

14. *Brian Gerkey, Richard T. Vaughan and Andrew Howard. The Player/Stage Project: Tools for Multi-Robot and Distributed Sensor Systems. In Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Robotics (ICAR 2003). – Coimbra, Portugal, June 2003. – P. 317-323.*
15. The Internet Communications Engine [Электронный ресурс] / ZeroC, Inc. – Режим доступа: <http://www.zeroc.com/ice.html>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.
16. Carmen Robot Navigation Toolkit [Электронный ресурс] / CARMEN-Team. – Режим доступа: <http://carmen.sourceforge.net/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.А. Светлаков.

Боровик Алексей Игоревич – Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук; e-mail: alexey@borovik.me; 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5А; тел.: 84232215545, доб. 445; телекоммуникационный центр; стажер-исследователь.

Наумов Леонид Анатольевич – e-mail: naumov@marine.febras.ru; тел.: 84232432651; д.т.н.; директор.

Borovik Alexey Igorevich – Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; e-mail: alexey@borovik.me; 5A, Sukhanova street, Vladivostok, 690091, Russia; phone: +74232215545, ext. 445; Center of telecommunications; graduate employee.

Naumov Leonid Analolievich – e-mail: naumov@marine.febras.ru; phone: +74232432651; dr. of eng. sc.; director.

УДК 621.31

В.А. Герасимов, А.Ю. Филоженко, П.И. Чепурин

СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

Рассмотрена задача определения структуры системы бесконтактной передачи электрической энергии для зарядки аккумуляторных батарей автономного необитаемого подводного аппарата. Определены требования к практическим схемным реализациям импульсных преобразователей системы – инвертору и зарядному устройству, а также к выбору силовых и защитных компонентов этих узлов. Приведены расчетные соотношения для силового высокочастотного трансформатора, определяющие эффективность передачи электроэнергии на подводный аппарат, и обозначены соответствующие конструктивные решения. Показаны результаты математического моделирования в среде MATLAB-Simulink и экспериментального исследования полномасштабного лабораторного макета системы. Сделано заключение о возможных путях параметрической оптимизации системы.

Подводный аппарат; энергообеспечение; аккумуляторы; бесконтактная передача энергии; высокочастотный трансформатор; моделирование; экспериментальные исследования.

V.A. Gerasimov, A.J. Filozhenko, P.I. Chepurin

STRUCTURE OF THE SYSTEM NONCONTACT ENERGY ISSUE OF THE AUTONOMOUS UNDERSEA DEVICE

Article is devoted to the problem of structure of determination for contactless power transmission system, used for supplying electric energy charge underwater vehicle's batteries. The requirements for the practical circuit realization of pulse converters are determined – inverter and charger, but also selection of power and protective components of these devices. Calculated ratios for the high-frequency power transformer, determining the efficiency of electricity transmission to the underwater vehicle, also identified by the corresponding design solutions. The results of math-

emational modeling of the system behavior are executed with help of Simulink tool, but also performed experimental exploration of the full-scale layout system. Additionally, assumed the way for parametric optimization of contactless power transmission system.

Underwater vehicle; electric power supply; contactless power transmission system; batteries; high frequency transformer; modeling; the experimental exploration.

Введение. Система энергообеспечения автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) должна решать две основные задачи: первая – это передача энергии с судна-носителя (или с донного причального устройства – ДПУ) на подводный аппарат и вторая – необходимое преобразование переданной энергии с целью заряда аккумуляторных батарей аппарата.

В [1] приводится анализ трех основных способов передачи электрической энергии под водой: контактный – с помощью проводных электрических линий с электросоединителями, бесконтактный (индукционный) и генераторный. При генераторном способе энергия передается путем подключения вала электродвигателя, находящегося, например, на ДПУ к валу электродвигателя АНПА, который работает в этом режиме как генератор и заряжает аккумуляторную батарею.

Контактный способ передачи энергии требует точного позиционирования при выполнении электрического соединения, необходимость изоляции соединителя от морской воды усложняет его конструкцию и снижает надежность. При использовании метода непосредственного электрического соединения через один изолированный электрод (отрицательный полюс) и второй неизолированный (положительный полюс) возникает коррозия положительного электрода, который необходимо защищать протектором.

Бесконтактный способ передачи энергии требует применения дополнительных электрических преобразователей, однако при этом отсутствует физический электрический контакт и соприкасающиеся поверхности индукторов инвариантны к неточному соединению и обрастанию.

Сравнительный анализ [1] перечисленных способов передачи энергии по таким основным критериям, как влияние окружающей среды, необслуживаемость, эффективность передачи энергии, размеры и масса, уровень магнитного поля, изоляция от морской воды, влияние на движение АНПА и др., показывают предпочтительность бесконтактного способа передачи энергии на аппарат. При этом функциональную схему системы бесконтактной передачи энергии на АНПА можно представить, как показано на рис. 1.

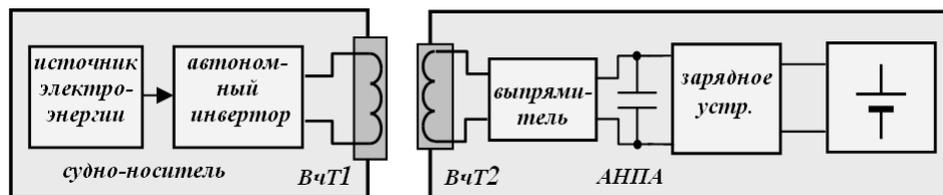


Рис. 1. Функциональная схема системы энергообеспечения АНПА с бесконтактной передачей энергии

В общем случае в состав системы должны входить источник электроэнергии, автономный инвертор, высокочастотный трансформатор (ВчТ) с выполненными отдельно первичной (ВчТ1) и вторичной (ВчТ2) частями, выпрямитель, фильтр, зарядное устройство и нагрузка (аккумуляторные батареи) [2].

Источник электроэнергии входит в состав корабельного обеспечения и состоит из трансформатора и выпрямителя. Автономный инвертор из входного напряжения постоянного тока создает выходное напряжение переменного тока, имеющее прямоугольную форму и являющееся первичным напряжением ВчТ. По-

сколькo подобные преобразования обычно выполняются на частотах порядка десятков килогерц, то силовой выпрямитель на вторичной стороне ВЧТ должен быть высокочастотным. Структуру зарядного устройства определяют требования к процессу заряда аккумуляторной батареи конкретного типа (в рассматриваемом случае литий-ионный).

Принципы построения силовых преобразовательных устройств, которые могут быть использованы при разработке системы энергоснабжения АНПА, достаточно подробно и глубоко освещены в литературе. Выполнение требований, предъявляемых к силовым коммутирующим элементам автономного инвертора и зарядного устройства, выходным параметрам драйверов коммутирующих устройств, следование правилам конструктивного исполнения шины питания инвертора и зарядного устройства, а также обеспечение необходимых требований к параметрам и исполнению фильтров этих устройств позволит создать эффективную и надежную систему энергоснабжения АНПА.

Одной из задач, решение которой определяет надежность импульсных преобразователей, является обеспечение защиты от перенапряжений, уровень которых зависит от паразитной индуктивности монтажа и частоты переключения. Некоторые вопросы разработки можно решить с помощью математического моделирования, однако, учитывая сложность воспроизведения в модели реальных параметров монтажа, наиболее продуктивным подходом к построению системы следует считать макетирование устройства в натурных условиях. При этом к основным решаемым задачам относятся определение типа снабберных цепей, их параметров, а также конструктивного исполнения и способа монтажа этих цепей на силовых коммутирующих элементах преобразователей.

Высокочастотный трансформатор, обеспечивающий бесконтактную передачу энергии за счет индуктивной связи между первичной ВЧТ1 и вторичной ВЧТ2 обмотками, является устройством, которое и определяет, в основном, эффективность передачи энергии в водной среде. Параметры трансформатора: числа витков и сечения проводов обмоток, материал и конфигурация магнитопровода, зависимость напряжения на вторичной обмотке от тока нагрузки зависят от ряда факторов. Это мощность и напряжение нагрузки, напряжение на первичной обмотке, окружающая температура и условия охлаждения, ограничения по габаритам трансформатора [2]. Некоторые вопросы расчета трансформатора и его параметрической оптимизации можно решить путем математического моделирования. Вместе с тем отдельные характеристики трансформатора, в частности – влияние ошибки позиционирования между его первичной и вторичной частями на эффективность передачи электроэнергии следует определять также путем макетирования устройства в натурных условиях.

Выбор структуры автономного инвертора. Для передачи мощности, измеряемой киловаттами, выходной каскад инвертора обычно выполняют по мостовой схеме (рис. 2,а). Такая реализация соответствует лучшему использованию силовых ключей инвертора, в качестве которых целесообразно принять IGBT-транзисторы.

Решение задачи выбора драйверов ключей инвертора неоднозначно. Здесь возможно применение бутстрепных схем, импульсных трансформаторов, отдельных оптически изолированных каналов для верхнего и нижнего плеча каждой стойки инвертора. Общим является требование обеспечить смещение уровня управления верхними ключами стоек полумоста. Кроме того, драйвер должен формировать необходимый интервал «мертвого времени» T_{DT} в управляющих сигналах $u1 \dots u4$ и заданное значение максимального тока управления затворами транзисторов, которое определяется входной емкостью затвора и принятой частотой коммутации [3].

Анализ обширного предложения компонентов останавливает внимание на продукции Российского предприятия ЗАО "Электрум АВ", специализирующегося на разработке и выпуске полупроводниковых приборов силовой электроники модульного исполнения, устройств управления ими и интегрированных систем силовой электроники для применения в системах промышленного и военного назначения. Основания для такого выбора следующие:

- ◆ предлагаемые компоненты позволяют осуществлять согласованное комплексное решение задачи построения силовой части инвертора и его схемы управления;
- ◆ силовые ключи и драйверы выполнены в виде модулей, что оптимизирует компоновочные схемы и повышает надежность;
- ◆ развитая функциональность драйвера позволяет организовать целый ряд защит силовых модулей: контроль напряжения насыщения на коллекторе транзистора и его защитное отключение при выходе из состояния насыщения, регулировку порога защитного отключения, обеспечение плавного перехода драйвера из активного состояния в неактивное при «аварийной» ситуации, блокировку одновременного включения верхнего и нижнего плеча, задержку на переключение верхнего и нижнего плеча и др.;
- ◆ многие компоненты имеют приемку «5».

Иллюстрация внешнего вида силового модуля полумоста на IGBT-транзисторах и модуля драйверов для этого полумоста производства Электрум АВ приведена на рис. 2,б.

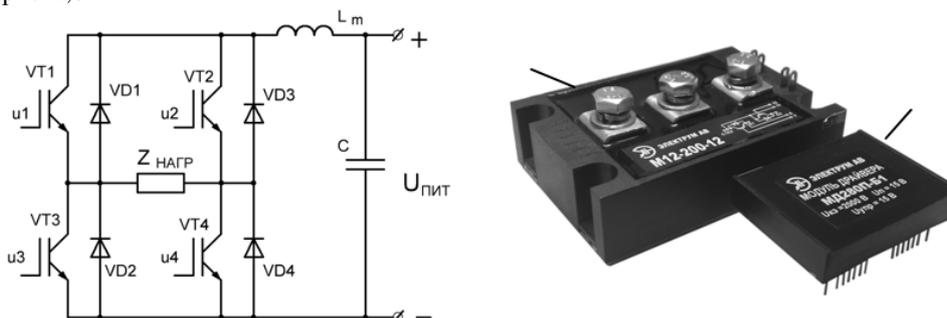


Рис. 2. Автономный инвертор системы энергообеспечения АНПА:
а – схема силовой части; б – внешний вид модуля IGBT (1) и модуля драйвера (2)

Наиболее важным при разработке силовых преобразователей являются обеспечение безопасных тепловых режимов и правильность выполнения топологии соединений. Высокие значения di/dt , du/dt , возникающие при переключении силовых модулей, приводят к появлению переходных перенапряжений. В реальных схемах всегда присутствуют паразитные индуктивности (на схеме показана индуктивность шины питания L_m). Из-за влияния этой индуктивности напряжение на транзисторе при запирации увеличивается на $L_m \times di/dt$. Суммарное напряжение $U_{пит} + L_m \times di/dt$ может превысить значение напряжения пробоя и вывести транзистор из строя. При коммутации токов, достигающих значения десятков и сотен ампер, паразитная индуктивность шины питания не должна превышать единиц нГн. Чтобы обеспечить такое значение индуктивности, необходимо использовать специальные многослойные шины и снабберы.

Структурная схема одного полумоста инвертора показана на рис. 3. На этой схеме показан способ подачи управляющих сигналов с выхода модуля драйвера на затворы IGBT-транзисторов. Снабберные цепи представлены RC-элементами С1,

R5 и C2, R6, а также диодами VD5, VD6. Диоды представляют собой быстродействующие ограничители-супрессоры. Падение напряжения на диодах VD1, VD3 определяет порог срабатывания защиты силовых IGBT-транзисторов по падению напряжения на них в открытом состоянии. Полная схема инвертора состоит из двух приведенных полумостовых схем с соответствующим объединением сигналов управления на входах драйверов.

Указанное выше макетирование инвертора в натуральных условиях следует считать необходимым этапом разработки этого устройства, на котором должны быть получены рекомендации по выбору номиналов элементов снабберных цепей, значению емкости фильтрующего конденсатора C3, а также по оптимизации топологии силовой шины $\pm U_{\text{пит}}$. Значения тепловых нагрузок можно определить при компоновке инвертора в корпусе прочного контейнера и создании номинальных внешних рабочих условий.

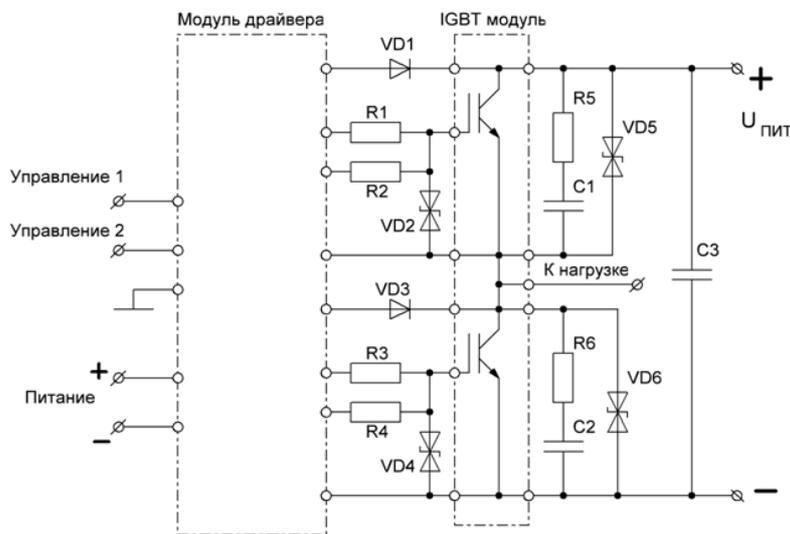


Рис. 3. Структура одного полумоста автономного инвертора системы энергообеспечения АНПА

Зарядное устройство. При заряде литий-ионных аккумуляторов должны обеспечиваться два интервала заряда: первый – заряд постоянным током до момента достижения максимально допустимого значения напряжения полностью заряженного аккумулятора. Второй интервал – поддержание на аккумуляторе неизменного напряжения, достигнутого к концу первого интервала, и отключение процесса заряда при уменьшении тока заряда до 15 % от номинального значения.

Конкретная практическая реализация устройства, обеспечивающего указанный алгоритм с требуемой точностью, может быть различной, но вместе с тем в большинстве случаев будет иметь следующие основные общие черты: это должна быть замкнутая система автоматического регулирования с обратными связями по напряжению аккумуляторной батареи и по току заряда, причем в качестве силового регулирующего элемента предпочтительным является выбор импульсного регулятора напряжения понижающего типа. При этом структурную схему подобного зарядного устройства в общем виде можно представить, как показано на рис. 4.

В устройстве управления УУ осуществляется контроль рассогласования между заданным значением тока заряда $I_{\text{зад}}$ и фактическим током $I_{\text{аб}}$, а также между заданным номинальным значением напряжения $U_{\text{зад}}$ полностью заряженной аккумуля-

муляторной батареи и фактическим напряжением U_{AB} на ее зажимах. Полученные значения рассогласования используются для формирования сигнала управления $U_{УПР}$ импульсным регулятором напряжения ИРН. Выбор подобной структуры обеспечивает процесс заряда батареи с заданным качеством с минимальными затратами, но, как в любой замкнутой системе регулирования, возникают задачи получения требуемых статических и динамических характеристик, т.е. обеспечения устойчивости и заданной точности. Аналитический расчет системы позволяет определить предварительные значения настроек устройства управления, которые могут быть уточнены в ходе исследования математической модели зарядного устройства. Задача определения тепловых нагрузок на силовые компоненты, так же как и для инвертора, должна решаться при компоновке устройства в корпусе прочного контейнера и создании номинальных внешних рабочих условий.

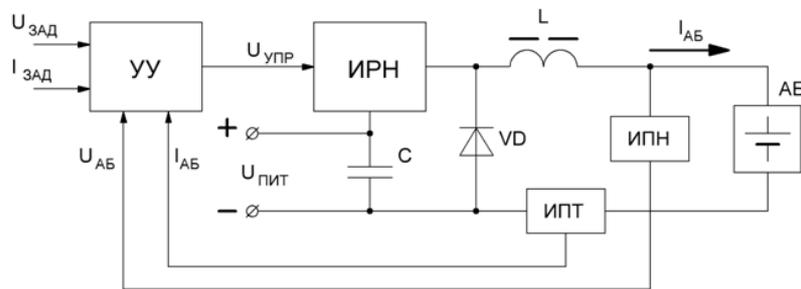


Рис. 4. Структурная схема зарядного устройства: УУ – устройство управления; ИРН – импульсный регулятор напряжения; ИПТ, ИПН – измерительные преобразователи тока и напряжения соответственно; L – реактор

В качестве коммутирующего силового элемента импульсного регулятора ИРН целесообразно принять модуль верхнего чоппера, также выпускаемый ЗАО Электрум АВ и состоящий из IGBT-транзистора и согласованного с ним быстро восстанавливающегося диода. Самые мощные представители ряда этих компонентов позволяют получать средний ток до 200 А при частоте коммутации 20 ... 25 кГц.

Высокочастотный трансформатор. Назначение высокочастотного трансформатора ВчТ состоит в бесконтактной передаче электрической энергии за счет индуктивной связи между разделяющимися первичной ВчТ1 и вторичной ВчТ2 частями.

Как было отмечено выше, при проектировании такого сложного устройства рациональным является сбалансированное сочетание аналитического расчета, математического моделирования и исследование реального макета устройства в натурных условиях.

Внешняя характеристика ВчТ, представляющая собой зависимость действующего значения напряжения U_2 на вторичной обмотке от тока нагрузки I_2 для напряжения прямоугольной формы (без учета падения напряжения на открытых транзисторах инвертора) может быть представлена следующим выражением [4]:

$$U_2 = U_{2XX} \sqrt{1 - \frac{I_2}{I_{2КЗ}}}, \quad (1)$$

где U_{200} – напряжение холостого хода ВчТ, $I_{2КЗ}$ – ток короткого замыкания;

$$U_{2XX} = k \frac{w_2}{w_1} U_{ПИТ}, \quad (2)$$

где $k = M / \sqrt{L_1 L_2}$ – коэффициент связи между обмотками; w_1, w_2 – числа витков первичной и вторичной обмоток ВчТ; $U_{i\dot{E}\dot{O}}$ – напряжение питания инвертора;

$$I_{2\dot{E}\dot{C}} = \frac{kU_{i\dot{E}\dot{O}}}{8fw_1w_2L_A(1-k^2)}, \quad (3)$$

где f – частота коммутации инвертора; L_B – индуктивность одного витка.

Исходные данные для выбора конструктивных параметров ВчТ определяются электрическими параметрами заряда аккумуляторной батареи, т.е. значением выходного напряжения U_H и тока I_H в номинальном режиме заряда. Кроме того, конструктивные параметры связаны с рядом ограничений: допустимые габариты ВчТ, условия охлаждения, максимальные токовые нагрузки на провод катушек трансформатора, допустимая частота коммутации IGBT-транзисторов инвертора, предлагаемая номенклатура ферритовых сердечников для магнитопроводов ВчТ и др.

Достаточно сбалансированный вариант, основанный на анализе перечисленных факторов, имеет следующие характеристики: $f = 12350$ Гц, $w_1 = 18$ витков, $w_2 = 19$ витков, $L_B = 0,58$ мкГн. Для катушек применялся провод литцендрат ЛЭЛО 1075x0,071 сечением 4,25 мм² и наружным диаметром 3,8 мм. Для магнитопровода использовались ферритовые сердечники *P core half 150x30 (B65949)* производства фирмы Epcos, конструктивно выполненные в виде броневых полочек с наружным диаметром 150 мм, диаметром центрального ядра 65 мм и сечением окна 65x15 мм. Для перечисленных параметров и для случая точного позиционирования соприкасающихся поверхностей первичной и вторичной частей ВчТ по формулам (1) ... (3) рассчитана внешняя характеристика, которая приведена на рис. 5, кривая 1.

Влияние конструктивных параметров катушек ВчТ на его внешние характеристики удобно оценивать путем математического моделирования системы бесконтактной передачи энергии. При этом под такой системой понимается комплекс, состоящий из источника электрической энергии постоянного тока, инвертора, ВчТ, выпрямителя, фильтра и нагрузки. Модель системы бесконтактной передачи энергии, реализованная в среде MATLAB-Simulink, приведена на рис. 6. Источник электрической энергии в модели представлен как DC с внутренним сопротивлением RL , инвертор – IGBT транзисторами $VT1 \dots VT4$, высокочастотный трансформатор – связанными индуктивностями T , выпрямитель, фильтр и нагрузка – элементами $Rect$, C_{out} , R_n соответственно. Внешняя характеристика системы передачи энергии, определенная в модели, показана на рис. 5, кривая 2.

Экспериментальная внешняя характеристика, измеренная в натуральных условиях при испытаниях лабораторного макета системы бесконтактной передачи энергии, приведена на том же рис. 5, кривая 3.

Анализ результатов расчета, моделирования и экспериментальных исследований показывает достаточно хорошее их совпадение, что доказывает адекватность модели. Близкое совпадение показывают также и формы сигналов в системе, т.е. токов и напряжений в первичной и вторичной обмотках ВчТ при различных нагрузках.

При дальнейшей разработке системы передачи энергии потребуются решать такие задачи как определение взаимосвязей между конструктивными параметрами и характеристиками системы при введении зазора или смещения между соприкасающимися поверхностями ВчТ, определения законов управления инвертором при введении ограничений по нагреву катушек ВчТ, исследования влияния снабберных цепей на значения перенапряжений на транзисторах инвертора и др. Использование разработанной математической модели системы, возможно с некоторыми уточнениями, позволит получать практические результаты с минимизацией затрат и времени разработки.

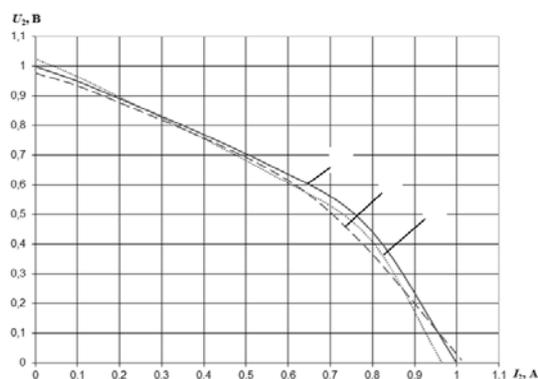


Рис. 5. Внешние характеристики системы бесконтактной передачи энергии:
1 – аналитический расчет; 2 – моделирование в MATLAB; 3 – эксперимент

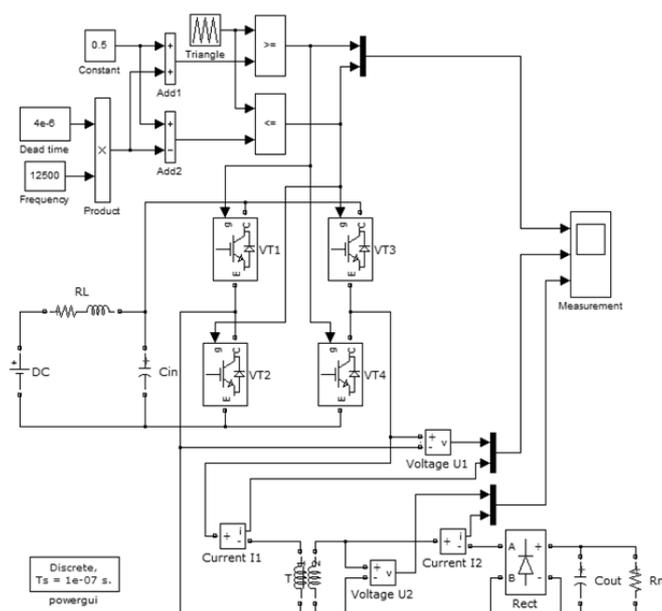


Рис. 6. Схема математической модели системы бесконтактной передачи энергии

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Илларионов Г.Ю., Сиденко К.С., Бочаров Л.Ю. Угроза из глубины: XXI век. – Хабаровск: КГУП «Хабаровская краевая типография», 2011. – 304 с.
2. Кувишинов Г.Е., Наумов Л.А., Филоженко А.Ю., Чупина К.В. Бесконтактная передача электроэнергии на морской подвижный объект // Научно-техническая конференция: Матер. конф. «Технические проблемы освоения мирового океана». – Владивосток: Дальнаука, 2007. – С. 141-146.
3. Колтаков А.И. Топология частотных преобразователей средней и большой мощности // Компоненты и технологии. – 2002. – № 2.
4. Герасимов В.А., Копылов В.В., Кувишинов 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.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.А. Достовалов.

Герасимов Владимир Александрович – Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской Академии наук, г. Владивосток; e-mail: gerasimov@marine.febras.ru; 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а; тел.: 89025223824; к.т.н.; профессор; зав. лабораторией 07.

Филоженко Алексей Юрьевич – e-mail: filozhenko_a@mail.ru; тел.: +79140678041; к.т.н.; зав. лабораторией 07.

Чепурин Павел Игоревич – e-mail: chepurinp@mail.ru; тел.: +79024885899; к.т.н., зав. лабораторией 07.

Gerasimov Vladimir Aleksandrovich – Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; e-mail: gerasimov@marine.febras.ru; 5a, Suhanova street, Vladivostok, 690091, Russia; phone: +79025223824; cand. of eng. sc.; professor; managing laboratory 07.

Filozhenko Aleksey Jurievich – e-mail: filozhenko_a@mail.ru; phone: +79140678041; cand. of eng. sc.; managing laboratory 07.

Chepurin Pavel Igorevich – e-mail: chepurinp@mail.ru; phone: +79024885899; cand. of eng. sc.; managing laboratory 07.

УДК 629.7.01

Г.А. Чуянов, В.В. Косьянчук, Н.И. Сельвесюк

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КОМПЛЕКСОВ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА БАЗЕ ИНТЕГРИРОВАННОЙ МОДУЛЬНОЙ АВИОНИКИ

Рассмотрены перспективные направления развития комплексов бортового оборудования, построенных на принципах интегрированной модульной авионики. Проанализированы особенности сетевой отказоустойчивой архитектуры и интерфейсов комплекса, возможности унификации и модернизации компонентов ИМА, описаны новые функциональные возможности, принципы обеспечения надежности и отказобезопасности комплекса, рассмотрены возможности реализации новационных самолетных систем на базе ИМА, современные технологии проектирования, обеспечивающие автоматизацию проектирования программного обеспечения и аппаратуры, а также поддерживающие процессную сертификацию бортового оборудования. Также проанализированы возможности развития высокоинтегрированных бортовых систем и общесамолетного оборудования.

Комплекс бортового оборудования, интегрированная модульная авионика; сетевая архитектура; функциональное программное обеспечение.

G.A. Chuyanov, V.V. Kosyanchuk, N.I. Selvesyuk

PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF COMPLEX ONBOARD EQUIPMENT ON THE BASIS OF INTEGRATED MODULAR AVIONICS

The article describes the perspectives for the development of on-board complex equipment, based on the principles of integrated modular avionics. The features of a fault-tolerant network architecture and interfaces of the on-board equipment, the possibility of unification and modernization IMA components, describes the new functionality, the principles of reliability and fail-safe provided for on-board equipment, consider implementing a novation of aircraft systems based on the IMA, modern design technology, providing design automation software and hardware, and support of process certification of on-board equipment. Assess the possible development of highly integrated aircraft systems and vehicle equipment.

Complex onboard equipment, integrated modular avionics, network architecture; functional software.