

АВТОНОМНЫЕ ИНВЕРТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРООБЕСПЕЧЕНИЯ ПОДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

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

Снижение потерь энергии в автономных инверторах напряжения (АИН) и уменьшение тепловых нагрузок на силовые ключи приобретают особую актуальность в системах электрообеспечения подводных объектов. Это объясняется сложностью отвода тепла от силовых элементов, расположенных в прочных корпусах аппарата и имеющих ряд ограничений по компоновке. Применения резонансных цепей с неизменной настройкой ограничено, поскольку процесс бесконтактной передачи энергии сопровождается широким диапазоном изменения нагрузки инвертора, что связано с возможными межосевыми смещениями первичной и вторичной частей трансформатора, а также изменением зазора между этими частями при автоматическом причаливании аппарата к донному причальному устройству. Существенное снижение потерь переключения в инверторе можно получить при сочетании режима мягких переключений с минимизацией тока оппозитных диодов при соответствующем изменении частоты коммутации. Такое свойство реализовано в предлагаемом способе управления. Исследование автономного инвертора напряжения на компьютерной модели подтвердило высокую эффективность предложенного способа формирования сигналов управления инвертором. Потери переключения в инверторе получены уменьшенными в десятки раз по сравнению как с обычным управлением с жесткими переключениями, так и с мягкими переключениями с неизменной настройкой резонансной цепи. Указанное свойство сохраняется в широком диапазоне изменения нагрузки инвертора. Решения, позволяющие снизить потери переключения в системах бесконтактной передачи энергии, будут полезными и в системах энергообеспечения по кабельной линии ТНПА или иных привязанных подводных объектов как способы повышения общей эффективности систем подводной робототехники.

Ключевые слова: энергообеспечение, бесконтактный заряд, кабель-трос, автономный инвертор напряжения, потери переключения, интервалы проводимости, частота коммутации.

Введение

Системы энергообеспечения устройств подводной робототехники являются одними из базовых комплексов, решающих как вопросы передачи электроэнергии по длинной кабельной линии, например, на донные станции или на телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА), так и выполняющих бесконтактную передачу энергии для заряда аккумуляторных батарей автономных обитаемых подводных аппаратов (АНПА). В общем случае подобные системы содержат автономный инвертор напряжения, резонансные цепи, высокочастотный трансформатор для гальванического разделения и согласования параметров первичной и вторичной сторон, а также необходимые преобразующие устройства на вторичной стороне.

Инвертор, имеющий нагрузку в виде первичной обмотки трансформатора (как правило, с резонансными элементами), выполняет преобразование напряжения питания системы в переменное напряжение высокой частоты. В системе бесконтактной передачи энергии трансформатор содержит отдельные первичную и вторичную части с соответствующими обмотками, между которыми существует немагнитный зазор. Кроме этого, возможно также межосевое смещение между обмотками, вызванное ошибкой в совмещении частей трансформатора при автоматическом причаливании АНПА к базе. Это приводит к существенному снижению коэффициента магнитной связи между обмотками, соответствующему увеличению тока намагничивания трансформатора и дополнительной токовой нагрузке силовых ключей инвертора, что создает проблемы отвода тепловых потерь от инвертора [1].

Структура системы бесконтактной передачи энергии с АИН в ее составе приведена на рис. 1, при этом в качестве базы показано донное причальное устройство (ДПУ).

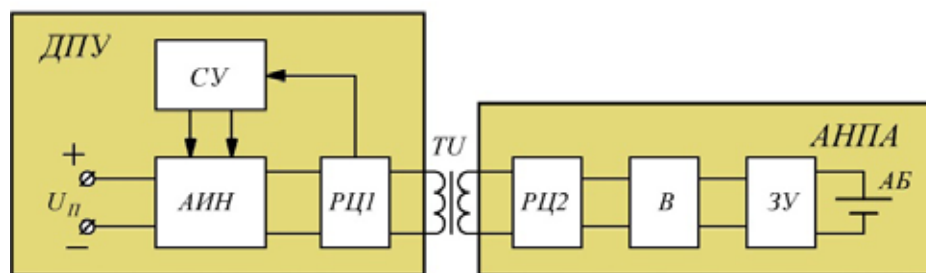


Рис. 1. Структура системы бесконтактной передачи энергии

Основные структурные блоки представлены в виде системы управления СУ, резонансных цепей РЦ1, РЦ2, выпрямителя В и зарядного устройства ЗУ аккумуляторной батареи АБ на борту АНПА. Необходимым звеном такой системы является трансформатор ТУ с отдельными первичной и вторичной частями, при этом первичная часть устанавливается на ДПУ, а вторичная – на АНПА.

Использование АИН в системе энергообеспечения привязного подводного объекта, например ТНПА, можно представить, как показано на рис. 2.

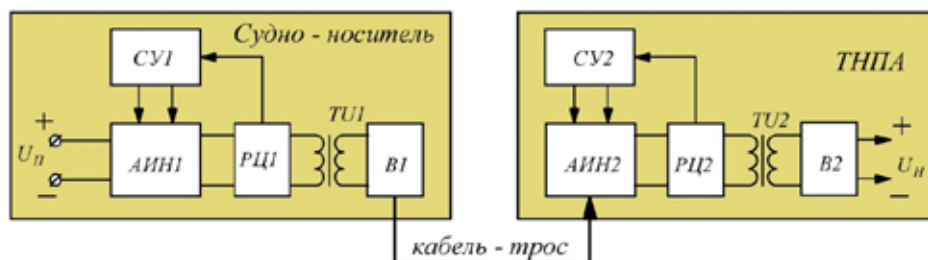


Рис. 2. Структура системы энергообеспечения ТНПА

Структурные блоки, размещенные на судне-носителе, представлены автономным инвертором напряжения АИН1, системой управления СУ1, резонансной цепью РЦ1, согласующим трансформатором ТУ1 и выпрямителем В1. На ТНПА размещены приемный АИН2 с системой управления СУ2, а также резонансная цепь РЦ2, согласующий трансформатор ТУ2 и выпрямитель В2. В случае энергообеспечения подводных устройств по кабельной линии трансформатор системы имеет стандартное исполнение, чему соответствует большой коэффициент магнитной связи и малый ток намагничивания. По этой причине условия работы инвертора здесь облегченные по сравнению с работой в системе бесконтактной передачи энергии, однако потери переключения здесь также ограничивают возможную частоту коммутации инвертора и передаваемую мощность.

Таким образом, уменьшение тепловых потерь в автономных инверторах напряжения и снижение тепловых нагрузок на его силовые транзисторы приобретают повышенную актуальность в системах бесконтактного заряда аккумуляторных батарей АНПА. Это связано с рядом ограничений по компоновке силовых элементов инвертора в прочных корпусах и

соответствующими проблемами отвода тепла. Решения, позволяющие снизить потери переключения в системах бесконтактной передачи энергии, очевидно, будут полезными и в системах энергообеспечения по кабельной линии ТНПА или иных подводных объектов как способы повышения общей эффективности систем подводной робототехники.

■ Цель и задачи работы

Применение в системе бесконтактной передачи электроэнергии (БПЭ) трансформатора с разделяющимися первичной и вторичной частями и, соответственно, наличие немагнитного зазора между обмотками определяет такую особенность трансформатора, как повышенный ток намагничивания. Этот ток имеет реактивный характер и вызывает повышенный нагрев силовых транзисторов и диодов инвертора. Исследования авторов, имеющие целью уменьшение потерь в инверторе, привели к решению в виде резонансной цепи, подключенной на выход АИН параллельно первичной обмотке [2, 3]. Такая цепь представляет собой последовательное соединение индуктивности и емкости и, при выполнении условий резонанса токов на выходе инвертора, компенсирует индуктивную составляющую тока намагничивания и осуществляет токовую разгрузку ключей инвертора.

Результаты математического моделирования, подтвержденные натурным экспериментом, показали, что применение указанной резонансной цепи позволяет снизить действующее значение тока силовых

транзисторов инвертора при сохранении передаваемой активной мощности примерно в 3 раза. Это позволяет выбрать силовые компоненты с меньшими допустимыми значениями токов, что, в свою очередь, способствует уменьшению их массогабаритных показателей и стоимости [4].

Вместе с тем расчеты, подтвержденные натурными экспериментами, показали, что использование указанного решения приводит к уменьшению потерь мощности в инверторе примерно на 20% [5], т.е. соответствующего уменьшения потерь мощности здесь не наблюдается. Причиной такого результата является пилообразная форма тока инвертора, при которой в моменты времени выключения транзисторов ток имеет максимальное значение. Соответственно общие потери в инверторе остаются на высоком уровне за счет потерь переключения, составляющих значительную долю от общих потерь. Наглядную иллюстрацию этого положения дают диаграммы сигналов, полученные при математическом моделировании инвертора с жесткими переключениями, приведенные на рис. 3, где показаны сигналы u_1 , u_2 управления транзисторами полумостового инвертора, выходное напряжение U_H и ток I_H инвертора. В момент переключения ток I_{OFF} транзисторов имеет максимальное значение, что вызывает значительные потери в этом интервале. Интервалы времени T_{VT} и T_{VD} соответствуют проводимостям транзистора и обратного диода транзисторной стойки полумостовой схемы инвертора.

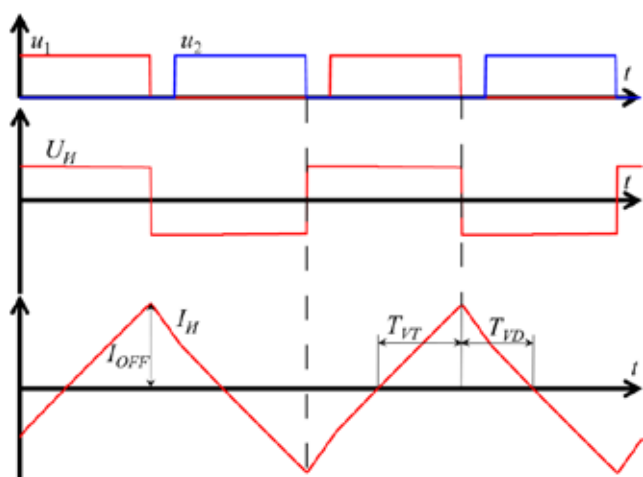


Рис. 3. Диаграммы сигналов инвертора в системе БПЭ с жесткими переключениями

Существенное снижение потерь можно получить при организации режима мягких переключений транзисторов инвертора за счет введения и соответствующей настройки резонансной цепи. Минимальные потери как при включении, так и при выключении транзисторов сохраняются, но в

сравнительно узком диапазоне соотношения между частотой коммутации инвертора и частотой резонанса токов в нагрузке [6, 7]. Кроме того, установленный режим мягких переключений соответствует неизменным параметрам нагрузки. В действительности параметры системы бесконтактной передачи энергии на АНПА подвержены влиянию внешних воздействий, таких как изменение немагнитного зазора и межосевого смещения между обмотками при причаливании АНПА к базе, что вызывает изменение значения и характера нагрузки. По этой причине система, настроенная для работы в одной точке и обладающая минимальными потерями, лишится своих преимуществ за счет влияния указанных факторов.

В несколько меньшей степени подобные свойства сопровождают работу инвертора и в системе энергообеспечения привязных подводных объектов (ППО) по кабельной линии. Для этого случая диаграммы сигналов приведены на рис. 4, где также показаны сигналы u_1 , u_2 управления транзисторами полумостового инвертора и выходное напряжение U_H и ток I_H инвертора. Форма тока I_H для этого случая отличается от тока в системе БПЭ за счет меньшего значения индуктивности рассеяния обмоток трансформатора и соответствующего уменьшенного интервала T_{VD} проводимости обратного диода, но в момент выключения транзистора ток также имеет максимальное значение I_{OFF} .

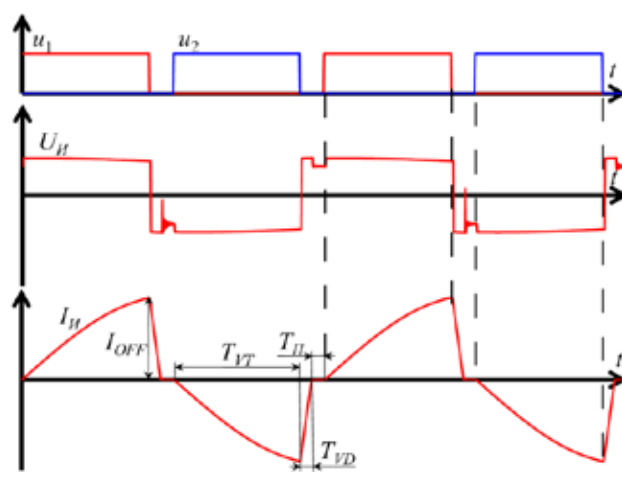


Рис. 4. Диаграммы сигналов инвертора в системе энергообеспечения ППО с жесткими переключениями

Исследования показали, что решение проблемы снижения потерь мощности и обеспечения требуемой высокой эффективности системы может обеспечить структура, в которой должно выполняться измерение мгновенных значений напряжения и тока, связанных с изменением параметров нагрузки. Кроме этого для

обеспечения заданных характеристик системы передачи энергии необходимо изменять частоту управляющих импульсов. Разработка такой структуры и анализ взаимосвязей между энергетическими показателями силовых элементов с целью оптимизации массогабаритных характеристик инвертора является задачей актуальной и ставится в качестве цели исследования.

Попытки решить указанную задачу предприняты в [8, 9], где в предлагаемых структурах системы управления автономным инвертором измеряются моменты перехода мгновенного значения переменного напряжения на нагрузке через нуль и импульсы управления формируют с опережением этих моментов на предварительно заданный угол в определенном диапазоне. Приведенные в работе диаграммы напряжений и токов показывают, что кривая выходного тока инвертора соответствует активной нагрузке и не содержит составляющую тока обратного диода, которая возникает при реактивном характере нагрузки и соответствует разряду накопленной энергии в нагрузку через входной конденсатор при выключении транзистора. Недостатком такой системы управления инвертором является то, что при изменении характера нагрузки как по соотношению между реактивной и активной составляющими, так и по значению модуля полного сопротивления нагрузки формируемый угол опережения импульсов управления будет выходить за пределы требуемого диапазона. Это приведет к повышенным потерям коммутации при переключениях силовых транзисторов инвертора, что, в конечном итоге, повысит их нагрев и снизит надежность работы устройства.

■ Новая система управления АИН

Повышение эффективности и надежности работы инвертора за счет снижения тепловых потерь можно получить при использовании предлагаемой системы управления силовыми транзисторами. Функциональная схема инвертора с системой управления приведена на рис. 5, при этом силовая часть может быть выполнена как полумостом (как показано на рис. 5), так и в виде мостовой схемы. Важным здесь является наличие резонансной цепи РЦ, содержащей индуктивность и конденсатор в одном контуре с нагрузкой, причем мгновенные значения напряжения на конденсаторе U_C используются для реализации предлагаемого алгоритма управления. Кроме того, для этой же цели используются мгновенные значения выходного тока I_H инвертора, измеряемые датчиком тока ДТ. В общем случае нагрузкой инвертора может быть транс-

форматор системы бесконтактной передачи энергии с соответствующим конструктивным немагнитным зазором или трансформатор без магнитного зазора, а также, например, катушка индукционного нагревателя или активная нагрузка. При этом резонансная цепь РЦ может быть выполнена с различными вариантами соединения резонансных индуктивностей и конденсаторов (последовательно, параллельно, Г-образной схемой и т.д.) [7, 10, 11].

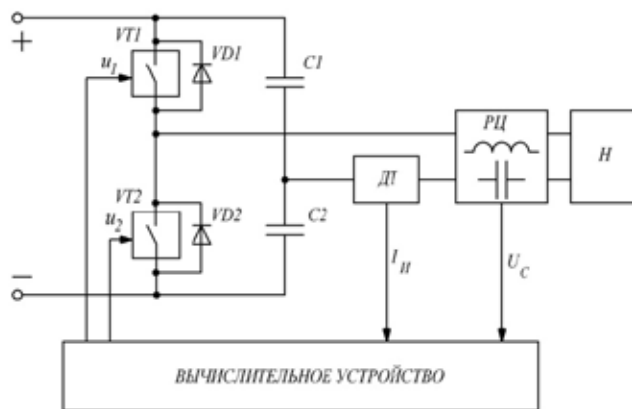


Рис. 5. Функциональная схема автономного резонансного инвертора

Для реализации предлагаемого алгоритма управления в вычислительном устройстве по результатам измерения напряжения U_C на резонансном конденсаторе определяется значение половины периода T_C резонансных колебаний на нагрузке, а из тока нагрузки I_H определяются длительности интервалов проводимостей T_{VT} транзисторов VT1, VT2, длительность интервала T_{VD} проводимости обратных диодов VD1, VD2, а также паузы T_H между последовательными состояниями проводимостей обратных диодов и управляемых ключей [12].

■ Метод достижения результата

Формирование управления осуществляется следующим образом. В начальном периоде работы при запуске инвертора вычислительное устройство согласовывает частоту коммутации инвертора с резонансной частотой цепи РЦ путём регулирования момента включения транзисторов. На этом, первом этапе целью процесса регулирования является генерация управляющих импульсов u_1, u_2 таким образом, чтобы сумма интервалов T_{VT} , T_{VD} и T_H равная половине периода коммутации инвертора, была бы равна половине периода T_C колебаний на резонансном конденсаторе. Ошибка регулирования ΔT на первом этапе определяется как $\Delta T = (T_{VT} + T_{VD} + T_H) - T_C$.

Выключение транзисторов определяется моментом перехода тока инвертора I_H через нуль, что соответствует моменту начала протекания тока инвертора через обратные диоды. При этом ток диода является чисто реактивным и увеличивает нагрев не только диодов, но и транзисторов (при разряде реактивной составляющей нагрузки).

Когда частота коммутации инвертора в процессе регулирования момента включения достигнет значения частоты резонансных колебаний на нагрузке ($\Delta T = 0$), в вычислительном устройстве включается регулятор интервала T_{VD} проводимости обратных диодов за счет подстройки интервала паузы T_{II} .

В процессе интегрирования сигнала ошибки $\Delta T_{VD} = (T_{VD} - T_{VT \text{ ЗАД}})$ между фактическим значением интервала T_{VD} интервала проводимости обратного диода и заданным значением $T_{VD \text{ ЗАД}}$ вычисляется требуемое значение паузы $T_{II \text{ Вых.}} = \int \Delta T_{VD} dt$.

Рассогласование $\Delta T_{II} = (T_{II \text{ Вых.}} - T_{II})$ между $T_{II \text{ Вых.}}$ и фактическим значением паузы T_{II} используется далее для соответствующей подстройки паузы с целью сведения указанного рассогласования к минимальному значению. Диаграммы сигналов, полученные при математическом моделировании режима мягких переключений транзисторов инвертора в системе БПЭ, приведены на рис. 6.

Формирование управляющих сигналов $u_1 = 1$, $u_2 = 0$ для положительной полуволны выходного напряжения инвертора выполняется при условии $\Delta T_{II} > 0$ и $\Delta T = 0$, а для отрицательной полуволны эти сигналы должны иметь вид $u_1 = 0$, $u_2 = 1$ при условии $\Delta T > 0$ и $\Delta T_{II} = 0$.

Результатом автоматического регулирования является поддержание частоты и фазы генерации импульсов управления в соответствии с параметрами

нагрузки, что обеспечивает режим мягкой коммутации транзисторов и минимальные потери переключения в инверторе.

К аналогичному результату можно прийти и в инверторе системы энергообеспечения привязного подводного объекта (ППО) при создании условий для мягких переключений транзисторов. Как было отмечено выше, основным отличием такой системы от БПЭ является использование в ней трансформатора традиционного исполнения, т.е. с большой магнитной связью между обмотками и с малыми значениями индуктивностей рассеяния обмоток. Алгоритм организации режима мягких переключений остается прежним, т.е. сначала настраивается частота инвертора, обеспечивающая сведение ошибки ΔT к возможно минимальному значению. Далее, регулированием момента включения транзисторов изменяется значение интервала T_{II} паузы, имеющее целью минимизацию интервала T_{VD} проводимости обратного диода. На рис. 7 показаны диаграммы сигналов инвертора, полученные при математическом моделировании системы энергообеспечения ППО в режиме мягких переключений, где, в частности, интервал T_{VD} проводимости диодов получен равным нулю. Как следует из приведенных диаграмм сигналов, здесь существуют одновременно режимы мягких выключений (ZCS — zero current switching) и мягких включений (ZVS — zero voltage switching), т.е. выключение и включение транзистора происходят при нулевом токе. При этом такое свойство сохраняется в полном диапазоне изменения нагрузки АИИ.

Оценка эффекта от применения предложенной новой системы формирования управления АИИ показана на рис. 8, который отображает результаты компьютерного моделирования систем электро-

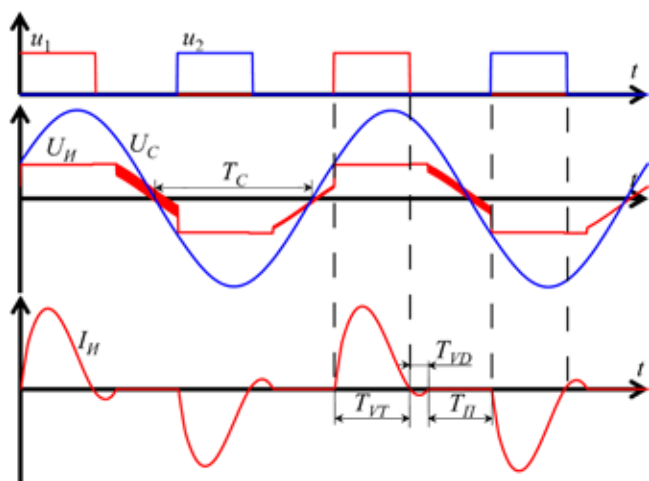


Рис. 6. Диаграммы сигналов инвертора в системе БПЭ с мягкими переключениями

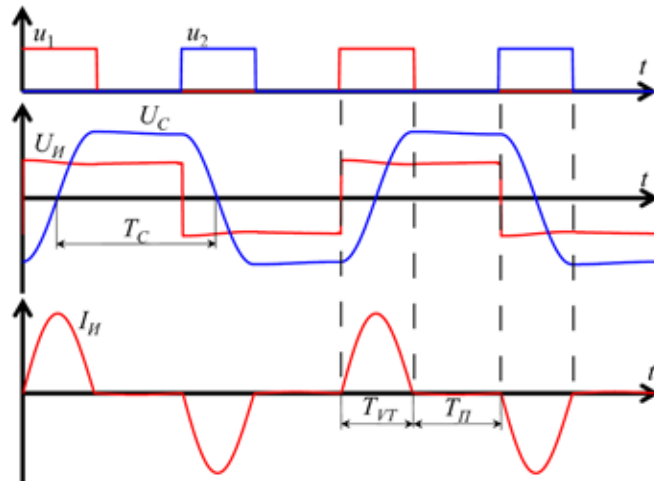


Рис. 7. Диаграммы сигналов инвертора в системе энергообеспечения ППО с мягкими переключениями

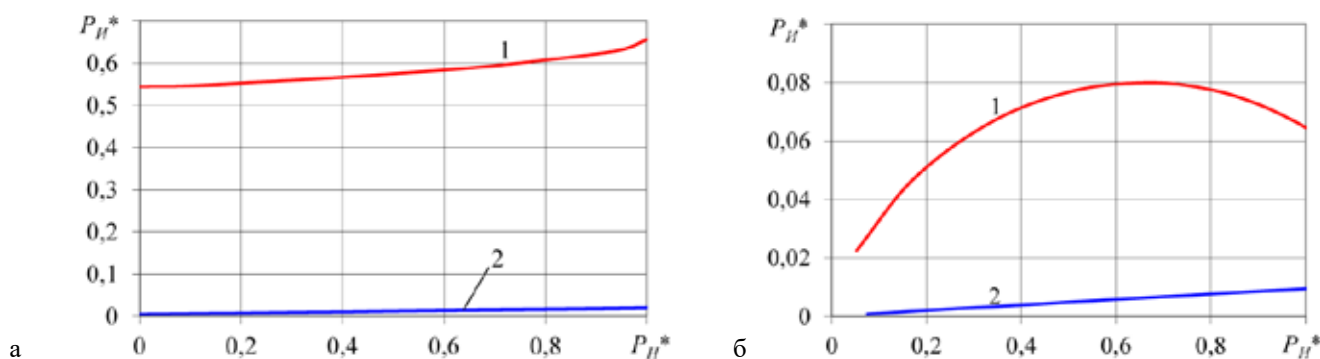


Рис. 8. Зависимость относительных потерь в инверторе от передаваемой активной мощности:

а – в системе БПЭ, б – в системе энергообеспечения ППО;

1 – инвертор с жесткими переключениями и принудительной коммутацией, 2 – резонансный инвертор с управлением по новому способу

снабжения бесконтактным способом и по кабелю в различных режимах. Графики 1 показывают зависимость потерь в АИН для исходного варианта, т.е. при жестких переключениях. Графики 2 иллюстрируют зависимость потерь в инверторе при формировании управления транзисторами АИН по предлагаемому новому способу. Потери на рис. 8 представлены в относительных единицах, при этом за базовое значение принята передаваемая номинальная мощность в исходной системе.

Как следует из приведенных результатов, указанные потери в системе БПЭ уменьшены в десятки раз и составляют пренебрежимо малое значение. Потери в системе энергообеспечения ППО снижаются не так значительно по причине меньшего тока намагничивания в трансформаторе ППО с большим коэффициентом связи. Вместе с тем обеспечение мягких переключений транзисторов снижает потери в 6–9 раз.

Решение задачи уменьшения потерь в АИН способствует повышению общей эффективности систем энергообеспечения подводных объектов за счет повышения частоты коммутации. В результате предоставляется возможность уменьшить габариты и массу трансформаторов системы энергообеспечения при условии сохранения передаваемой активной мощности. Вместе с тем неизменным массогабаритным показателем системы будет соответствовать увеличенная мощность, передаваемая потребителям, при

сохранении тепловых нагрузок на силовые транзисторы АИН.

Выводы

Предложенный новый способ формирования управления транзисторами резонансного автономного инвертора напряжения обеспечивает существенное снижение коммутационных потерь, причем это свойство сохраняется в полном диапазоне изменения передаваемой мощности. Уменьшение потерь позволяет увеличить частоту коммутации, что снизит массу и габариты трансформатора. Однако увеличение частоты повышает нагрузку на резонансном конденсаторе, что приведет к необходимости выбирать конденсаторы с большими габаритами. Это требует дальнейшего исследования по разработке методики определения оптимальной частоты системы энергообеспечения с минимальными габаритами этой системы.

Использование нового способа на практике позволяет увеличить общую эффективность объектов подводной робототехники, выражающую в увеличении передаваемой мощности к потребителям при сохранении массогабаритных показателей систем энергетики или уменьшении этих показателей при сохранении мощности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Герасимов В.А., Кувшинов Г.Е., Филоженко А.Ю., Чепурин П.И. Исследование режимов работы системы энергообеспечения автономного необитаемого подводного аппарата с бесконтактной передачей энергии // Подводные исследования и робототехника. 2013. № 2. С. 24–32.
2. Патент № 2558681 Российская Федерация, МПК H02M 7/797(2006.01). Автономный инвертор напряжения для питания нагрузки через трансформатор с низким коэффициентом связи между его обмотками: № 2014111547/07 : заявл. 03.25. 2014 : опубл. 08.10. 2015 / Кувшинов Г.Е., Наумов Л.А., Себто Ю.Г., Герасимов В.А., Филоженко А.Ю., Чепурин П.И., Красковский М.В.; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук. – 19 с.: ил.
3. Герасимов В.А., Красковский М.В., Филоженко А.Ю. Автономный инвертор напряжения с последовательным резонансным контуром // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2016. № 4. С. 147–158.

4. Герасимов В.А., Красковский М.В., Филоженко А.Ю. Разгрузка транзисторов инвертора в системе бесконтактной передачи электроэнергии на автономный подводный аппарат // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 4. С. 133–147.
5. Герасимов В.А., Красковский М.В., Филоженко А.Ю. Повышение эффективности системы бесконтактного заряда аккумуляторных батарей автономного необитаемого подводного аппарата // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2017. № 1(186). С. 108–118.
6. Choi W., Young S., Kim D. Analysis of MOSFET failure modes in LLC resonant converter // Proc. Int. Telecommun. Energy Conf. Incheon, Korea (South), 2009. 1. P. 1–6. DOI: 10.1109/INTLEC.2009.5351877.
7. Герасимов В.А., Филоженко А.Ю. Использование резонанса для повышения эффективности системы бесконтактной передачи электроэнергии на подводный аппарат // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2018. № 1/195. С. 168–178.
8. Патент № 2341003 Российская Федерация, МПК H02M 7/53846 (2007.01). Способ управления инвертором: № 2007123511/09 : заявл. 06.22.2007 : опубл. 12.10.2008 / Силкин Е.М.; заявитель Закрытое акционерное общество "Электроника силовая". – 10 с.: ил.
9. Патент № 2453977 Российская Федерация, МПК H02M 7/523 (2006.01), H02M 7/53854 (2007.01), H02M 7/53862 (2007.01), H05B 6/04 (2006.01), H05B 6/06 (2006.01). Способ управления автономным согласованным инвертором с резонансной коммутацией: № 2009128714/07 : заявл. 07.24.2009 : опубл. 06.20.2012 / Силкин Е.М.; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Силовая электроника". – 9 с.: ил.
10. Мартынов А.А., Самсыгин В.К., Соколов Д.В., Коковин А.А., Никулкин К.А. Исследование устройства для беспроводной передачи электрической энергии на необитаемый подводный аппарат // Тр. Крыловского государственного научного центра. 2017. № 2(380). С. 92–100.
11. Патент № 2637112 Российская Федерация, МПК H02M 3/335. Автономный инвертор напряжения для питания нагрузки через трансформатор с низким коэффициентом связи между его обмотками: № 2016147592 : заявл. 05.12.2016 : опубл. 30.11.2017 / Герасимов В.А., Филоженко А.Ю., Кувшинов Г.Ю., Чепурин П.И., Красковский М.В.; заявитель и патентообладатель ИПМТ ДВО РАН. – 14 с.: ил.
12. Герасимов В.А., Филоженко А.Ю. Способ управления автономным инвертором напряжения. H02M 7/523 (2006.01), H05B 6/04 (2006.01), H02M 7/797 (2006.01). Заявка на изобретение 2024135834 от 27.11.2024.

Справка об авторах

ГЕРАСИМОВ Владимир Александрович, канд. техн. наук, профессор, заведующий лабораторией энергетики подводных робототехнических комплексов

Институт проблем морских технологий ДВО РАН

Почтовый адрес: Россия, 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, д. 5а

Область научных интересов: энергетика подводных аппаратов, бесконтактная передача электроэнергии, силовая преобразовательная техника

Тел.: +79025223824

E-mail: gerasimov@marine.febras.ru, fobos_v@mail.ru

ORCID: 0000-0003-0246-475X

КОМЛЕВ Антон Владимирович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории энергетики подводных робототехнических комплексов

Институт проблем морских технологий ДВО РАН

Почтовый адрес: Россия, 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, д. 5а

Область научных интересов: энергетика подводных аппаратов, бесконтактная передача электроэнергии, силовая преобразовательная техника

Тел.: +79502884801

E-mail: kom86@bk.ru

ORCID: 0000-0001-8862-8676

ФИЛОЖЕНКО Алексей Юрьевич, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории энергетики подводных робототехнических комплексов

Институт проблем морских технологий ДВО РАН

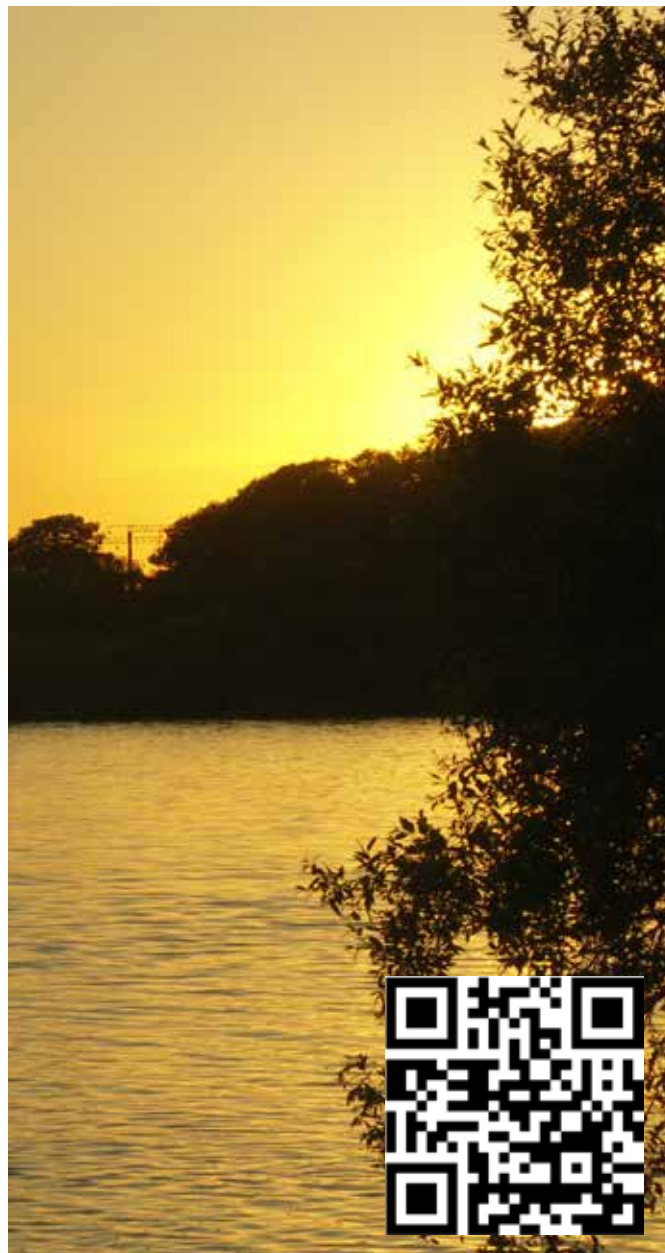
Почтовый адрес: Россия, 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, д. 5а

Область научных интересов: энергетика подводных аппаратов, бесконтактная передача электроэнергии, силовая преобразовательная техника

Тел.: +79140678041

E-mail: filozhenko_a@mail.ru

ORCID: 0000-0003-1684-3849



AUTONOMOUS VOLTAGE INVERTERS IN THE ELECTRICAL SUPPLY SYSTEMS OF UNDERWATER OBJECTS

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

Reducing energy losses in autonomous voltage inverters and reducing thermal loads on power switches is becoming particularly relevant in electrical supply systems for underwater facilities. This is due to the difficulty of removing heat from the power elements located in the robust housings of the device and having a number of layout limitations. The use of resonant circuits with constant tuning is limited, since the process of contactless energy transfer is accompanied by a wide range of changes in the load of the inverter, which is associated with possible axial displacements of the primary and secondary parts of the transformer, as well as a change in the gap between these parts when the device is automatically moored to the bottom mooring device. A significant reduction in switching losses in the inverter can be achieved by combining the soft switching mode with minimizing the current of the opposing diodes with a corresponding change in the switching frequency. This property is implemented in the proposed control method. The research of an autonomous voltage inverter on a computer model confirmed the high efficiency of the proposed method for generating inverter control signals. Switching losses in the inverter have been reduced tenfold compared to both conventional control with hard switches and soft switches with constant tuning of the resonant circuit. This property is maintained over a wide range of load variations of the inverter. Solutions to reduce switching losses in contactless energy transmission systems will be useful in power supply systems via a ROV cable line or other tethered underwater facilities as ways to increase the overall efficiency of underwater robotics systems.

Keywords: energy supply, contactless charge, cable, autonomous voltage inverter, switching losses, conduction intervals, switching frequency.

References

1. Gerasimov V.A., Kuvshinov G.E., Filozhenko A.Yu., Chepurin P.I. The investigation of modes power system supply for autonomous unmanned underwater vehicle with a contactless power transmission // Underwater research and robotics, No 2, 2013, pp. 24 -32 (in Russian).
2. Independent voltage inverter to supply load through transformer with low coupling coefficient between its windings. Patent 2558681 of the Russian Federation / Kuvshinov G.E., Naumov L.A., Sebito Ju.G., Gerasimov V.A., Filozhenko A.Ju., Chepurin P.I., Kraskovskij M.V. No. 2014111547/07; application on 25.03.2014; published on 10.08.2015. Bull. 22 (in Russian).
3. Gerasimov V.A., Kraskovskij M.V., Filozhenko A.Yu. Autonomous voltage inverter with series resonant circuit // Izvestiya SFedU. Engineering sciences. 2016. No 4, pp. 147 – 158 (in Russian).
4. Gerasimov V.A., Kraskovskij M.V., Kuvshinov G.E. Unloading transistors of the inverter in the system contactless transmission on autonomous underwater vehicle // Izvestiya SFedU. Engineering sciences. 2016. No 4, pp. 133 – 147 (in Russian).
5. Gerasimov V.A., Kraskovskij M.V., Filozhenko A.Yu. Increasing the effectiveness of the contactless charge batteries autonomous unmanned underwater vehicle // Izvestiya SFedU. Engineering sciences. 2017. No 1 (186), pp. 108 – 120 (in Russian).
6. Choi, Wonsuk & Young, Sung-mo & Kim, Dong-wook. (2009). Analysis of MOSFET failure modes in LLC resonant converter. Proc. Int. Telecommun. Energy Conf.. 1. 1 - 6. 10.1109/INTLEC.2009.5351877.
7. Gerasimov V.A., Filozhenko A.Yu. The resonance use to increase the efficiency of the non-contact power transmission system on the underwater vehicle // Izvestiya SFedU. Engineering sciences. 2018. No 1 (195), pp. 168 – 178 (in Russian).
8. Method of autonomous matched resonant inverter control. Patent 2558681 of the Russian Federation / E.M. Silkin. No. 2007123511/09; application on 22.06.07; published on 10.12.08. Bull. 34 (in Russian).
9. Control method for stand-alone inverter with resonance switching. Patent 2453977 of the Russian Federation / E.M. Silkin. No. 2009128714/07; application on 24.07.09; published on 20.06.12. Bull. 17 (in Russian).
10. Wireless charger for the underwater unmanned vehicle / A.A. Martynov, V.K. Samsygin, D.V. Sokolov [et al.] // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2017. Vol. 2(380). P. 92–100. DOI: 10.24937/2542-2324-2017-2-380-92-100 (in Russian).
11. Independent voltage inverter to supply load through transformer with low coupling coefficient between its windings. Patent № RU 2637112 C1 of the Russian Federation / Gerasimov V.A., Filozhenko A.Yu., Kuvshinov G.E., Chepurin P.I., Kraskovskij M.V. No 2016147592, application on 05.12.16; published on 30.11.17. Bull. 34 (in Russian).
12. Autonomous voltage inverter control method. Application for an invention 2024135834 of the Russian Federation / Gerasimov V.A., Filozhenko A.Ju. Application on 27.11.2024 (in Russian).

About the authors

GERASIMOV Vladimir Alexandrovich, Head of the Laboratory of Power Engineering of Underwater Robotic Complexes

Institute for Marine Technology Problems, Russian Academy of Sciences, Far Eastern Branch

Address: 5a, Sukhanova Str., Vladivostok, 690091

Research interests: power engineering of underwater vehicles, contactless transmission of electricity, power converter equipment

Phone: +79025223824

E-mail: gerasimov@marine.febras.ru, fobos_v@mail.ru

ORCID: 0000-0003-0246-475X

KOMLEV Anton Vladimirovich, Senior Researcher at the Laboratory of Power Engineering of Underwater Robotic Complexes

Institute for Marine Technology Problems, Russian Academy of Sciences, Far Eastern Branch

Address: 5a, Sukhanova Str., Vladivostok, 690091

Research interests: power engineering of underwater vehicles, contactless transmission of electricity, power converter equipment

Phone: +79502884801

E-mail: kom86@bk.ru

ORCID: 0000-0001-8862-8676

FILOZHENKO Alexey Yuryevich, Leading Researcher at the Laboratory of Power Engineering of Underwater Robotic Complexes

Institute for Marine Technology Problems, Russian Academy of Sciences, Far Eastern Branch

Address: 5a, Sukhanova Str., Vladivostok, 690091

Research interests: power engineering of underwater vehicles, contactless transmission of electricity, power converter equipment

Phone: +79140678041

E-mail: filozhenko_a@mail.ru

ORCID: 0000-0003-1684-3849

