$ – это отношение собственной частоты резонансной LC -цепи (частоты резонанса напряжений) к рабочей частоте коммутации АИН (частоте резонанса токов цепи нагрузки АИН). Выбор численного значения параметра m определяется на основе компромисса между желаемым снижением тока ключей АИН и приемлемыми значениями реактивных мощностей ёмкости и индуктивности резонансной цепи.

Для получения резонанса токов в нагрузке АИН для первой гармоники его выходного напряжения значение относительной частоты n_I должно быть равно единице. С учетом того, что на выходе АИН формируется прямоугольный сигнал, для получения минимального действующего значения тока АИН коэффициент n_I должен быть несколько больше единицы. Это отличие было установлено путем математического моделирования в программе MatLab с использованием моделей, приведенных в [19, 20]. Соответствующим выбором параметров резонансного четырехполюсника удастся снизить действующее значение выходного тока АИН примерно в три раза для режима холостого хода на вторичной стороне трансформатора.

Однако пропорционального уменьшения потерь мощности на ключах здесь не происходит. Причиной такого результата является форма тока инвертора, при которой в моменты выключения транзисторов инвертора ток имеет максимальное значение. Это значение меньше, чем амплитуда пилообразной формы тока в исходной схеме без резонанса и составляет примерно 0,6 от этой амплитуды, но этого оказывается достаточно, чтобы суммарные потери в инверторе остались на высоком уровне.

Существенное снижение мощности потерь в инверторе можно получить при переходе к «мягкой коммутации», что будет выполняться при определенном значении относительной частоты $n_I > 1$. В этом режиме выключение транзисторов инвертора будет происходить при нулевом токе и сопровождаться минимальными динамическими потерями. Вместе с тем, значения n_I должно быть ограничено, так как чрезмерное повышение этого параметра может привести к возрастанию потерь проводимости в открытом состоянии от увеличенной емкостной составляющей тока нагрузки инвертора.

Таким образом, должна решаться компромиссная задача определения значения относительной частоты n_I , удовлетворяющего поставленной задаче как в режиме холостого хода трансформатора, так и в полном диапазоне его нагрузок, включая последствия от неточной стыковки передающей Т1 и приемной Т2 частей трансформатора при причаливании АНПА к ДПУ. При этом минимизации должны подлежать как потери проводимости, так и потери переключения, образуемые включением и выключением транзисторов инвертора.

Указанная задача была решена путем математического моделирования инвертора в программе MatLab, схема силовой части которого приведена на рис. 2, где в качестве резонансного четырехполюсника РЦ1 на первичной стороне используется резонансная LC- цепь (рис. 1,в), подключенная параллельно первичной обмотке трансформатора, а на вторичной стороне нагрузка отсутствует. Для моделирования использовались модели, приведенные в [19, 20], при этом целью исследования являлось определение условий выполнения «мягкой» коммутации в режимах переключения в сочетании с минимальными потерями проводимости. Полученные результаты приведены на рис. 3, где переменные показаны в относительных единицах, при этом за базу приняты значения этих переменных при отсутствии резонансной цепи. На рисунке показаны зависимости тока I_{OFF}^* через транзисторы инвертора в момент подачи управляющего сигнала на отключение, а также действующее значение тока I_{II}^* инвертора и мощность P_{II}^* потерь в инверторе в функции относительной частоты $n_I = f/f_1$.

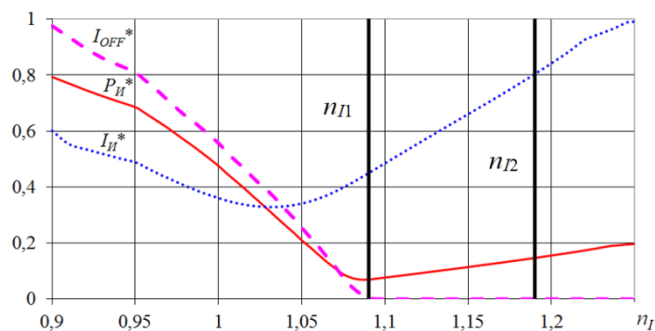


Рис. 3. Частотные характеристики АИН в режиме холостого хода: I_{OFF}^* – ток через ключи к моменту выключения; P_{II}^* – мощность потерь в АИН; I_{II}^* – действующее значение выходного тока АИН

Из этих графиков следует, что значение тока I_{OFF}^* и, соответственно, потери при выключении достигают нуля при относительной частоте $n_{11} = 1,09$. Область на плоскости графиков, расположенная справа от частоты n_{11} , соответствует области ZCS (переключение при нулевом токе) и здесь нулевые потери на выключение сохраняются. Слева от частоты $n_{12} = 1,19$ расположена область ZVS (переключение при нулевом напряжении), которая соответствует индуктивному режиму нагрузки инвертора и характеризуется нулевыми потерями на включение.

Диапазон значений относительной частоты от $n_{11} = 1,09$ до $n_{12} = 1,19$, обеспечивающий минимальные потери как на включение, так и на отключение транзисторов инвертора, установлен по результатам моделирования. Как компромиссное решение целесообразно принять значение относительной частоты из этого диапазона ближе к левой его границе, например $n_l = n_{11} = 1,1$, обеспечивающее минимальные суммарные потери на транзисторах. Компромисс заключается в том, что при выборе значения относительной частоты $n_{11} > 1,09$ или $n_{12} < 1,13$ потери переключения остаются нулевыми, а несколько увеличиваются потери проводимости за счет увеличения выходного тока инвертора.

Графики на рис. 3 определены для некоторого $m = \text{const}$ и соответствуют определенным значениям индуктивности реактора L и емкости C резонансной цепи. Вместе с тем представляет интерес определения такого значения параметра m , при котором мощности этих элементов будут минимальны при сохранении минимальных потерь в инверторе. Для этого можно использовать зависимости относительных мощностей S_L^* , S_C^* реактора и емкости резонансной цепи соответственно в функции параметра m , которые определяются путем математического моделирования инвертора при условии обеспечения в нем минимальных потерь. Указанные величины определяются в отношении к мощности инвертора без резонансной цепи.

Полученные графики относительных мощностей S_L^* , S_C^* в функции параметра m приведены на рис. 4, где показаны также зависимости относительной мощности S_{II}^* инвертора и потерь P_{II}^* в инверторе при подключении резонансной цепи. Потери P_{II}^* в инверторе находятся в отношении к мощности потерь инвертора без резонансной цепи.

Из рис. 4 следует, что мощность и соответственно габариты индуктивности и емкости достигают минимальных значений при $2 < m < 2,2$. Принимая, например, значение $m = 2$, можно определить требуемые значения L и C резонансной цепи.

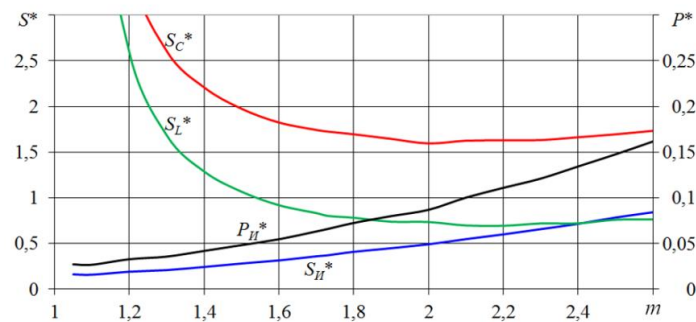


Рис. 4. Зависимости относительной мощности АИН и элементов резонансной LC-цепи от параметра m при холостом ходе: S_{II}^* – выходная мощность АИН; P_{II}^* – мощность потерь в АИН; S_C^* , S_L^* – мощности конденсатора и реактора соответственно

Внешние характеристики системы бесконтактной передачи электроэнергии. Внешние характеристики системы наглядно иллюстрируют эффективность процесса передачи электроэнергии. Деформацию этих характеристик в желаемом направлении можно получить при включении резонансных четырехполюсников во вторичную цепь трансформатора. Так, если необходимо увеличить ток нагрузки при неизменном значении напряжения холостого хода, то такую задачу можно решить применением резонансной цепи РЦ2 (рис. 1,г) в виде последовательного конденсатора.

В этом случае внешние характеристики, представляющие собой зависимости в относительных единицах напряжения U_2^* на выходе выпрямителя (рис. 2) от тока нагрузки I_H^* , изменяются для различных значений емкости конденсатора C , как показано на рис. 5. Базовыми величинами для определения напряжения и тока в относительных единицах служат значения напряжения холостого хода и тока короткого замыкания в системе без указанного резонансного элемента.

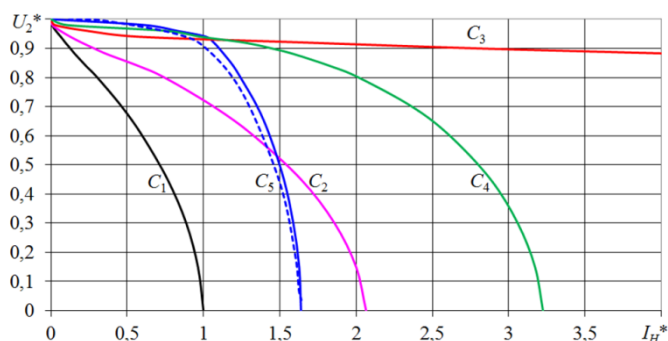


Рис. 5. Внешние характеристики системы передачи электроэнергии для различных значений резонансного конденсатора в цепи нагрузки:
 $C = C_1 > C_2 > C_3 > C_4 > C_5$

Характеристика на рис. 5, обозначенная C_1 , соответствует емкости $C = \infty$, т.е. отсутствию резонансного конденсатора, при этом напряжение холостого хода и ток короткого замыкания для этого графика имеют единичные базовые значения. Включение во вторичную цепь резонансного конденсатора вызывает изменение внешних характеристик, при этом практическое применение могут иметь характеристики в диапазоне изменения емкости резонансного конденсатора $C_5 < C < C_4$. Выбор конкретного значения емкости C ограничен допустимыми габаритами и определяется требованиями к параметрам процессу заряда АБ.

Для оценки достоверности результатов моделирования и адекватности исследуемой математической модели был проведен натурный эксперимент при емкости резонансного конденсатора $C = C_5$. Полученная внешняя характеристика, показанная на рис. 5 в виде штриховой линии, достаточно близко совпадает с результатами моделирования для этого же значения емкости, что является подтверждением справедливости приведенных теоретических выводов.

Заключение. Применение выбранных технических решений с использованием параллельной резонансной цепи на первичной стороне трансформатора и последовательного резонансного конденсатора на его вторичной стороне по результатам эксперимента в частном примере позволило снизить потери в инверторе со 130 до 12 Вт при холостом ходе на вторичной стороне трансформатора. В режиме короткого замыкания на вторичной стороне трансформатора потери в инверторе уменьшаются со 170 до 25 Вт. При этом использование указанных

решений позволяет увеличить передаваемую мощность с 212 Вт до 570 Вт. Эти результаты существенно поднимают качественные показатели системы и позволяют заключить, что поставленная задача повышения эффективности системы бесконтактной передачи электроэнергии для заряда АБ подводного аппарата успешно решена.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Stanimir S. Valtchev, Elena N. Baikova, Luis R. Jorge* Electromagnetic Field as the Wireless Transporter of Energy // *Facta Universitatis, Ser: Elec. Energ.* – December 2012. – Vol. 25, No. 3. – P. 171-181.
2. *Wang X., Shang J., Luo Z., Tang L., Zhang X., Li J.* Reviews of power systems and environmental energy conversion for unmanned underwater vehicles // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* – 2012. – Vol. 16, Is. 4. – P. 1958-1970. – URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111006095> (дата обращения 12.02.2018).
3. *Илларионов Г.Ю., Сиденко К.С., Бочаров Л.Ю.* Угроза из глубины: XXI век. – Хабаровск: КГУП «Хабаровская краевая типография», 2011. – 304 с.
4. Пат. 2502170, Российская федерация. Устройство для бесконтактной передачи электроэнергии на подводный объект (варианты) / Герасимов В.А., Копылов В.В., Кувшинов Г.Е., Наумов Л.А., Филоженко А.Ю., Чепурин П.И., заявитель и патентообладатель ИПМТ ДВО РАН. – № 2012118280/07, заявл. 03.05.2012. Опубл. 20.12.2013, Бюл. № 35. – 18 с.
5. *Мартынов А.А., В.К. Самсыгин, Д.В. Соколов и др.* Исследование устройства для беспроводной передачи электрической энергии на необитаемый подводный аппарат // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2017. – № 2 (380). – С. 92-100.
6. *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.
7. *Илларионов Г.Ю., Сиденко К.С., Бочаров Л.Ю.* Угроза из глубины: XXI век. – Хабаровск: КГУП «Хабаровская краевая типография», 2011. – 304 с. – ISBN 978-5-8570-311-6.
8. *Li-yan Q.* Research on Design of Plate-type Electromagnetic Coupler in Underwater Inductive Power Transmission // *MATEC Web of Conferences.* – 2015. – Vol. 31. – 5 p. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20153108004>.
9. *Saishenagha D., Devika M.* Wireless charging system using high power, high frequency magnetic interface for underwater electric vehicles // *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences.* – 2016. – Vol. 11. – P. 6977-6981.
10. *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.
11. *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.
12. Пат. 2637112 Российская Федерация, МПК H02M 3/335. Автономный инвертор напряжения для питания нагрузки через трансформатор с низким коэффициентом связи между его обмотками / Герасимов В.А., Филоженко А.Ю., Кувшинов Г.Ю., Чепурин П.И., Красковский М.В., заявитель и патентообладатель ИПМТ ДВО РАН. – № 2016147592, заявл. 05.12.2016; опубл. 30.11.2017, Бюл. № 34. – 14 с.
13. *Мелешин В.И.* Транзисторная преобразовательная техника. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.
14. Пат. 2558681 Российская федерация, МПК H02M 7/797. Автономный инвертор напряжения для питания нагрузки через трансформатор с низким коэффициентом связи между его обмотками / Герасимов В.А., Красковский М.В., Кувшинов Г.Е., Наумов Л.А., Себто Ю.Г., Филоженко А.Ю., Чепурин П.И.; заявитель и патентообладатель ИПМТ ДВО РАН. – № 2014111547/07, заявл. 25.03.2014; опубл. 10.08.2015, Бюл. № 22. – 22 с.
15. Пат. 2629751 Российская федерация, МПК H 02M 7/797. Устройство для бесконтактной передачи электроэнергии на подводный объект через трансформатор с низким коэффициентом связи / Герасимов В.А., Филоженко А.Ю., заявитель и патентообладатель ИПМТ ДВО РАН. – № 2016138230, заявл. 26.09.2016, опубл. 01.09.2017, Бюл. № 25. – 14 с.

16. Пат. 2602078 Российская Федерация, МПК H02J 7/02. Устройство для зарядки аккумуляторной батареи подводного объекта / Герасимов В.А., Филоженко А.Ю.; заявитель и патентообладатель ИПМТ ДВО РАН. – № 2015146625/07 заявл. 28.10.2015; опубл. 10.11.2016, Бюл. № 31. – 17 с.
17. *Ching-Ming Lai, Ming-Ji Yang, Shih-Kun Liang*. A Zero Input Current Ripple ZVS/ZCS Boost Converter with Boundary-Mode Control // *Energies*. – 2014. – P. 6765-6782.
18. *Mohan N., Undeland T.M., Robbins W.P.* Powerelectronics. – Converters, Applications, and Design. USA, Hoboken: John Willey & Sons Ltd, 2003. – 802 p.
19. *Kraskovskiy M.V., Gerasimov V.A., Kuvshinov G.E., Filozhenko A.Y.* The Use of Resonance for Current Downloading of the Transistor Keys of the Inverter // *International Journal of Control Theory and Applications*. – 2016. – Vol. 9, Is. 13. – P. 305-311.
20. *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.

REFERENCES

1. *Stanimir S. Valtchev, Elena N. Baikova, Luis R. Jorge* Electromagnetic Field as the Wireless Transporter of Energy, *Facta Universitatis, Ser: Elec. Energ.*, December 2012, Vol. 25, No. 3, pp. 171-181.
2. *Wang X., Shang J., Luo Z., Tang L., Zhang X., Li J.* Reviews of power systems and environmental energy conversion for unmanned underwater vehicles, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, Vol. 16, Issue 4, pp. 1958-1970. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111006095> (accessed 12 February 2018).
3. *Illarionov G.Yu., Sidenko K.S., Bocharov L.Yu.* Ugroza iz glubiny: XXI vek [Threat from the depths: the XXI century]. Khabarovsk: KGUP «Khabarovskaya kraevaya tipografiya», 2011, 304 p.
4. *Gerasimov V.A., Kopylov V.V., Kuvshinov G.E., Naumov L.A., Filozhenko A.Yu., Chepurin P.I.* Ustroystvo dlya beskontaktnoy peredachi elektroenergii na podvodnyy ob'ekt (varianty) [Device for contactless power transmission for underwater object (variants)]. Patent RF No. 2502170, applicant and patentee IPMT DVO RAN. No. 2012118280/07, declared 03.05.2012. Published 20.12.2013, Bull. No. 35, 18 p.
5. *Martynov A.A., V.K. Samsygin, D.V. Sokolov i dr.* Issledovanie ustroystva dlya besprovodnoy peredachi elektricheskoy energii na neobitaemyy podvodnyy apparat [Sokolov and others. Study of device for the wireless transmission of electrical energy for unmanned underwater vehicle], *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra* [The works of Krylov state research center]. 2017. No. 2 (380), pp. 92-100.
6. *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.
7. *Illarionov G.Yu., Sidenko K.S., Bocharov L.Yu.* Ugroza iz glubiny: XXI vek [Threat from the depths: the XXI century]. Khabarovsk: KGUP «Khabarovskaya kraevaya tipografiya», 2011, 304 p.
8. *Li-yan Q.* Research on Design of Plate-type Electromagnetic Coupler in Underwater Inductive Power Transmission, *MATEC Web of Conferences*, 2015, Vol. 31, 5 p. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20153108004>.
9. *Saishenagha D., Devika M.* Wireless charging system using high power, high frequency magnetic interface for underwater electric vehicles, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016, Vol. 11, pp. 6977-6981.
10. *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.
11. *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.
12. *Gerasimov V.A., Filozhenko A.Yu., Kuvshinov G.Yu., Chepurin P.I., Kraskovskiy M.V.* Avtonomnyy invertor napryazheniya dlya pitaniya nagruzki cherez transformator s nizkim koeffitsientom svyazi mezhdru ego obmotkami [Independent voltage inverter to supply load through transformer with low coupling coefficient between its windings]. Patent 2637112 Rossiyskaya Federatsiya, MPK N02M 3/335, applicant and patentee IPMT DVO RAN. No. 2016147592, declared 05.12.2016; published 30.11.2017, Bull. No. 34, 14 p.

13. *Meleshin V.I.* Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika [Transistor converting equipment]. Moscow: Tekhnosfera, 2006, 632 p.
14. *Gerasimov V.A., Kraskovskiy M.V., Kuvshinov G.E., Naumov L.A., Sebto Yu.G., Filozhenko A.Yu., Chepurin P.I.* Avtonomnyy invertor napryazheniya dlya pitaniya nagruzki cherez transformator s nizkim koeffitsientom svyazi mezhdu ego obmotkami [Stand-alone inverter voltage to power the load through a transformer with a low coupling coefficient between windings]. Patent 2558681 Rossiyskaya federatsiya, MPK H02M 7/797, applicant and patentee IPMT DVO RAN. No. 2014111547/07, declared 25.03.2014; published 10.08.2015, Bull. No. 22, 22 p.
15. *Gerasimov V.A., Filozhenko A.Yu.* Ustroystvo dlya beskontaktnoy peredachi elektroenergii na podvodnyy ob"ekt cherez transformator s nizkim koeffitsientom svyazi [Device for contactless power transmission for underwater object through a transformer with a low coupling coefficient]. Patent 2629751 Rossiyskaya federatsiya, MPK H 02M 7/797, applicant and patentee IPMT DVO RAN. No. 2016138230, declared 26.09.2016, published 01.09.2017, Bull. No. 25, 14 p.
16. *Gerasimov V.A., Filozhenko A.Yu.* Ustroystvo dlya zaryadki akkumulyatornoy batarei podvodnogo ob"ekta [Device for charging battery-battery batery underwater object]. Patent 2602078 Rossiyskaya Federatsiya, MPK N02J 7/02, applicant and patentee IPMT DVO RAN. – № 2015146625/07 declared 28.10.2015; published 10.11.2016, Bull. No. 31, 17 p.
17. *Ching-Ming Lai, Ming-Ji Yang, Shih-Kun Liang.* A Zero Input Current Ripple ZVS/ZCS Boost Converter with Boundary-Mode Control, *Energies*, 2014, pp. 6765-6782.
18. *Mohan N., Undelamd T.M., Robbins W.P.* Powerelectronics. Converters, Applications, and Design. USA, Hoboken: John Willey & Sons Ltd, 2003, 802 p.
19. *Kraskovskiy M.V., Gerasimov V.A., Kuvshinov G.E., Filozhenko A.Y.* The Use of Resonance for Current Downloading of the Transistor Keys of the Inverter, *International Journal of Control Theory and Applications*, 2016, Vol. 9, Issue 13, pp. 305-311.
20. *Gerasimov V.A., Kraskovskiy M.V., Kuvshinov G.E., Filozhenko A.Yu.* Povyshenie effektivnosti beskontaktnoy peredachi elektroenergii na avtonomnyy podvodnyy apparat [Improving the efficiency of contactless power transmission to an Autonomous underwater vehicle], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 2016, No. 1, pp. 24-30.

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

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

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

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

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