

Костенко Владимир Владимирович – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук; e-mail: kostenko@marine.febras.ru; 690950, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а; тел.: 84232432578; Лаборатория исполнительных устройств и систем телеуправления; к.т.н.; зав. лабораторией.

Михайлов Денис Николаевич – e-mail: denmih@marine.febras.ru; Лаборатория исполнительных устройств и систем телеуправления; с.н.с.

Нечаев Виталий Дмитриевич – e-mail: denmih@marine.febras.ru; Лаборатория исполнительных устройств и систем телеуправления; инженер.

Толстоногов Антон Юрьевич – e-mail: bioniwulf@gmail.com; Лаборатория исполнительных устройств и систем телеуправления; н.с.

Kostenko Vladimir Vladimirovich – Institute of Marine Technology Problems, Far Eastern Branch Russian Academy of Science; e-mail: kostenko@marine.febras.ru; 5a, Sukhanova street, Vladivostok, 690950, Russia; phone: +74232432578; Laboratory actuating devices and remote control systems; cand. of eng. sc.; laboratory head.

Mikhailov Denis Nikolaevich – e-mail: denmih@marine.febras.ru; Laboratory actuating devices and remote control systems; the senior researcher.

Nechaev Vitaliy Dmitrievich – e-mail: denmih@marine.febras.ru; Laboratory actuating devices and remote control systems; engineer.

Tolstonogov Antons Yurevich – e-mail: bioniwulf@gmail.com; Laboratory actuating devices and remote control systems; researcher.

УДК 621.31

DOI 10.18522/2311-3103-2017-1-108120

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

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ БЕСКОНТАКТНОГО ЗАРЯДА АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

Определена структура системы бесконтактной передачи электроэнергии на борт автономного обитаемого подводного аппарата для осуществления зарядки его аккумуляторных батарей при подводном базирования. Отмечены преимущества такого способа заряда и показаны особенности режимов работы автономного инвертора и высокочастотного трансформатора, который выполнен с разделяющимися первичной и вторичной частями. Наличие немагнитного зазора между обмотками является следствием особенности конструкции и приводит к увеличенной намагничивающей составляющей тока трансформатора и повышенному выходному току инвертора. Поставлена задача повышения эффективности системы бесконтактной передачи электроэнергии путем токовой разгрузки силовых транзисторов автономного инвертора за счет компенсации индуктивной составляющей его выходного тока. Рассмотрены известные технические решения и обосновано применения для решения поставленной задачи последовательной резонансной цепи из индуктивности и конденсатора, включаемых параллельно первичной обмотке трансформатора. Выполнено математическое моделирование системы с подключенной резонансной цепью и определены рекомендации по выбору параметров и режимов работы, приводящие к решению поставленной задачи. Анализ диаграмм сигналов, полученных при математическом моделировании, позволил сформулировать требования, обеспечивающие «мягкое переключение» как при включении, так и при выключении силовых ключей автономного инвертора. Найденные решения позволили минимизировать потери мощности в инверторе, уменьшить нагрев его элементов и повысить надежность и эффективность работы, сводящуюся к осуществлению зарядки аккумуляторных батарей аппарата за

требуемый интервал времени. Показано, что использование резонанса на вторичной стороне трансформатора позволяет деформировать внешнюю характеристику системы в желаемом направлении, что позволяет повысить уровень передаваемой на выход электрической мощности при сохранении минимальных потерь в инверторе. Приведенные теоретические выводы хорошо подтверждаются натурным экспериментом.

Автономный необитаемый подводный аппарат; бесконтактная передача электро-энергии; автономный инвертор напряжения; «мягкая коммутация»; последовательная резонансная цепь; параллельный резонанс.

V.A. Gerasimov, M.V. Kraskovskiy, A.Yu. Filozhenko

INCREASING THE EFFECTIVENESS OF THE CONTACTLESS CHARGE BATTERIES AUTONOMOUS UNMANNED UNDERWATER VEHICLE

The structure are determined the contactless power transmission system on board the autonomous unmanned underwater vehicle for charging its batteries at underwater basing. The advantages are noted of such a charge method and the features are shown a modes of operation of an autonomous of the inverter and high-frequency transformer, which is designed with multiple primary and secondary parts. The presence of a non-magnetic gap between the windings is a consequence of the feature design and leads to increased component of the magnetizing current of the transformer and the increased output current of the inverter. The task of increasing the effectiveness of the contactless power transmission system by current discharge transistors autonomous inverter due to the compensation of inductive component of its output current. The known technical solutions are considered and substantiated application to the task serial resonance circuit of the inductor and a capacitor connected in parallel of the primary winding of the transformer. Mathematical modeling of systems with connected resonant circuit is done and identified recommendations on the choice of parameters and operating modes, resulting in a solution of the task. Analysis of signal diagrams obtained by mathematical modeling, allowed to formulating requirements to ensure a "soft switch" as when turned on, and when you turn off the power of autonomous inverter keys. These solutions allow to minimize the power loss in inverter, reduce the heat of its elements and to improve the reliability and efficiency, which reduces the implementation of the battery charging apparatus for the desired time interval. It is shown that the use of resonance on the secondary side of the transformer allows you to distort the external characteristic of system in the desired direction, which can increase the level of electric power transmitted to the output while maintaining a minimal loss in the inverter. These theoretical conclusions are well supported by experiment.

Autonomous unmanned underwater vehicle; contactless power transmission; autonomous voltage inverter; «soft switching»; series resonant circuit; parallel resonance.

Введение. Источником энергии для функционирования автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) в большинстве его применений являются аккумуляторные батареи, зарядка которых может выполняться различными способами [1, 2]. Самый простой способ по аппаратной реализации, но технологически наиболее трудоемкий заключается в подъеме аппарата на борт обеспечивающего судна, выполнения необходимых монтажных и коммутационных процедур и осуществления зарядки батарей от какого-либо зарядного устройства.

Повышение оперативности этого процесса со значительным расширением функциональных возможностей применения АНПА получается при выполнении зарядки его батарей с использованием бесконтактного способа передачи электро-энергии [3, 4]. В таком процессе участвует специальный 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 базе, а вторичная – устанавливается на АНПА. При причаливании аппарата к базе и совмещении контактных поверхностей первичной и вторичной частей трансформатора осуществляется передача электроэнергии на борт подводного ап-

парата за счет возникающей индукционной связи между его обмотками. Для питания первичной обмотки трансформатора применяется автономный инвертор напряжения (АИН), выполняющий преобразование электроэнергии базового источника в напряжение высокой частоты, способствующее снижению массы и габаритов трансформатора, а также обеспечивающий необходимое регулирование передаваемой электроэнергии [5].

В качестве базы могут использоваться различные подводные объекты. Это может быть, например, так называемый «гараж», опускаемый с обеспечивающего судна под воду с помощью специальных спускоподъемных устройств.

В этом случае передача электроэнергии к АИН, расположенному совместно с первичной частью трансформатора в «гараже», осуществляется по кабель-тросу, который дополнительно к электрической связи обеспечивает также как механическую силовую связь между судном и «гаражом», так и функционирование информационного канала между оператором на обеспечивающем судне и АНПА.

Другая конструкция базы причаливания для АНПА может быть выполнена в виде донного причального устройства (ДПУ), устанавливаемого под водой на грунте стационарно. Размещение функциональных элементов системы электропитания АНПА и связи между ними при использовании ДПУ показано на рисунке 1. Электроэнергия к ДПУ может подводиться от береговой станции по кабелю, длина которого может достигать десятков километров. В этом варианте электропитания используется кабель с оптоволоконной жилой, связывающий ДПУ с берегом, при этом наряду с передачей электроэнергии одновременно организуется также информационный канал [6].

Длительное базирование аппарата на ДПУ актуально при неизменном районе действия, например, для электрообеспечения АНПА при охране порта или мониторинга подводной обстановки заданного района. Применение этой технологии в военных целях позволяет решить проблему автономности и существенно увеличить время нахождения аппарата на позиции. Использование бесконтактной передачи электроэнергии для зарядки аккумуляторных батарей АНПА под водой в автоматическом режиме в данном случае не имеет альтернативы [7].

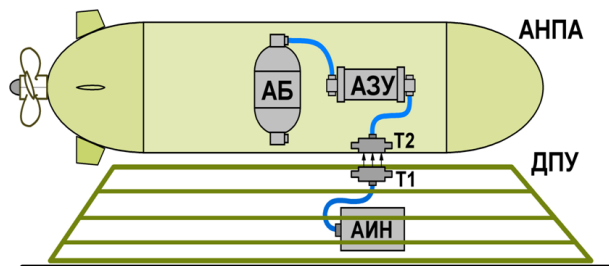


Рис. 1. Размещение функциональных элементов системы бесконтактной передачи электроэнергии для зарядки аккумуляторных батарей при базировании АНПА на ДПУ: АБ – аккумуляторная батарея, АЗУ – автоматическое зарядное устройство, АИН автономный инвертор напряжения; Т1, Т2 – первичная и вторичная части высокочастотного трансформатора

Составными элементами системы бесконтактного заряда являются автономный инвертор напряжения (АИН), высокочастотный трансформатор с разделёнными первичной и вторичной обмотками, автоматическое зарядное устройство (АЗУ) и аккумуляторная батарея (АБ) [7].

Первичная T1 и вторичная T2 части представляют собой отдельные герметичные оболочки, в которые помещены обмотки трансформатора. При совмещении контактных поверхностей первичной и вторичной частей трансформатора возникает магнитная связь между его обмотками и осуществляется трансформация напряжения во вторичную обмотку.

Каждая из оболочек имеет выполненную из изоляционного материала контактную стенку, толщина которой достигает нескольких миллиметров. В режиме передачи энергии оси обмоток должны совпадать, а их торцы находиться на минимальном расстоянии друг относительно друга. Тем самым эти обмотки образуют трансформатор, который, в связи с наличием указанного немагнитного конструктивного зазора между торцами обмоток, имеет пониженное значение коэффициента k магнитной связи. Этот коэффициент $k = M / \sqrt{L_1 L_2}$ определяется взаимной индуктивностью M между обмотками трансформатора, а также собственными индуктивностями L_1 и L_2 его первичной и вторичной обмоток [8].

Низкое значение коэффициента k магнитной связи между обмотками трансформатора приводит к повышенному току намагничивания последнего и, как следствие, увеличенным потерям мощности на транзисторных ключах автономного инвертора, выход которого подключен к первичной обмотке трансформатора. Это требует применения дополнительных мер по отводу тепла от транзисторов, что усложняется требованием выполнения плотной компоновки инвертора в ограниченных размерах прочного контейнера. По этой причине определение решений, позволяющих уменьшить ток ключей инвертора при сохранении значения передаваемой мощности, представляется актуальным, т.к. уменьшение тепловых нагрузок на электронные элементы приводит к повышению надежности устройства и увеличению эффективности процесса бесконтактного заряда аккумуляторных батарей подводного аппарата в целом.

Анализ работы автономного инвертора при холостом ходе на вторичной стороне трансформатора. Низкое значение коэффициента связи между разнесенными обмотками трансформатора вызывает увеличенное значение намагничивающей составляющей входного тока трансформатора, что соответствует уменьшению коэффициента мощности АИН и эквивалентно увеличению выходного тока инвертора. При этом выходной ток увеличивается в несколько раз по сравнению с минимально необходимым значением, определяемым нагрузкой трансформатора на его вторичной стороне. Это обстоятельство вызывает следующие последствия: необходимость выбора транзисторов и диодов АИН с завышенными номинальными токами; увеличение потерь мощности в этих полупроводниковых приборах, их массы и стоимости; усложнение проблемы отвода тепла, соответствующего дополнительным потерям мощности.

Негативный характер этих последствий усиливается в системе энергообеспечения подводного аппарата, поскольку электронные блоки должны размещаться в герметичных контейнерах с плотной компоновкой и с ограниченными возможностями отвода тепла от силовых приборов.

В общем случае суммарные потери мощности на ключах инвертора складываются из динамических потерь переключения и статических потерь в открытом состоянии ключа, потери от токов утечки в закрытом состоянии можно не учитывать как малые. В [9] 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. Таким образом, можно поставить актуальную задачу обеспечения условий «мягкой коммутации» при выключении, что достигается, очевидно, выключением при нулевом токе – режимом ZCS (zero current switching) [10–12]. Кроме этого, актуальной является также задача поиска решений снижения потерь проводимости в интервале открытого состояния ключей, при этом должно сохраняться значение передаваемой мощности.

Решение задачи токовой разгрузки ключей в статическом режиме открытого состояния можно искать в виде такой структуры нагрузки АИН, при которой выполняется компенсация намагничивающей составляющей входного тока трансформатора. Поскольку эта составляющая имеет индуктивный характер, то компенсацию следует выполнять некоторым элементом, имеющим ёмкостной характер нагрузки. Применение конденсатора в чистом виде здесь ограничено, т.к. на выходе инвертора формируется напряжение прямоугольной формы.

Одним из известных способов токовой разгрузки силовых ключей мостового инвертора является включение Г-образного LC-фильтра низких частот на его выходе, при этом нагрузка инвертора подключается параллельно конденсатору фильтра [13]. Такое решение позволяет разгрузить ключи АИН, однако из-за падения напряжения на реакторе искажается внешняя характеристика трансформатора, и, как следствие, снижается передаваемая мощность.

Лучшие результаты получаются при использовании резонансной LC-цепи из последовательно соединённых индуктивности и ёмкости, подключаемой на выходе инвертора параллельно первичной обмотке трансформатора [14]. Эта цепь также компенсирует индуктивную составляющую выходного тока инвертора, но практически не влияет на форму и значения токов обмоток трансформатора, т.е. обеспечивается снижение действующего значения выходного тока инвертора при сохранении уровня передаваемой мощности. Применяемая 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 включённых 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 условия анализа работы АИН первой гармоникой его выходных колебаний, то индуктивность L реактора и ёмкость C конденсатора последовательной резонансной цепи можно определить по формулам [15, 16]

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

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

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 [15–17].

Для анализа полученных временных диаграмм тока $I_{II}(t)$ инвертора примем нумерацию ключей и оппозитных диодов в составе силовой части АИН, как показано на рис. 2. Результаты моделирования для режима холостого хода трансформатора, иллюстрирующие эффект от введения резонансной LC-цепи, приведены на рис. 3. Сигналы управления u_1 и u_2 инвертором поступают на диагонально расположенные ключи и имеют интервал «dead time» при переключении, что предотвращает аварийные сквозные токи через ключи одной стойки К1, К2 или К3, К4.

Графики на рис. 3, а соответствуют состоянию, когда резонансная LC-цепь отсутствует и к выходу АИН подключена только первичная обмотка трансформатора с собственной индуктивностью L_I . В этом случае ток в нагрузке изменяется линейно и протекает поочередно через диагональные ключи или через диоды. На рис. 3, а показаны интервалы проводимости ключей (двойная линия) и диодов (пунктир) для этого случая на протяжении одного периода коммутации. Управляющий сигнал u_1 воздействует на входы ключей К1, К4 в интервале времени $t_1 \dots t_2$, затем следует пропуск «dead time» в интервале $t_2 \dots t_3$ и далее управление u_2 поступает на ключи К2, К3 второй диагонали моста инвертора в интервале времени $t_3 \dots t_4$. Интервалы проводимости ключей и диодов чередуются, при этом ключи каждой диагонали проводят ток при воздействии соответствующего управляющего сигнала u_1 или u_2 после завершения интервала проводимости диодов.

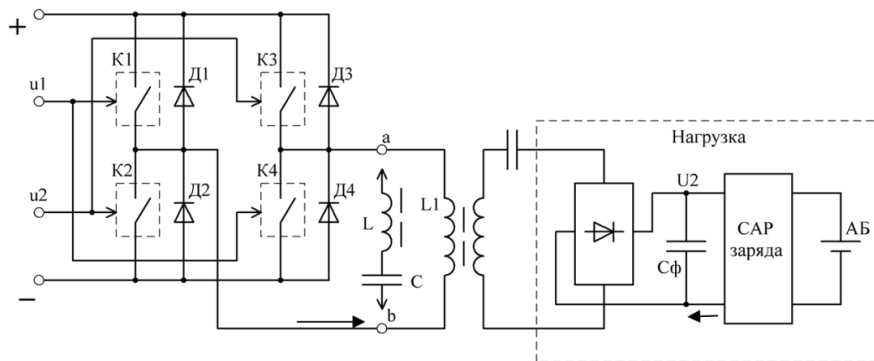


Рис. 2. Схема силовой части АИН

При этом ток инвертора имеет повышенное значение, обусловленное увеличенным током намагничивания трансформатора и относительно единичной амплитуды его действующее значение равно $1/\sqrt{3}$. Кроме этого, из рис. 3, а следует,

что в момент времени закрывания ключей (момент t_2 для К1, К4 и момент t_4 для К2, К3) ток через ключи имеет максимальное значение. Это приводит к значительным потерям мощности на ключах в режиме выключения, увеличенному нагреву элементов инвертора и проблемам отвода тепла.

При подключении параллельно первичной обмотке трансформатора резонансной LC-цепи, показанной на рис. 2, форма выходного тока инвертора и интервалы проводимости ключей и диодов изменяются. Для первой гармоники выходного напряжения АИН условие $n_1 = f / f_1 = 1$ соответствует резонансу токов в его нагрузке. При этом действующее значение выходного тока инвертора имеет минимальное значение, определяемое активными потерями в цепях протекания тока. Для реального выходного сигнала инвертора в виде меандра минимальное действующее значение тока инвертора достигается при $n_1 = f / f_1 > 1$, при этом форма выходного тока инвертора и интервалы проводимости ключей и диодов будут иметь вид как показано на рис. 3,б.

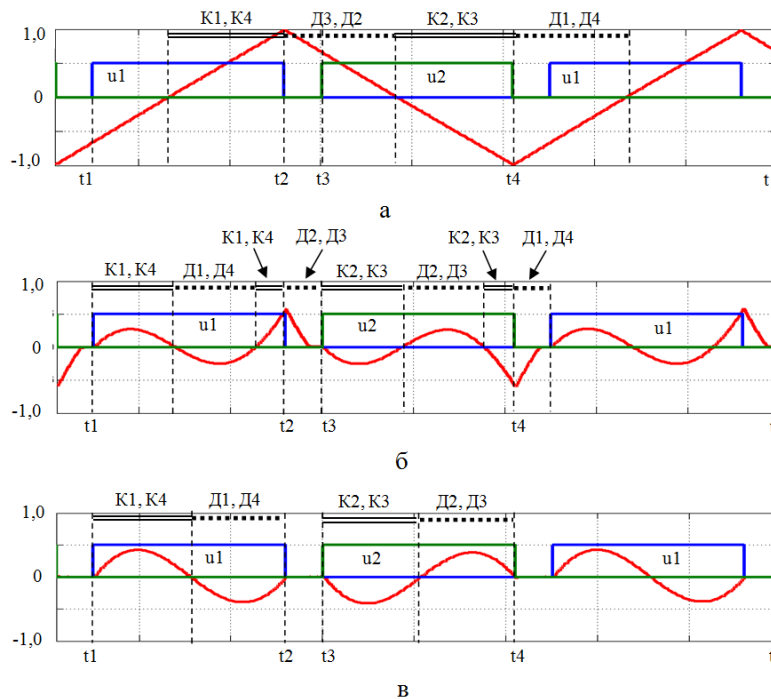


Рис. 3. Диаграммы выходного тока АИН при изменении параметров резонансной цепи: а – резонансная цепь отсутствует; б – параметры резонансной цепи соответствуют относительной частоте $n_1 = 1$; параметры резонансной цепи соответствуют нулевым потерям переключения при $n_1 > 1$

Результаты моделирования показывают, что таким образом можно уменьшить действующее значение тока инвертора примерно в 2,5 раза [15, 16]. Однако соответствующего уменьшения потерь мощности здесь не происходит. Причиной такого результата является форма тока инвертора, при которой, так же как и исходном варианте, в моменты времени t_2 и t_4 выключения ключей ток имеет максимальное значение. Это значение меньше, чем амплитуда пилообразной формы тока на рис. 3,а, и равно примерно 0,6, 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, чрезмерное повышение значения n_I приведет к возрастанию потерь проводимости в открытом состоянии от увеличенной емкостной составляющей тока нагрузки инвертора.

Таким образом, возникает 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 базе. 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 резонансная LC-цепь подключена параллельно первичной обмотке трансформатора, а на вторичной стороне нагрузка отсутствует. Для моделирования использовались модели, приведенные в [15–17], при этом целью исследования являлось определение условий выполнения «мягкой» коммутации в режимах переключения в сочетании с минимальными потерями проводимости. Полученные результаты приведены на рис. 4, где переменные показаны в относительных единицах, при этом за базу приняты значения этих переменных при отсутствии резонансной цепи. На рисунке 4 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 $n_I = f / f_I$.

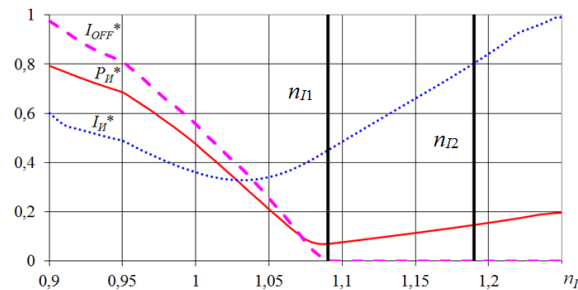


Рис. 4. Частотные характеристики АИН в режиме холостого хода: I_{OFF}^* — ток через ключи к моменту выключения; P_{II}^* — мощность потерь в АИН; I_{II}^* — действующее значение выходного тока АИН

Из этих графиков следует, что значение тока I_{OFF}^* и, соответственно, потери при выключении достигают нуля при относительной частоте $n_{I1} = 1,09$. Область на плоскости графиков, расположенная справа от частоты n_{I1} , соответствует области ZCS (переключение при нулевом токе) и здесь нулевые потери на выключение сохраняются. Слева от частоты $n_{I2} = 1,19$ расположена область ZVS (переключение при нулевом напряжении), которая соответствует индуктивному режиму нагрузки инвертора и характеризуется нулевыми потерями на включение. Диапа-

зон значений относительной частоты от $n_{I1} = 1,09$ до $n_{I2} = 1,19$, 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, $n_I = n_{I1} = 1,1$, обеспечивающее минимальные суммарные потери на транзисторах. Компромисс заключается в том, что при выборе значения относительной частоты $n_{I1} > 1,09$ или $n_{I2} < 1,19$ потери переключения остаются нулевыми, а несколько увеличиваются потери проводимости за счет увеличения выходного тока инвертора.

Графики на рис. 4 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. 5, 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. 5 следует, что мощность и, соответственно, габариты индуктивности и емкости достигают минимальных значений при $2 < m < 2,2$. Принимая меньшее значение $m = 2$, можно определить требуемые значения L и C резонансной цепи, при этом для конкретного примера индуктивность первичной обмотки трансформатора $L_1 = 120 \text{ мкГн}$, а частота коммутации инвертора $f = 20 \text{ кГц}$. Вычисления по формулам (3), (4) дают следующие результаты: $L = 40 \text{ мкГн}$, $C = 0,4 \text{ мкФ}$.

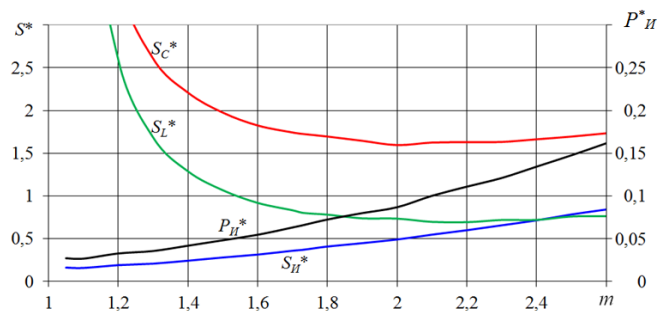


Рис. 5. Зависимости относительной мощности АИН и элементов резонансной LC-цепи от параметра m при холостом ходе: S_{II}^* – выходная мощность АИН; P_{II}^* – мощность потерь в АИН; S_C^* , S_L^* – мощности конденсатора и реактора соответственно

Характеристики системы бесконтактной передачи электроэнергии. При подключении к выводам вторичной обмотки трансформатора нагрузки параметры передаваемой в нее электроэнергии можно определить в виде внешних ха-

рактических характеристик системы $U_2(I_H)$, где напряжение U_2 и ток I_H показаны на рис. 2. При этом нагрузку в рассматриваемом случае представляет сочетание выпрямителя, фильтра C_Φ , импульсного преобразователя с системой автоматического регулирования (САР заряда) параметров заряда аккумуляторной батареи и аккумуляторная батарея (АБ) [18]. Полная зарядка батареи будет возможна, если к входу САР заряда подводится напряжение, значение которого превышает напряжение полностью заряженной батареи. С учетом ряда конструктивных и технологических ограничений внешняя характеристика $U_2(I_H)$ системы бесконтактной передачи электроэнергии должна иметь вид одной из характеристик, приведенных на рисунке 6, где U_2^* – напряжение на входе САР заряда, а I_H^* – ток заряда АБ в относительных единицах. Показанное семейство характеристик получается при изменении значения резонансного конденсатора C_p , включенного на вторичной стороне трансформатора последовательно с нагрузкой [19].

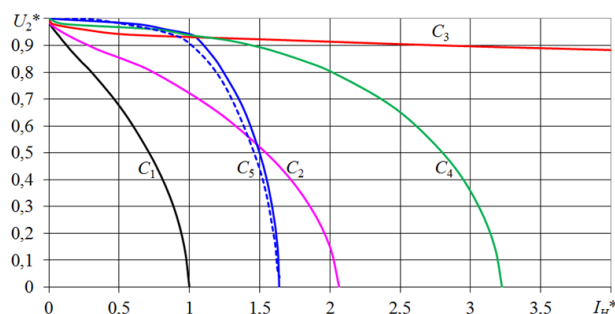


Рис. 6. Внешние характеристики системы передачи электроэнергии для различных значений резонансного конденсатора в цепи нагрузки:
 $C_p = C1 > C2 > C3 > C4 > C5$

Характеристика на рисунке 6, обозначенная C_1 , соответствует $C_p = \infty$, т.е. отсутствию резонансного конденсатора, при этом напряжение холостого хода и ток короткого замыкания для этого графика приняты за единичные базовые значения. Включение во вторичную цепь резонансного конденсатора вызывает деформацию внешних характеристик системы как показано на рисунке 6, при этом практическое применение имеют характеристики в диапазоне изменения емкости резонансного конденсатора $C_5 < C_p < C_4$. Выбор конкретного значения емкости C_p определяется требованиями к параметрам и процессу заряда АБ.

Таким образом, рассмотренные решения [14, 19], состоящие в использовании резонансных явлений, как на первичной, так и на вторичной сторонах трансформатора, сопровождаются суммированием положительных свойств. Действительно, введение резонансной LC -цепи параллельно первичной обмотке трансформатора позволяет уменьшить потери в инверторе, снизить температуру силовых ключей и повысит надежность устройства без влияния на внешнюю характеристику системы, а применение последовательного резонансного конденсатора на вторичной стороне трансформатора приводит к независимому формированию требуемой внешней характеристики, определяющей передаваемую мощность. При этом уже будут действовать ограничения, связанные с допустимыми нагрузками на резонансный конденсатор C_p [20].

Для подтверждения достоверности полученных выводов было выполнено экспериментальное исследование на лабораторном стенде, содержание которого соответствовало расчетной схеме, приведенной на рис. 2. Параметры резонансных

элементов и трансформатора имели следующие значения: $L = 40 \text{ мкГн}$; $C = 0,4 \text{ мкФ}$; $L_1 = L_2 = 120 \text{ мкГн}$. Значение C_p принято равным емкости конденсатора $C_5 = 0,35 \text{ мкФ}$, которому соответствует определенная расчетная характеристика на рис. 6. На этом же рисунке штриховой линией показана экспериментальная внешняя характеристика, снятая на лабораторном стенде для указанных выше параметров. Хорошее совпадение результатов эксперимента и расчета подтверждает адекватность принятых в исследованиях математических моделей и позволяет достоверно сделать следующее заключение.

Заключение. Применение выбранных технических решений с использованием параллельной резонансной цепи на первичной стороне трансформатора и последовательного резонансного конденсатора на его вторичной стороне по результатам указанного эксперимента в данном частном примере позволило снизить потери в инверторе со 130 Вт до 12 Вт при холостом ходе на вторичной стороне трансформатора. В режиме короткого замыкания на вторичной стороне трансформатора потери в инверторе уменьшаются со 170 Вт 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. *Manley J.E.* Unmanned Surface Vehicles, 15 Years of Development // OCEANS. – 2008. – 4 P. Доступ для зарегистрированных пользователей. – URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5152052/> (дата обращения 12.01.2017).
2. *Wang X., Shang J., Luo Z., Tang L., Zhang X., Li J.* Reviews of power systems and environmental energy conversion for unmanned underwater vehicles // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2012. – Vol. 16, Issue 4. – P. 1958-1970. Доступ для зарегистрированных пользователей. – URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111006095> (дата обращения 12.01.2017).
3. *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
4. *Singh S.K., Hasarmani T.S., Holmukhe R.M.* Wireless Transmission of Electrical Power Overview of Recent Research and Development // International Journal of Computer and Electrical Engineering. – 2012. – P. 207-211.
5. Патент 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. Оpubл. 2013, Бюл. №35.
6. *Илларионов Г.Ю., Сиденко К.С., Бочаров Л.Ю.* Угроза из глубины: XXI век. – Хабаровск: КГУП «Хабаровская краевая типография», 2011. – 304 с.
7. *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.
8. *Герасимова Г.Н., Кувшинов Г.Е., Наумов Л.А., Усольцев В.К.* Топологические методы анализа в электротехнике и автоматике: учеб. пособие для вузов. – Владивосток: Дальнаука, 2001. – 232 с.
9. *Мелешин В.И.* Транзисторная преобразовательная техника. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.
10. *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
11. *MohanN., UndelandT.M., RobbinsW.P.* Powerelectronics. – Converters, Applications, and Design. USA, Hoboken: John Willey & Sons Ltd, 2003. – 802 p.

12. *Won-suk Choi, Sungmo Young.* Analysis of MOSFET Failure Modes in LLC Resonant Converter // Сайт компании Fairchild. – 2009. – 12 с. – URL: <http://fairchildsemi.com> (дата обращения 19.01.2017).
13. *Герасимов В.А., Красковский М.В., Филоженко А.Ю.* Автономный инвертор напряжения с последовательным резонансным контуром // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 4 (177). – С. 147-158.
14. Патент 2558681, Российская федерация. Автономный инвертор напряжения для питания нагрузки через трансформатор с низким коэффициентом связи между его обмотками / Кувшинов Г.Е., Наумов Л.А., Себто Ю.Г., Герасимов В.А., Филоженко А.Ю., Чепурин П.И., Красковский М.В. Оpubл. 2015, бюл. № 22.
15. *Герасимов В.А., Красковский М.В., Кувшинов Г.Е., Филоженко А.Ю.* Использование резонанса для токовой разгрузки транзисторных ключей инвертора // Двойные технологии. – 2016. – № 4 (77). – С. 55-60.
16. *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. – P. 305-311.
17. *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.
18. Патент 2530877, Российская федерация. Устройство для зарядки аккумуляторной батареи / Герасимов В.А., Филоженко А.Ю., Чепурин П.И. . Оpubл. 2014, Бюл. №29.
19. Патент 2602078, Российская федерация. Устройство для зарядки аккумуляторной батареи подводного объекта / Герасимов В.А., Филоженко А.Ю. Оpubл. 2016, Бюл. № 31.
20. MetallizedPolypropyleneFilmCapacitors // «Ай-Си Контракт». – URL: http://www.ic-contract.ru/images/pdf/TDK/MKP_B32656S.pdf (дата обращения 24.03.2016).

REFERENCES

1. *Manley J.E.* Unmanned Surface Vehicles, 15 Years of Development, *OCEANS*, 2008, P. 4. Available at:<http://ieeexplore.ieee.org/document/5152052/> (Accessed 12 January 2017).
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 January 2017).
3. *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. pp. 171-181
4. *Singh S.K., Hasarmani T.S., Holmukhe R.M.* Wireless Transmission of Electrical Power Overview of Recent Research and Development, *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, 2012, pp. 207-211.
5. *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 (options)]. Patent RF 2502170. Published 2013, Bull. No. 35.
6. *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.
7. *Gerasimov V.A., Filozhenko A.Yu., Chepurin P.I.* Struktura sistemy elektrosnabzheniya avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata [The structure of the power supply system of Autonomous underwater vehicle], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 3 (140), pp. 47-55.
8. *Gerasimova G.N., Kuvshinov G.E., Naumov L.A., Usol'tsev V.K.* Topologicheskie metody analiza v elektrotekhnike i avtomatike: ucheb. posobie dlya vuzov [Topological methods of analysis in electrical engineering and automation: proc. the manual for high schools]. Vladivostok: Dal'nauka, 2001, 232 p.
9. *Meleshin V.I.* Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika [Transistor conversion equipment]. Moscow: Tekhnosfera, 2006, 632 p.

10. 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.
11. Mohan N., Undeland T.M., Robbins W.P. Power electronics. Converters, Applications, and Design. USA, Hoboken: John Wiley & Sons Ltd, 2003, 802 p.
12. Won-suk Choi, Sungmo Young. Analysis of MOSFET Failure Modes in LLC Resonant Converter, *Сайт компании Fairchild* [Website of Fairchild], 2009, 12 p. Available at: <http://fairchildsemi.com> (Accessed 12 January 2017).
13. Gerasimov V.A., Kraskovskiy M.V., Filozhenko A.Yu. Avtonomnyy invertor napryazheniya s posledovatel'nyim rezonansnym konturom [Autonomous voltage inverter with series resonant circuit], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 4 (177), pp. 147-158.
14. Kuvshinov G.E., Naumov L.A., Sebtov Yu.G., Gerasimov V.A., Filozhenko A.Yu., Chepurin P.I., Kraskovskiy M.V. Avtonomnyy invertor napryazheniya dlya pitaniya nagruzki cherez transformator s nizkim koeffitsientom svyazi mezhdru ego obmotkami [Stand-alone inverter voltage to power the load through a transformer with a low coupling coefficient between windings]. Patent RF 2558681. Published 2015, bull. No. 22.
15. Gerasimov V.A., Kraskovskiy M.V., Kuvshinov G.E., Filozhenko A.Yu. Ispol'zovanie rezonansa dlya tokovoy razgruzki tranzistornykh klyuchey invertora [The use of the resonance current of the discharge transistor switches of the inverter is], *Dvoynye tekhnologii* [Dual technology], 2016, No. 4 (77), pp. 55-60.
16. 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.
17. 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 for Autonomous underwater vehicle], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater researches and robotics], 2016, No. 1, pp. 24-30.
18. Gerasimov V.A., Filozhenko A.Yu., Chepurin P.I. Ustroystvo dlya zaryadki akkumulyatornoy batarei [The device for charging the rechargeable battery]. Patent RF 2530877. Published 2014, Bull. No. 29.
19. Gerasimov V.A., Filozhenko A.Yu. Ustroystvo dlya zaryadki akkumulyatornoy batarei podvodnogo ob'ekta [The device for charging the battery of an underwater object]. Patent RF 2602078. Published 2016, Bull. No. 31.
20. Metallized Polypropylene Film Capacitors, «Ай-Си Контракт» ["IC Contract"]. Available at: http://www.ic-contract.ru/images/pdf/TDK/МКР_B32656S.pdf (Accessed 24 March 2016).

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

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. лабораторией энергетики подводных робототехнических комплексов.

Филоженко Алексей Юрьевич – e-mail: filozhenko_a@mail.ru; тел.: 89140678041; лаборатория энергетики подводных робототехнических комплексов; к.т.н.; с.н.с.

Красковский Михаил Владимирович – Дальневосточный федеральный университет (ДФУ); e-mail: mikhail51289@yandex.ru; 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 8; тел.: 89502937111; аспирант.

Gerasimov Vladimir Aleksandrovich – Institute Marine Technological Problems (IMPT FEBRAS); e-mail: fobos_v@mail.ru; 5a, Sukhanova street, Vladivostok, 690091, Russia; phone: +79025223824; cand. of eng sc.; professor; head of the energy underwater robotic systems laboratory.

Filozhenko Aleksey Yurievich – e-mail: filozhenko_a@mail.ru; phone: +79140678041; laboratory of the energy underwater robotic systems; cand. of eng. sc.; senior researcher.

Kraskovskiy Mikhail Vladimirovich – Far Eastern Federal University (FEFU); e-mail: mikhail51289@yandex.ru; 8, Sukhanova street, Vladivostok, 690091, Russia; phone: +79502937111; postgraduate student.