

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

Кувшинов Геннадий Евграфович – e-mail: kuvsh@marine.febras.ru; д.т.н.; профессор.

Gerasimov Vladimir Aleksandrovich – Institute Marine Technological Problems (IMPT) FEBRAS; e-mail: fobos_v@mail.ru; 5A, Sukhanova street, Vladivostok, 690091, Russia; phone: +79140716030; cand. of eng. sc.; professor.

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

Kuvshinov Gennadiy Evgrafovich – e-mail: kuvsh@marine.febras.ru; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 621.31

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

АВТОНОМНЫЙ ИНВЕРТОР НАПРЯЖЕНИЯ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ РЕЗОНАНСНЫМ КОНТУРОМ

Рассматриваются вопросы, связанные с зарядкой аккумуляторных батарей автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) в подводном положении без подъема его на борт судна-носителя. Показана актуальность использования для процесса зарядки батарей бесконтактного способа передачи электроэнергии на аппарат. Особую значимость подобное решение приобретает при организации инфраструктуры энергообеспечения длительного подводного базирования АНПА. Приведена структура и определены функционально необходимые элементы системы бесконтактной передачи электроэнергии в виде автономного инвертора напряжения и высокочастотного трансформатора с раздельными первичной и вторичной частями. При размещении первичной части трансформатора на базе, а вторичной части на АНПА, процесс передачи электроэнергии осуществляется при совмещении контактных поверхностей частей трансформатора. Отмечена особенность использования этого способа, связанная с наличием конструктивного немагнитного зазора между первичной и вторичной обмотками трансформатора, что обуславливает низкий коэффициент магнитной связи и повышенные значения тока намагничивания трансформатора и выходного тока питающего автономного инвертора. Исследования посвящены проблеме снижения тока и уменьшению тепловых потерь на силовых ключах при сохранении уровня передаваемой энергии. Описан патентованный способ разгрузки силовых ключей автономного инвертора за счет включения резонансной индуктивно-емкостной цепи на его выходе. Проведен анализ функциональных связей между параметрами системы бесконтактной передачи энергии для исходного варианта и для случая применения резонансной цепи. Достоверность полученных результатов определяется сочетанием экспериментальных исследований, теоретических расчетов и математического моделирования системы. На численном примере показано, что предложенное техническое решение для токовой разгрузки силовых ключей позволяет уменьшить выходной ток автономного инвертора более, чем в три раза при сохранении уровня передаваемой мощности.

Бесконтактная передача электроэнергии; автономный подводный объект; высокочастотный трансформатор; автономный инвертор напряжения; последовательный резонансный контур; разгрузка силовых ключей.

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

AUTONOMOUS VOLTAGE INVERTER WITH SERIES RESONANT CIRCUIT

Are considered the problems associated with charging storage batteries of autonomous underwater vehicle (AUV) in a submerged position without lifting it on board a carrier vessel. It is shown of relevance the use to the process of charging the battery of non-contact method of power

transmission to the vehicle. Of particular significance such a decision acquire in the organization of the infrastructure of power supply longest underwater based AUV. It is shown the structure and defined functionally necessary elements of a contactless power transmission system in the form of a stand-alone inverter voltage and high-frequency transformer with separate primary and secondary parts. When placing the primary part of the transformer at the base, and the secondary part to the AUV, transmission electrical energy process is carried out by combining the contact surfaces of the parts of the transformer. It is noted a feature of the use of this method associated with the presence of constructive non-magnetic gap between the primary and secondary windings of the transformer, which leads to a low coefficient of magnetic coupling and high values magnetizing current of transformer and the output current supply autonomous inverter. Studies devoted to the problem of reducing current and reduce heat loss in power switches, while maintaining the level of the transmitted energy. Is described patented method of unloading autonomous inverter power switches by incorporating inductive-capacitive resonant circuit at its output. The analysis of the functional relationships between the parameters of the contactless power transmission system for the original version and in the case of the use of the resonant circuit. The reliability of the results is determined by a combination of experimental studies, theoretical calculations and mathematical modeling system. In the numerical example shown, that the proposed technical solution for current discharge transistors autonomous inverter voltage allow to reduce the output current more than three times, while maintaining the transmit power level.

Non-contact power transmission; autonomous underwater object; high frequency transformer; autonomous voltage inverter; series resonant circuit; unloading power switches.

Введение. Передача электрической энергии на борт автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА), в общем случае, может быть осуществлена одним из следующих способов [1]:

- ◆ с помощью контактных соединителей;
- ◆ генераторным методом, заключающимся в использовании маршевых двигателей аппарата в генераторном режиме и приводимым во вращение от специальных механизмов судна носителя;
- ◆ посредством бесконтактной передачи, за счёт использования индукционной связи между разнесёнными первичной и вторичной частями (катушками) высокочастотного трансформатора (ВЧТ).

Передача электроэнергии контактным способом требует дополнительной изоляции электрических соединителей от морской воды, что усложняет конструкцию устройства и надёжность. Для передачи электроэнергии бесконтактным способом требуется применение дополнительных преобразователей, которые усложняют конструкцию в целом, однако в условиях необходимости выполнения автоматической зарядки аккумуляторных батарей под водой без подъема аппарата на борт судна-носителя или при его базировании на донной причальной станции такой способ имеет очевидные преимущества [2, 3].

Для осуществления процесса передачи электроэнергии должны быть совмещены контактные поверхности первичной и вторичной частей ВЧТ, что достигается заданным позиционированием аппарата относительно причального устройства. При этом магнитная связь между катушками ВЧТ и, соответственно, уровень передаваемой энергии будут максимальными при точном совмещении контактных поверхностей [4]. Однако система передачи энергии может оставаться в рабочем режиме и при достаточно больших погрешностях встыковке при соответствующем снижении эффективности процесса передачи. Это приводит к увеличению времени зарядки батарей аппарата, но сохраняет принципиальную работоспособность устройства. Данное свойство в некоторых случаях обладает наивысшим приоритетом.

Функциональная схема системы бесконтактной передачи электроэнергии на АНПА представлена на рис. 1.

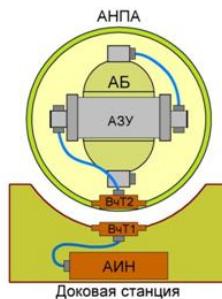


Рис. 1. Функциональная схема системы электроснабжения АНПА с бесконтактной передачей энергии

Составными элементами схемы являются: аккумуляторная батарея (АБ), автоматическое зарядное устройство (АЗУ), высокочастотный трансформатор (ВЧТ) с разделёнными первичной (ВЧТ1) и вторичной (ВЧТ2) обмотками и автономный инвертор напряжения [3].

Представление о соотношениях габаритов элементов системы и значения передаваемой мощности дает рис. 2, где показаны один из вариантов конструктивного исполнения ВЧТ и прочного контейнера с автономным инвертором напряжения. При диаметре корпусов частей трансформатора 100 мм и габаритах контейнера АИН 500x150 мм, передаваемая мощность достигает порядка 0,5 кВт. Увеличение мощности легко обеспечивается увеличением числа ВЧТ, обмотки которых включаются последовательно или параллельно в зависимости от заданных электрических параметров передаваемой электроэнергии. При этом габариты АИН могут остаться неизменными или возрасти незначительно.

Автономный инвертор напряжения. Надёжность импульсных преобразователей, к которым относится АИН, зависит от обеспечения защиты от перенапряжений, уровень которых, в свою очередь, зависит от паразитных индуктивностей монтажа, а также частоты переключений. При проектировании инвертора необходимо придерживаться определённых правил [5].



Рис. 2. Элементы системы бесконтактного заряда: а – высокочастотный трансформатор; б – герметичный контейнер

Другой не менее важной задачей является определение типа снабберных цепей инвертора и их параметров. Для работы АИН в каждой стойки моста применяются драйверы управления его электронными ключами (транзисторами). Драйвер должен формировать необходимый интервал, известный как «мёртвое время», во избежание короткого замыкания одной из стоек моста. Варианты гальванической развязки драйвера и ключа инвертора могут быть различны, например, это может быть буферная схема управления, импульсный трансформатор или оптическое разделение изолированных каналов для верхнего и нижнего плеч каждой стойки инвертора

[5, 6]. Общее требование, предъявляемое к любому из этих методов, заключается в обеспечении смещения уровня управления верхними ключами стоек моста. Поскольку возможны варианты работы автономного инвертора в несимметричном режиме с переменным коэффициентом заполнения импульсов управления его силовыми ключами, то предпочтительным является вариант оптического разделения изолированных каналов для верхнего и нижнего плеч каждой его стойки [2]. Упрощенная функциональная схема включения АИН представлена на рис. 3.

Питание от источника постоянного напряжения E поступает на АИН, состоящий из транзисторов $VT1-VT4$ и включённых встречно-параллельно диодов $VD1-VD4$. На входе инвертора включен входной конденсатор C_{IN} , который необходим для замыкания коммутационных выбросов напряжения. На выходе инвертора включен трансформатор TU , состоящий из первичной (W_1) и вторичной (W_2) обмоток. К вторичной обмотке W_2 трансформатора TU подключен выпрямитель UZ и выходной фильтрующий конденсатор C_{OUT} [6].

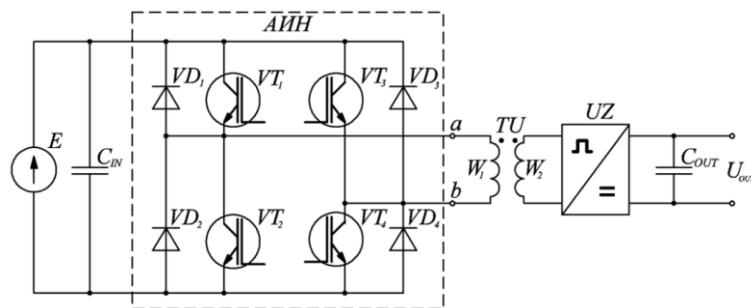


Рис. 3. Электрическая функциональная схема включения АИН

Передача энергии в таком устройстве осуществляется за счет индукционной связи между обмотками трансформатора. Для максимальной передачи электроэнергии бесконтактным способом первичная и вторичная обмотки трансформатора должны располагаться друг относительно друга на минимальном расстоянии и, кроме того, соосно. В этом случае коэффициент k связи между обмотками трансформатора будет максимально возможным. Поскольку передача электроэнергии осуществляется через немагнитный зазор, определяемый толщиной контактных стенок корпуса трансформатора, ток первичной обмотки трансформатора будет повышенным за счет увеличенного тока намагничивающего контура. Коэффициент k между первичной (W_1) и вторичной (W_2) обмотками определится как:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}, \quad (1)$$

где M – взаимная индуктивность между первичной и вторичной обмотками трансформатора, L_1 и L_2 – соответственно индуктивности первичной и вторичной обмоток.

Выходное напряжение инвертора представляет собой последовательность прямоугольных биполярных импульсов, которая через выпрямитель UZ заряжает выходной конденсатор C_{OUT} . Для удобства анализа работы системы и снятия внешних характеристик этот конденсатор можно заменить источником напряжения постоянного тока.

Если пренебречь падениями напряжений в транзисторах и диодах, то форма и амплитудные значения токов первичной и вторичной обмоток трансформатора определяются формой выходного напряжения инвертора и двумя индуктивностями. Первая из них – это индуктивность L_{IK} первичной обмотки при замкнутой нако-

ротко вторичной обмотке трансформатора. Индуктивность L_{IK} можно определить с помощью метода ненаправленных графов применительно к схеме замещения трансформатора, представленную на рис. 4 [7, 8].

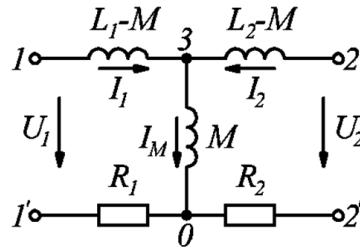


Рис. 4. Т-образная схема замещения трансформатора

Такая схема замещения напоминает собой классический вариант, но в отличие от него в ней нет необходимости в приведении параметров цепи первичной обмотки к вторичной (или наоборот). Т-образная схема замещения трансформатора обеспечивает магнитную развязку и становится гальванически связанный, так как концы обеих обмоток трансформатора подключены к общему узлу 0. Одна из индуктивностей имеет отрицательное значение: у понижающего трансформатора ($n_{21} < 1$) отрицательна индуктивность L_2-M , а у повышающего ($n_{21} > 1$) отрицательна индуктивность L_1-M [4, 7, 8].

Индуктивность L_{IK} определяется как

$$L_{IK} = L_1 - \frac{M^2}{L_2}. \quad (2)$$

Вторая индуктивность L_{12} определяет ток короткозамкнутой вторичной обмотки трансформатора при подведении напряжения к первичной (или наоборот). Эту индуктивность можно также определить по схеме на рисунке 4 с помощью метода ненаправленных графов [4, 7, 8].

$$L_{12} = \frac{L_1 L_2}{M} - M. \quad (3)$$

Форма токов i_{1K} и i_{2K} первичной и вторичной обмоток трансформатора при коротком замыкании вторичной обмотки представляет собой периодическую последовательность трапециoidalных биполярных импульсов. Модули производных этих токов для боковых сторон биполярных импульсов определяются как

$$\frac{di_{1K}}{dt} = \frac{U}{L_{IK}}; \quad \frac{di_{2K}}{dt} = \frac{U}{L_{12}}. \quad (4)$$

Амплитудные значения этих токов при коротком замыкании вторичной обмотки трансформатора определяются по выражениям:

$$I_{1KA} = \frac{di_{1K}}{dt} \left(\frac{T}{4} - \frac{T_{DZ}}{2} \right); \quad I_{2KA} = \frac{di_{2K}}{dt} \left(\frac{T}{4} - \frac{T_{DZ}}{2} \right). \quad (5)$$

Заключение о количественных характеристиках системы энергообеспечения АНПА можно выполнить на основании расчёта. В качестве исходных данных, для которого были приняты параметры из проведённого натурного эксперимента. Использование этих же параметров в расчёте позволяет сравнить его результаты с натурным экспериментом и моделированием.

Таблица 1
Исходные данные для расчёта

Наименование	Численные данные
Напряжение источника, U , В	300
Частота выходного напряжения инвертора, f , кГц	12,5
«Мёртвое время», T_{DZ} , мкс	1
Взаимная индуктивность между обмотками трансформатора, M , мГн	21,3
Индуктивность первичной обмотки трансформатора, L_1 , мГн	58,4
Активное сопротивление первичной обмотки трансформатора, R_1 , мОм	20
Индуктивность вторичной обмотки трансформатора, L_2 , мГн	18,2
Активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора, R_2 , мОм	5
Коэффициент связи между обмотками, k	0,65

По формулам (5) получены следующие значения токов при коротком замыкании вторичной обмотки трансформатора $I_{1KA} = 174,8$ А и $I_{2KA} = 204,5$ А, которые совпадают с полученными при проведении эксперимента значениями: $I_{1KA\text{Э}} = 174,8$ А и $I_{2KA\text{Э}} = 204,1$ А. Анализ полученных результатов показал, что ток, протекающий через первичную обмотку трансформатора, а значит и через силовые ключи инвертора, повышенный за счёт намагничивающего тока трансформатора.

Одним из способов разгрузки силовых ключей мостового инвертора является включение резонансного контура на его выходе [9–14]. Кроме того, существует полумостовая схема включения инвертора с последовательным резонансным контуром и выходным выпрямителем [15].

Вид и параметры резонансного контура можно определить на основании следующих рассуждений.

Моменты перехода токов через нулевое значение соответствует серединам биполярных импульсов выходного напряжения инвертора. Следовательно, первая гармоника тока i_1 отстает от первой гармоники напряжения инвертора на угол $\pi/2$, как у индуктивного элемента. Можно уменьшить первую гармонику тока, если скомпенсировать её часть с помощью цепи, которая включается параллельно первичной обмотки трансформатора и на частоте первой гармоники обладает свойством ёмкостного элемента. Использовать в качестве такой цепи конденсатор нельзя, так как крутые фронты выходного напряжения инвертора вызовут появление чрезмерных по амплитуде импульсов токов компенсирующего конденсатора и инвертора. Для разрешения этой проблемы, авторами статьи было предложено в качестве компенсирующей цепи применить последовательный резонансный контур, состоящий из катушки индуктивности и конденсатора, который подключается между зажимами первичной обмотки трансформатора к точкам a и b , которые показаны на рис. 3 [16].

Наличие резонансного контура практически не влияет на форму и значения токов первичной и вторичной обмоток трансформатора. По известным формулам можно определить индуктивность реактора и ёмкость конденсатора последовательного резонансного контура, имея в виду, что отношение частоты автономного инвертора f к резонансной частоте f_0 : $m = f/f_0$, например, можно принять равным 1,25.

$$L_{RC} = \frac{L_{AVG}}{m^2 - 1}; \quad C_{RC} = \frac{m^2 - 1}{(2\pi m f)^2 L_{AVG}}, \quad (6)$$

где L_{AVG} – среднее значение входной индуктивности трансформатора

$$L_{AVG} = 2 \frac{L_1 L_{1k}}{L_1 + L_{1k}}. \quad (7)$$

По формулам (6) определяются следующие значения параметров резонансного контура для режима короткого замыкания $L_{RC} = 75,7$ мкГн, $C_{RC} = 1,37$ мкФ.

Ток инвертора равен сумме токов первичной обмотки трансформатора и резонансного контура. Найденные действующие значения токов для режима короткого замыкания: первичной обмотки $I_{1R} = 103$ А, инвертора $I_{VCR} = 38,8$ А, резонансного контура $I_{REZR} = 80,2$ А. А также средние по модулю значения токов: первичной обмотки $I_{1A} = 90$ А, инвертора $I_{VCA} = 29,8$ А, резонансного контура $I_{REZA} = 73,4$ А. Следовательно, применение резонансного контура позволило снизить среднее по модулю значение тока инвертора в 3 раза, а действующее значение этого тока в 2,7 раза.

Рассмотрим также режим холостого хода, который возникает после окончания заряда выходного конденсатора C_{OUT} при отключённой от него цепи нагрузки. Форма напряжения вторичной обмотки такая же, как и у напряжения первичной обмотки. Но амплитуда импульсов другая

$$U_{2A} = U \frac{M}{L_1}. \quad (8)$$

У понижающего трансформатора это значение меньше амплитудного напряжения первичной обмотки. Для рассматриваемого примера $U_{2A} = 109$ В.

По результатам схемотехнического моделирования в программе Micro-Cap [17] были найдены следующие значения токов инвертора и трансформатора: $I_{VCA} = 25,8$ А (среднее значение по модулю), $I_{VCR} = 32,2$ А (действующее значение); $I_{1A} = 51$ А (среднее значение по модулю), $I_{1R} = 59$ А (действующее значение). Применение резонансного контура позволило в режиме холостого хода снизить среднее по модулю значение тока инвертора в 3,5 раза, а действующее значение тока в 3,2 раза.

Моделирование системы передачи электроэнергии. Для более глубокого анализа системы бесконтактной передачи электроэнергии было проведено компьютерное моделирование, проведённое в программе MATLAB приложении Simulink, позволило провести дополнительный анализ её характеристик. Общая схема модели и схемы модели отдельных блоков, входящих в структуру передачи электроэнергии, представлены на рисунке 5.

Схема модели (рис. 5,а) соответствует принятой структурной схеме передачи электроэнергии АНПА. В эту схему входит источник постоянного напряжения (Source), автономный инвертор напряжения (Invertor), высокочастотный трансформатор с последовательным резонансным LC -контуром, который подключен параллельно его первичной обмотке (LCT), выпрямитель напряжения (Rect) и нагрузка (Load).

На рис. 5,б представлена схема модели источника напряжения постоянного тока. При моделировании источника напряжения были учтены его индуктивное и активное сопротивления ($L0$). Конденсатор C_{IN} является фильтрующим входным конденсатором автономного инвертора, диод (Diode), входящий в состав источника, необходим для предотвращения разряда входного конденсатора C_{IN} .

Схема модели блока нагрузки показана на рис. 5,в. Составными элементами этой схемы являются резистор Rn , учитывающий сопротивление проводов, выходной конденсатор выпрямителя C_{OUT} , источник напряжения (Voltage), а также активное и индуктивное сопротивления, обозначенные как $R0$, учитывающие паразитную индуктивность проводов. Источник напряжения (Voltage) представляет собой противоЭДС, который управляется с помощью блока *Uload*. Такая структура построения модели необходима для того, чтобы снять внешнюю характеристику зависимости $U_H=f(I_H)$, представленную на рисунке 7 (сплошные линии).

Модель АИН (рис. 5,г) составлена из дискретных элементов библиотеки приложения MATLAB SPS, собранных по мостовой схеме включения. Каждое плечо представлено транзисторами и включёнными параллельно им диодами. Кроме того, в схеме имеется блок формирования импульсов (БФУ) управления затворами транзисторов (PWR2). БФУ формирует импульсы управления с коэффициентом заполнения близким к единице, но отличающимся, как уже было упомянуто, на некоторое значение, известное как «мёртвое время».

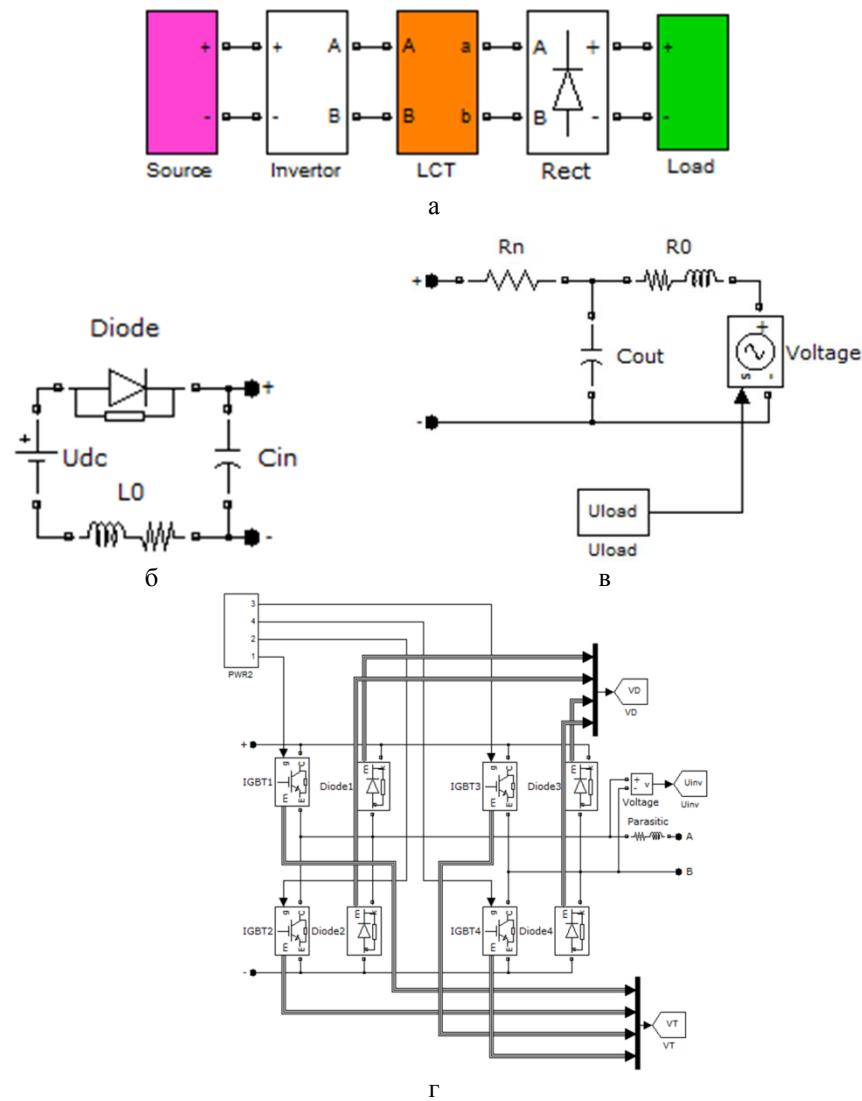


Рис. 5. Моделирование передачи электроэнергии в программе Simulink MATLAB:
а – модель принятой структуры передачи электроэнергии, б – модель источника постоянного напряжения, в – модель блока нагрузки, г – модель автономного инвертора напряжения

Индуктивное и активное сопротивление (Parasitic) моделируют паразитные индуктивности и омическое сопротивления входного конденсатора C_{in} и транзисторов АИН. Результаты моделирования представлены на рис. 6 и 7.

Эксперимент. Эксперимент проводился для подтверждения результатов расчёта и моделирования. Макетной стенд, структура которого соответствует принятой функциональной схеме (рисунок 1), состоит из: автономного инвертора, который представлен двумя полумостовыми стойками фирмы «Электрум АВ» М12-200-12 [18], управление этими стойками осуществлялось модулями драйвера МД280П-Б [18]; быстродействующего выпрямителя напряжения, собранного на диодах Шотки, который соответствует блоку Rect в схеме модели, был представлен модулем М5Ш-120-2 фирмы «Электрум АВ». Кроме того, для измерения токов на повышенной частоте были использованы датчики Холла компании LEM LAH50-P [19] и LA 100-P/SP13 [20]. На рисунке 6 сплошными линиями показаны внешние характеристики моделирования и точки, отмеченные маркерами, снятые в результате эксперимента.

Из результатов эксперимента следует, что при введении последовательного резонансного контура, включённого параллельно первичной обмотке трансформатора, внешняя характеристика остается практически неизменной. Вместе с тем, по результатам эксперимента из построения характеристик зависимости тока инвертора $I_{ИИВ}$ от тока нагрузки I_H (рис. 7) следует, что ток, протекающий через транзисторные ключи и диоды АИН, снизился примерно в три раза, пропорционально этому току, снизились и потери, выделяемые в виде тепла.

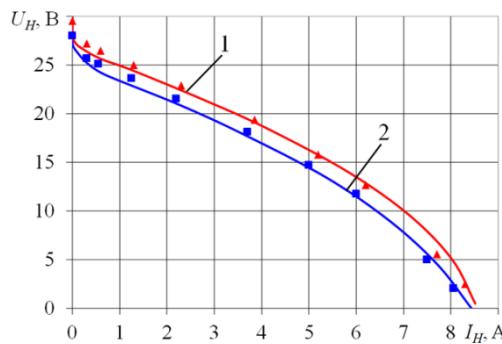


Рис. 6. Внешние характеристики системы бесконтактной передачи электроэнергии (сплошные линии – моделирование, маркеры – эксперимент):
1 – без применения резонансного контура, 2 – с применением резонансного контура

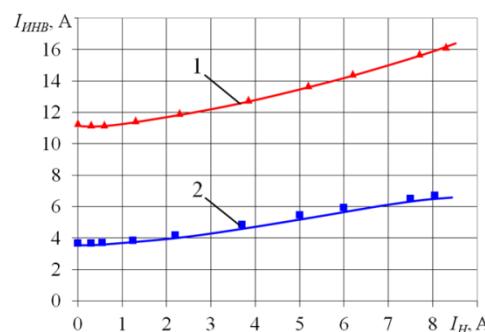


Рис. 7. Зависимость тока инвертора $I_{ИИВ}$ от тока нагрузки I_H системы бесконтактной передачи электроэнергии (сплошные линии – моделирование, маркеры – эксперимент): 1 – без применения резонансного контура, 2 – с применением резонансного контура

Заключение. Исследования в статье показали, что одним из вариантов разгрузки силовых ключей автономного инвертора напряжения является включение на его выходе последовательного резонансного контура. Такое решение позволило снизить ток силовых ключей инвертора, при сохранении передаваемой мощности, примерно в три раза. Кроме того, появилась возможность выбрать транзисторы и диоды с меньшими допустимыми значениями токов, что, в свою очередь, способствует уменьшению их массогабаритных и стоимостных показателей.

На приведённое техническое решение разгрузке по току транзисторов и диодов инвертора авторами получен патент.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Илларионов Г.Ю., Сиденко К.С., Бочаров Л.Ю. Угроза из глубины: ХХI век. – Хабаровск: КГУП «Хабаровская краевая типография», 2011. – 304 с.
2. Герасимов В.А., Кувшинов Г.Е., Филоженко А.Ю., Чепурин П.И. Исследование режимов работы системы энергообеспечения автономного необитаемого подводного аппарата с бесконтактной передачей электроэнергии // Подводные исследования и робототехника. – 2013. – № 2. – С. 24-32.
3. 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.
4. Герасимов В.А., Копылов В.В., Кувшинов Г.Е., Наумов Л.А., Себто Ю.Г., Филоженко А.Ю., Чепурин П.И. Математическая модель устройства для бесконтактной передачи электроэнергии на подводный объект // Подводные исследования и робототехника. – 2012. – № 2. – С. 28-33.
5. Колпаков А.И. Проблемы проектирования IGBT-инверторов: перенапряжения и снаббера // Компоненты и технологии. – 2008. – № 5.
6. Mohan N., Undeland T.M., Robbins W.P. Power electronics. Converters, Applications, and Design. USA, Hoboken: John Wiley & Sons Ltd, 2003. – 802 р.
7. 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.
8. Электротехника. В 3-х кн. Кн. I. Теория электрических и магнитных цепей. Электрические измерения / под ред. П.А. Бутырина, Р.Х. Гафиятуллина, А.Л. Шестакова. – Челябинск. Изд-во ЮУрГУ, 2003. – 505 с.
9. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.
10. Горский О.В. Исследование базовой модели индуктивно связанных контуров бесконтактного зарядного устройства имплантируемых систем. [Информационно-управляющие системы, 2013]. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-bazovoye-modeli-induktivno-svyazannyh-konturov-beskontaktnogo-zaryadnogo-ustroystva-implantiruemyh-sistem> (дата обращения 25.02.2016).
11. Yan Lu, K.W. Eric Cheng, S.L. Ho. Quasi current mode control for the phase-shifted series resonant converter. [Transactions on Power Electronics, 2009]. URL: http://ira.lib.polyu.edu.hk/bitstream/10397/871/1/phase-shifted-series_08.pdf (дата обращения 25.02.2016).
12. Artur J. Moradewicz, Marian P. Kazmierkowski. FPGA based control of series resonant converter for contactless power supply [Conference 2008]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/224350054> (дата обращения 25.02.2016).
13. Stanimir Valtchev. Resonant power converters in contactless energy transfer: electric vehicle and renewable energy processing. [Conference, 2015]. URL: <http://elar.urfu.ru/bitstream/10995/35311/1/epp-2015-46.pdf> (дата обращения 25.02.2016).
14. Stanimir Valtchev, Beatriz Borges, Kostadin Branskiy, Ben Klaasens. Resonant contactless energy transfer with improved efficiency. [Transactions on Power Electronics, 2009]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/224400488> (дата обращения 25.02.2016).
15. Ying-Chun Chuang, Yu-Lung Ke, Hung-Shiang Chung, Hung-Kun Chen. Implementation and analysis of an improved series-loaded resonant DC-DC converter operating above resonance for battery charges [Conference, 2008]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/4366130> (дата обращения 25.02.2016).

16. Патент RU 2558681, H20M7/797. 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. 2015, бюл. № 22.
17. Амелина М.А., Амелин С.А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 464 с.
18. Электрум AB. Каталог. URL: <http://electrum-av.com/images/ststii/katalog.pdf> (дата обращения 25.02.2016).
19. Datasheet LEM LAH 50-P. [3 pages]. <http://www.sensorica.ru/pdf/lah50-p.pdf> (дата обращения 25.02.2016).
20. Datasheet LEM LA 100-P/SP13. [3 pages]. URL: <http://www.lem.com/docs/products/la%20100-p%20sp13%20e.pdf> (дата обращения 25.02.2016).

REFERENCES

1. Illarionov G.Yu., Sidenko K.S., Bocharov L.Yu. Ugroza iz glubiny: XXI vek [Dear reader: twenty-first century]. Khabarovsk: KGUP «Khabarovskaya kraevaya tipografiya», 2011, 304 p.
2. Gerasimov V.A., Kuvshinov G.E., Filozhenko A.Yu., Chepurin P.I. Issledovanie rezhimov raboty sistemy energoobespecheniya avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata s beskontaktnoy peredachey elektroenergii [Research of operation modes of the power supply system of Autonomous underwater vehicle with contactless electric power transmission], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Researches and Robotics], 2013, No. 2, pp. 24-32.
3. Gerasimov V.A., Filozhenko A.Yu., Chepurin P.I. Struktura sistemy elektrosnabzheniya avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata [Structure of the system noncontact energy issue of the autonomous undersea device], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 3 (140), pp. 47-55.
4. Gerasimov V.A., Kopylov V.V., Kuvshinov G.E., Naumov L.A., Sebto Yu.G., Filozhenko A.Yu., Chepurin P.I. Matematicheskaya model' ustroystva dlya beskontaktnoy peredachi elektroenergii na podvodnyy ob'ekt [A mathematical model of the device for contactless power transmission for underwater object], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Researches and Robotics], 2012, No. 2, pp. 28-33.
5. Kolpakov A.I. Problemy proektirovaniya IGBT-invertorov: perenapryazheniya i snabbery [The problem of designing an IGBT inverter: overvoltage and snobbery], *Komponenty i tekhnologii* [Components and Technologies], 2008, No. 5.
6. Mohan N., Undeland T.M., Robbins W.P. Power electronics. Converters, Applications, and Design. USA, Hoboken: John Wiley & Sons Ltd, 2003, 802 p.
7. Gerasimova G.N., Kuvshinov G.E., Naumov L.A., Usol'tsev V.K. Topologicheskie metody analiza v elekrotekhnike i avtomatike: uchebnoe posobie dlya vuzov [Topological methods of analysis in electrical engineering and automation: textbook for universities]. Vladivostok: Dal'nauka, 2001, 232 p.
8. Elekrotekhnika [Electrical engineering]. In 3 book. Book 1. Teoriya elektricheskikh i magnitnykh tsepey. Elektricheskie izmereniya [The theory of electric and magnetic circuits. Electric-cal measurement], ed. by P.A. Butyrina, R.Kh. Gafiyatullina, A.L. Shestakova. Chelyabinsk: Izd-vo YuUrGU, 2003, 505 p.
9. Meleshin V.I. Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika [Transistor conversion equipment]. Moscow: Tekhnosfera, 2006, 632 p.
10. Gorskiy O.V. Issledovanie bazovoy modeli induktivno svyazannykh konturov beskontaktnogo zaryadnogo ustroystva implantiruemых system [Study the basic model of inductively coupled circuits of the contactless charger of implantable systems]. [Informatsionno-upravlyayushchie sistemy, 2013]. Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-bazovoy-modeli-induktivno-svyazannyh-konturov-beskontaktnogo-zaryadnogo-ustroystva-implantiruemyh-sistem> (accessed 25 February 2016).
11. Yan Lu, K.W. Eric Cheng, S.L. Ho. Quasi current mode control for the phase-shifted series resonant converter. [Transactions on Power Electronics, 2009]. Available at: http://ira.lib.polyu.edu.hk/bitstream/10397/871/1/phase-shifted-series_08.pdf (accessed 25 February 2016).

12. *Artur J. Moradewicz, Marian P. Kazmierkowski*. FPGA based control of series resonant converter for contactless power supply [Conference 2008]. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/224350054> (accessed 25 February 2016).
13. *Stanimir Valtchev, Beatriz Borges, Kostadin Brandskiy, Ben Klaasens*. Resonant contactless energy transfer with improved efficiency. [Transactions on Power Electronics, 2009]. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/224400488> (accessed 25 February 2016).
14. *Stanimir Valtchev, Beatriz Borges, Kostadin Brandskiy, Ben Klaasens*. Resonant contactless energy transfer with improved efficiency. [Transactions on Power Electronics, 2009]. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/224400488> (accessed 25 February 2016).
15. *Ying-Chun Chuang, Yu-Lung Ke, Hung-Shiang Chung, Hung-Kun Chen*. Implementation and analysis of an improved series-loaded resonant DC-DC converter operating above resonance for battery charges [Conference, 2008]. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/4366130> (accessed 25 February 2016).
16. *Kuvshinov G.E., Naumov L.A., Sebto 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 mezhdu ego obmotkami [Stand-alone inverter voltage to power the load through a transformer with a low coupling coefficient between windings]. Patent RU 2558681, H20M7/797. 2015, bul. No. 22.
17. *Amelina M.A., Amelin S.A.* Programma skhemotekhnicheskogo modelirovaniya Micro-Cap 8 [The circuit simulation program Micro-Cap 8]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2007, 464 p.
18. *Elektrum AV*. Katalog [Directory]. Available at: <http://electrum-av.com/images/ststii/katalog.pdf> (accessed 25 February 2016).
19. Datasheet LEM LAH 50-P. [3 pages]. Available at: <http://www.sensorica.ru/pdf/leh50-p.pdf> (accessed 25 February 2016).
20. Datasheet LEM LA 100-P/SP13. [3 pages]. Available at: URL: <http://www.lem.com/docs/products/la%20100-p%20sp13%20e.pdf> (accessed 25 February 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.: 89140716030; к.т.н.; профессор..

Филоженко Алексей Юрьевич – e-mail: filozhenko_a@mail.ru; к.т.н.

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

Gerasimov Vladimir Aleksandrovich – Institute Marine Technological Problems (IMPT) FEBRAS; e-mail: fobos_v@mail.ru; 5A, Sukhanova street, Vladivostok, 690091, Russia; phone: +79140716030; cand. of eng. sc.; professor.

Filozhenko Aleksey Yurevich – e-mail: filozhenko_a@mail.ru; cand. of eng. sc.

Kraskovskiy Mikhail Vladimirovich – Far Eastern Federal University (FEFU); e-mail: mikhail51289@yandex.ru; 8, Sukhanov street, Vldivostok, Russia; postgraduate student.