

УДК 621.31:629.584

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ИНВЕРТОРА СИСТЕМЫ БЕСКОНТАКТНОГО ЗАРЯДА АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ПОДВОДНОГО РОБОТА

**В. А. Герасимов, О. С. Попов,  
А. Ю. Филоженко, П. И. Чепурин**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
«Институт проблем морских технологий» ДВО РАН<sup>1</sup>

Условия работы автономного инвертора системы бесконтактного заряда требуют размещения его в прочном контейнере ограниченного объема, что определяет актуальность задачи отвода тепла от его силовых элементов. Исследование процессов теплообмена для двух конструктивных исполнений инвертора позволило определить допустимые токовые нагрузки и связать время зарядки аккумуляторных батарей подводного аппарата с температурой и видом окружающей среды. Решение задачи выполнено с использованием математического моделирования в программном пакете SolidWorks FlowSimulation, а также натурного эксперимента, который обеспечил уточнение настроечных коэффициентов модели и подтвердил достоверность результатов моделирования. Исследование проведено для различных условий работы инвертора на воздухе и в воде.

## ВВЕДЕНИЕ

На систему энергообеспечения автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) возлагается одна из важнейших задач – заряд аккумуляторных батарей для электропитания всех бортовых систем. В [1] подробно описана структура системы электроснабжения АНПА, а ее функциональная схема с бесконтактным (индукционным) способом передачи электроэнергии приведена на рис. 1.

Систему энергообеспечения АНПА можно представить в виде двух основных частей: первая часть расположена на судно-носителе или донно-причалном

устройстве и состоит из источника электроэнергии и автономного инвертора напряжения (АИН), работающего на первичную обмотку высокочастотного трансформатора ВчТ 1. Вторая часть расположена на АНПА и содержит вторичную обмотку ВчТ 2, высоко частотный выпрямитель, фильтрующее устройство, автоматическое зарядное устройство (АЗУ), соединенное с клеммами аккумуляторных батарей АНПА.

По назначению и условиям работы автономный инвертор должен размещаться в прочном контейнере ограниченных размеров, допускающем, в общем случае, погружение под воду на глубину расположения АНПА. Требование

плотной компоновки инвертора ставит задачи определения таких конструктивных решений, при которых выполняются заданные токовые нагрузки элементов инвертора при ограничении температуры их перегрева допустимым значением. Вместе с тем условия эксплуатации АНПА могут привести к необходимости выполнять заряд аккумуляторных батарей на воздухе, что будет сопровождаться снижением теплопередачи в окружающую среду. Последнее обстоятельство ставит дополнительную задачу определения допустимых токовых нагрузок на силовые элементы инвертора при сохранении допустимого их перегрева и осуществлении заряда аккумуляторных батарей за минимально возможное время.

Рациональным подходом в данном случае является использование математического моделирования, позволяющего провести

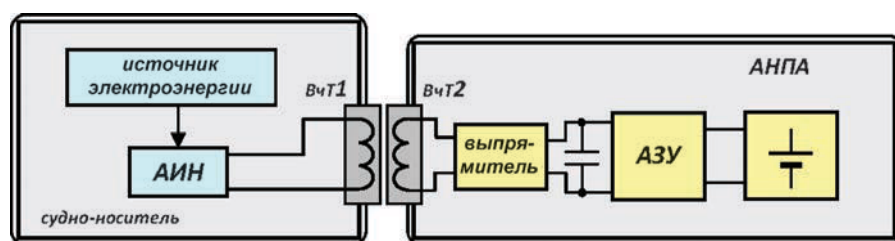


Рис. 1. Функциональная схема системы энергообеспечения АНПА с бесконтактной передачей энергии

<sup>1</sup> 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а.  
Тел.: (423) 2432416. E-mail: gerasimov@marine.febbras.ru

подробный анализ режимов работы изделия на ранних стадиях проектирования с минимальными материальными затратами.

В настоящее время компьютерное моделирование является неотъемлемой частью процесса разработки любых технических объектов. Это касается не только создания геометрических моделей конструкций, но и исследования протекающих в них физических процессов путем использования компьютерной симуляции.

Один из распространенных подходов к выполнению тепловых расчетов электронной аппаратуры заключается в использовании упрощенных моделей, построенных с использованием электротепловых аналогий и полумпирических соотношений, приближенно описывающих механизмы теплопередачи. Электротепловая аналогия, основанная на том, что исходные закономерности для электрических и тепловых полей формулируются одинаково, позволяет использовать сходные дифференциальные уравнения. Это дает возможность для расчета тепловых режимов составлять тепловые схемы, подобные электрическим. Данный подход, несмотря на некоторые достоинства, тем не менее вытесняется моделированием тепловых процессов с использованием пакетов численного анализа. Кроме того, созданы специальные методики, позволяющие оценивать тепловые характеристики конструкции и выбирать системы охлаждения, располагая минимумом информации на ранней стадии конструирования [2]. К числу необходимых сведений для проведения оценок относятся:

- суммарная мощность, рассеиваемая в блоке;
- диапазон изменения температуры окружающей среды;
- тип окружающей среды и пределы изменения давления в ней;

- время непрерывной работы;
- допустимые значения температуры нагрева элементов исследуемого устройства.

Однако расчет температурных режимов связан с определенными трудностями, обусловленными взаимодействием различных источников теплоты.

### 1. Теплофизическое моделирование инвертора

Существует довольно обширный круг прикладных САЕ-программ, способных выполнить тепловые расчеты с требуемой точностью как в двумерном, так и трехмерном пространстве, например, Ansys Fluent, Ansys Multiphysics, Ansys Mechanical, Solidworks Flow Simulation и другие [3]. В основе всех программных комплексов лежит широко применяемый метод конечных элементов (МКЭ). МКЭ – один из наиболее гибких и универсальных методов решения широкого круга задач механики сплошной среды, тепло- и массообмена, электро- и магнитостатики и многих других задач науки и техники [5]. Перечисленные выше прикладные САЕ-программы позволяют выполнить стационарный тепловой анализ, определяющий отклик системы на установившуюся тепловую нагрузку. В этом типе анализа определяется распределение температуры и другие тепловые параметры (значения теплового потока и скорости его передачи в определенном направлении; энтальпия; число Прандтля и др.) при неизменных граничных условиях, когда изменение тепловых параметров системы во времени пренебрежимо мало. Кроме этого, САЕ-программы позволяют провести нестационарный тепловой анализ, при котором определяется распределе-

ние температуры в исследуемой конструкции при меняющихся во времени условиях.

При моделировании тепловых нагрузок АИН предпочтительнее можно отдать программному пакету гидрогазодинамики Flow simulation. Выбор в пользу данной программы объясняется тем, что SolidWorks является одним из наиболее распространенных САД-пакетов, который обеспечивает возможность создания геометрических моделей конструкций электронных устройств и позволяет в этом же пакете применить к ним требуемые исследования, например, определение тепловых нагрузок на элементы устройства. Кроме этого указанный пакет включает также встроенные средства численного анализа для проверки принятых решений без выполнения конвертации геометрических моделей. В отличие от известной группы программ конечно-элементного анализа ANSYS, пакет SolidWorks имеет интерфейс и инструментарий, в большей степени ориентированный на решение прикладных инженерных задач. Этот пакет полностью интегрирован в SolidWorks и предназначен для расчета жидкостных и газовых потоков внутри и снаружи модели, а также позволяет исследовать процессы теплопередачи всеми тремя способами: конвекцией, излучением и теплопроводностью с помощью технологий вычислительной гидрогазодинамики (CFD). Flow Simulation моделирует движение потока на основе решения уравнения Навье–Стокса, которое является интерпретацией законов сохранения массы, импульса и энергии для потока жидкости или газа.

При решении поставленной выше задачи приняты следующие исходные положения. Исследование тепловых режимов работы

АИН проводится в режиме стационарного теплового анализа. Перенос тепла внутри блока АИН происходит посредством трёх различных механизмов: теплопроводности, конвекции и излучения. Для герметичного корпуса перенос тепла конвективным способом является второстепенным, так как отсутствует естественная и принудительная вентиляция. Теплообмен излучением, как показал анализ, также вносит незначительный вклад, порядка нескольких процентов от общей суммы. Поэтому можно считать, что основной вклад в процесс теплообмена вносит именно теплопроводность материалов [4].

В качестве объекта моделирования принят инвертор системы энергообеспечения АНПА, входящий в состав системы бесконтактного заряда аккумуляторных батарей с номинальным током заряда 60 А и напряжением 58,8 В. Конструктивно инвертор размещен в прочном контейнере с размерами: габаритная длина – 466 мм; внутренний диаметр – 150 мм; внешний диаметр – 178 мм. Материал контейнера: алюминиевый сплав АМг5 или титановый сплав ВТ-22, материал теплоотводящего радиатора – АМг5. Внутренняя площадь цилиндрической части контейнера  $S_{\text{ВНУТР.}} \approx 0,187 \text{ м}^2$ ; внешняя площадь цилиндрической части контейнера  $S_{\text{ВНЕШН.}} \approx 0,223 \text{ м}^2$ ; длина цилиндрической части контейнера  $L_{\text{ЦИЛ.}} = 0,4 \text{ м}$ . В расчетах приняты следующие значения температурного диапазона эксплуатации инвертора: минимальная температура  $+4^\circ\text{C}$  и максимальная  $+28^\circ\text{C}$ .

При разработке подводных энергомодулей, в частности АИН, рассчитанных на большие мощности (единицы киловатт), возникают затруднения отвода тепла в

связи с ограниченным полезным объемом герметичного контейнера при значительной суммарной мощности тепловых потерь, выделяемых элементами. При этом явно выражены проблемы компоновки внутренних силовых элементов АИН и необходимость проектирования теплоотводящего радиатора особой формы.

Наиболее тепловыделяющими элементами, входящими в состав АИН, являются: силовые транзисторные модули со встроенными оппозитными диодами (2 шт.); драйверы управления силовыми ключами (2 шт.); силовой пленочный конденсатор (1 шт.). Тепловыми потерями модулей питания, установленных на платах управления, можно пренебречь ввиду их незначительного вклада в суммарную мощность.

АИН работает в режиме «принудительной» коммутации полупроводниковых транзисторных ключей [1]. Коэффициент полезного действия АИН в этом случае составляет около 70%, а суммарная мощность потерь при номинальной нагрузке АИН равна примерно 450 Вт.

При исследовании прорабатывались два варианта внутренней компоновки наиболее тепловыделяемых элементов – транзисторных модулей. В первом варианте исполнения силовые модули располагаются по обе стороны на монтажном ребре теплорассеива-

ющего радиатора, который, в свою очередь, вплотную прилегает к цилиндрической части контейнера, контактирующей с внешней средой. Во втором случае монтажное ребро отсутствует и модули крепятся непосредственно на внутреннюю плоскость радиатора. На рис. 2 приведены варианты компоновки расположения транзисторных модулей. Каждый вариант компоновки имеет свои достоинства и недостатки. Поэтому возникает задача определить, какой из заявленных вариантов является лучшим по некоторым интегральным показателям, которые определяются как требованиями к компоновке инвертора, обеспечивающей минимально возможную индуктивность ДС – шины питания силового моста, так и значениями тепловых нагрузок на силовые элементы при заданной передаваемой мощности.

При изучении физических процессов в конструкциях преобразовательной аппаратуры с помощью компьютерной симуляции возникает ряд проблем, связанных с построением геометрической модели для расчета, заданием граничных условий, выводом необходимых результатов и другими составляющими численного моделирования.

Рассмотрим основные этапы моделирования конструкции АИН для теплового анализа с использованием расчетов газогидродинамических процессов.

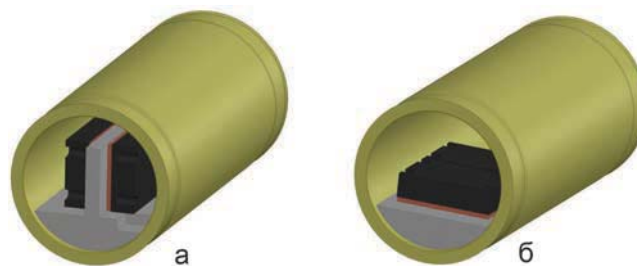


Рис. 2. Варианты компоновки транзисторных модулей на теплоотводящем радиаторе: а – установка силовых модулей инвертора на монтажном ребре радиатора; б – установка модулей на плоскости радиатора

На начальном этапе теплового расчета необходимо упростить геометрическую модель для уменьшения временных затрат на создание сетки конечных элементов и выполнения непосредственно самого расчета. Следует учитывать, что построение сетки происходит гораздо быстрее и она имеет более регулярную структуру на ровных поверхностях, без каких-либо выступов или отверстий, например отверстий для крепления деталей.

Исключение крепежных отверстий в модели, как правило, не оказывает заметного влияния на результаты расчета.

Второй шаг – выбор типа задачи. Все задачи в SolidWorks FlowSimulation делятся на внутренние и внешние. Внутренний тип анализа применяется, когда необходимо проследить механизм теплообмена устройства с окружающей средой. Внешний тип анализа применяют в основном для гидроаэродинамических задач обтекания тел внешней средой. Выбираем внутренний тип задачи. На этом этапе следует определить исходные параметры задачи – граничные условия, физические характеристики материалов. В качестве материала для всех конструктивных элементов инвертора принимаем сплав АМг5. В расчете учитывается теплообмен посредством теплопроводности всех компонентов, в том числе и рабочей среды внутри контейнера, в качестве которой выступает воздух. Задача решается в стационарной постановке с учетом гравитации.

При расчете внутренней задачи следует учитывать, что расчетная область заполняется текущей средой и ограничена стенками модели. Геометрическая модель должна быть полностью «герметична», все необходимые входные и выходные отверстия должны

быть заглушены. Также для задачи моделирования тепловых режимов выбор граничных условий включает определение доминирующих механизмов передачи тепла в различных частях конструкции. Так, при расчете отдачи тепла от поверхности радиатора из рассмотрения может быть исключена передача тепла излучением.

Качество численной модели в значительной степени зависит от настроек моделирующей программы, к которым относятся настройки сетки и параметров аппроксимации решения на сетке конечных элементов, а также параметры решателя. Важным условием расчетов является определение тепловых параметров на внешних гранях модели. Для этого служит опция Default outer wall thermal condition (внешняя тепловая стена по умолчанию). Эта опция определяет способ взаимодействия внешних стенок с окружающим пространством – теплообмен с внешней средой. Внешняя среда во внутренней задаче является условным объектом, ни при каких условиях не изменяющим своих параметров (температуры).

Например, если решается стационарная задача теплообмена для открытой конструкции без герметичной оболочки, то для опции Default outer wall thermal condition рекомендуется выбирать условие Wall temperature (температура на стенках). Если решается стационарная задача теплообмена для конструкции с герметичной оболочкой, будь то на воздухе или в воде, то для опции Default outer wall thermal condition следует выбирать условие Heat transfer coefficient (выбирать коэффициент теплообмена  $\alpha$ ) и External fluid temperature (внешняя температура текущей среды).

Теплообмен с окружающей средой происходит по закону Нью-

тона и зависит от типа внешней среды. Для свободной конвекции в воздухе и газах величина коэффициента  $\alpha = 5 \dots 100 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$ . Для корректного моделирования значение  $\alpha$  из указанного широкого диапазона необходимо уточнить, что возможно при использовании некоторых измерений в натуральных условиях.

Так, сопоставление результатов моделирования и натурального эксперимента позволило установить, что для воздушной среды в условиях естественной конвекции следует задавать коэффициент  $\alpha = 24 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$ , а не приведенный в руководстве по применению программы Flow Simulation  $\alpha = 5,5 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$ , при котором получаются завышенные результаты расчета температуры компонентов.

Для условия передачи тепла «спокойная вода – металлическая стенка» коэффициент теплообмена также изменяется в широких пределах и равен  $\alpha = 300 \dots 580 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$ ; для условия «текущая вода – металлическая стенка» коэффициент  $\alpha = 350 + 2100\sqrt{v}$ , где  $v$  – скорость потока, м/с; а для условия «кипящая вода – металлическая стенка» коэффициент  $\alpha = 3500 \dots 5800 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$ . В расчетах с водной средой коэффициент теплообмена принимался равным  $\alpha = 300 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$ , а начальная температура внешней среды и компонентов АИН задавалась в виде крайних значений принятого при моделировании температурного диапазона окружающей среды 4 °С и 28 °С.

Расчет выполнялся для двух вариантов компоновки, приведенных на рис. 2, при размещении контейнера с инвертором на воздухе и в воде при разных суммарных рассеиваемых мощностях. Для примера на рис. 3 приведены результаты моделирования режима стационарного теплообмена на воздухе для двух вариантов компо-

новки при суммарной мощности потерь в инверторе  $P_{\Sigma} = 180 \text{ Вт}$ .

Температура окружающего воздуха принята  $22 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , а давление внутри и снаружи контейнера равно нормальному атмосферному.

## 2. Результаты моделирования

Результаты исследования показывают, что при заданных исходных условиях для первого варианта компоновки (рис. 3, а) температура основания силового модуля достигает  $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , т.е. перегрев модуля относительно температуры окружающей среды составляет  $70 \text{ }^{\circ}\text{C} - 22 \text{ }^{\circ}\text{C} = 48 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ограничивая предельную допустимую температуру основания модуля значением  $90 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , можно определить соответствующую максимальную температуру  $T_{\text{ВОЗД.М.1}}$  окружающего воздуха, при которой инвертор работает в безопасном режиме на воздухе для случая рассеиваемой мощности потерь в инверторе  $180 \text{ Вт}$ . Значение этой температуры получается как разность между принятой максимальной допустимой температурой модуля и полученным значением перегрева модуля, т.е.

$$T_{\text{ВОЗД.М.1}} = 90 \text{ }^{\circ}\text{C} - 48 \text{ }^{\circ}\text{C} = 42 \text{ }^{\circ}\text{C}. \quad (1)$$

Учитывая, что по условиям эксплуатации верхняя граница температурного диапазона ограничена значением  $28 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , полученный результат содержит некоторый запас, который можно использовать путем задания увеличенного значения мощности потерь в инверторе. Таким образом, достигнув сбалансированного соотношения между мощностью потерь и допустимой температурой силового модуля инвертора, можно получить соответствующее значение передаваемой мощности в безопасном режиме и достижимое значение тока заряда аккумуляторной батареи, что в

конечном итоге позволит сделать заключение о необходимом интервале времени для осуществления полной зарядки аккумуляторной батареи при выбранных условиях.

Для второго варианта компоновки (рис. 3, б) температура основания модуля равна примерно  $55 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , т.е. перегрев модуля относительно температуры окружающей среды составляет  $55 \text{ }^{\circ}\text{C} - 22 \text{ }^{\circ}\text{C} = 33 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Максимальное значение температуры  $T_{\text{ВОЗД.М.2}}$  окружающего воздуха, при которой инвертор работает в безопасном режиме на воздухе для случая рассеиваемой мощности потерь в инверторе  $180 \text{ Вт}$ , можно получить как разность между принятой максимальной допустимой температурой модуля  $90 \text{ }^{\circ}\text{C}$  и полученным значением перегрева модуля, т.е.

$$T_{\text{ВОЗД.М.2}} = 90 \text{ }^{\circ}\text{C} - 33 \text{ }^{\circ}\text{C} = 57 \text{ }^{\circ}\text{C}. \quad (2)$$

Так же как и для первого варианта компоновки, полученный результат содержит некоторый за-

пас, который можно использовать путем задания увеличенного значения мощности потерь в инверторе при ограничении допустимой температуры нагрева основания модуля значением  $90 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Аналогичные исследования можно выполнить для размещения контейнера с инвертором в воде.

Результаты моделирования режима стационарного теплообмена в воде для двух вариантов компоновки при принятой суммарной мощности потерь в инверторе  $P_{\Sigma} = 360 \text{ Вт}$  приведены на рис. 4. Температура воды в этом примере принята равной минимальному значению  $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$  заданного температурного диапазона.

Как следует из сопоставления цветовых полей распределения температуры внутри контейнера и размерной шкалы, температура основания силового модуля инвертора для первого варианта компоновки (рис. 4, а) в наиболее нагретой зоне равна примерно  $55 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,

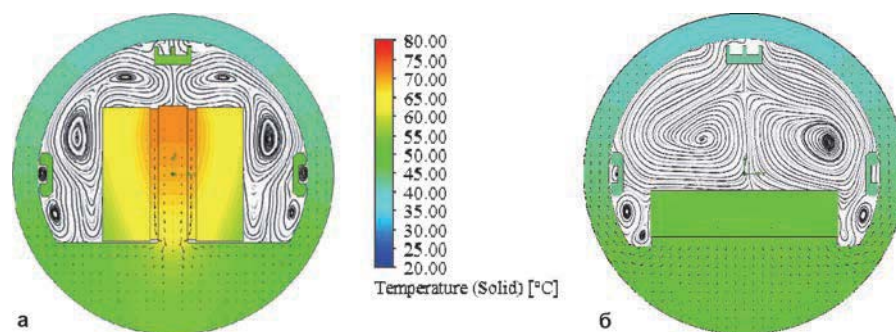


Рис. 3. Результаты моделирования режима стационарного теплообмена на воздухе для двух вариантов компоновок: а – компоновка модулей на монтажном ребре радиатора; б – размещение модулей на плоскости радиатора

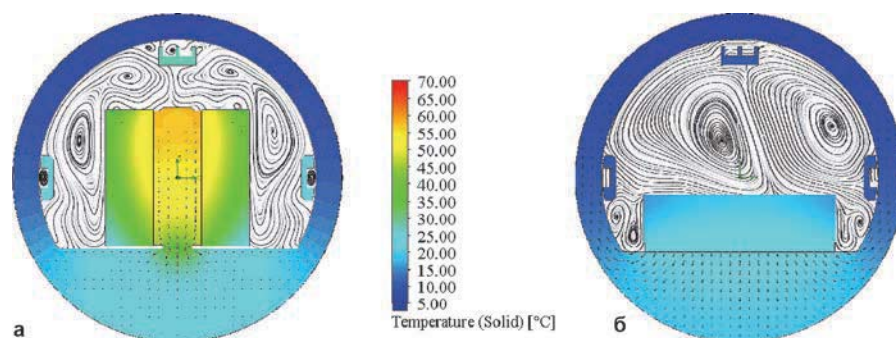


Рис. 4. Результаты моделирования режима стационарного теплообмена в воде для двух вариантов компоновок: а – компоновка по рис. 2, а; б – компоновка по рис. 2, б

а для второго варианта (рис. 4, б) температура основания модуля не превышает 25 °С.

Таким образом, для первого варианта компоновки инвертора перегрев модуля относительно температуры окружающей среды составляет  $55\text{ °С} - 4\text{ °С} = 51\text{ °С}$ , а для второго варианта перегрев равен  $25\text{ °С} - 4\text{ °С} = 21\text{ °С}$ . Ограничивая предельную допустимую температуру модуля также, как и при работе на воздухе, значением 90 °С, можно определить соответствующие значения  $T_{\text{ВОДА.М.1}}$  и  $T_{\text{ВОДА.М.2}}$  максимальной температуры окружающей воды, при которой инвертор работает в безопасном режиме в воде для случая рассеиваемой мощности потерь в инверторе 360 Вт для первого и второго вариантов компоновки соответственно.

Значение этой температуры получается как разность между принятой максимальной допустимой температурой модуля и полученным значением перегрева модуля, т.е.

$$T_{\text{ВОДА.М.1}} = 90\text{ °С} - 51\text{ °С} = 39\text{ °С}, \quad (3)$$

$$T_{\text{ВОДА.М.2}} = 90\text{ °С} - 21\text{ °С} = 69\text{ °С}. \quad (4)$$

По результатам расчетов на рис. 5 построены графики расчетных зависимостей средней температуры медного основания

(корпуса) транзисторного модуля от суммарной рассеиваемой тепловой мощности потерь двух модулей мостового инвертора для рассмотренных вариантов компоновок инвертора при его работе на воздухе и в воде. Температуры модулей приняты равными.

Эти зависимости имеют линейный вид и определяются выражением

$$T_K = T_{\text{ОКР.}} + R_t P_{\Sigma} \quad (5)$$

где  $T_K$ ,  $T_{\text{ОКР.}}$  – температура корпуса модуля и окружающей среды соответственно, °С;  $R_t$  – тепловое сопротивление перехода «основание модуля – радиатор», °С/Вт  $P_{\Sigma}$  – суммарная мощность потерь в модулях инвертора, Вт.

По выражению (5) можно определить значения теплового сопротивления для различных условий. Так, при работе инвертора на воздухе и компоновке по первому варианту (рис. 2, а) тепловое сопротивление  $R_{t,1-1} = 0,267\text{ °С/Вт}$ , а при компоновке по второму варианту  $R_{t,1-2} = 0,173\text{ °С/Вт}$ . При работе инвертора в воде компоновка по первому варианту дает результат  $R_{t,2-1} = 0,135\text{ °С/Вт}$ , а по второму варианту –  $R_{t,2-2} = 0,0486\text{ °С/Вт}$ . В итоге можно найти максимально допустимую мощность потерь  $P_{\Sigma\text{М.}}$  на модулях инвертора для различных условий работы. Напри-

мер, для максимального значения температуры окружающей среды из принятого диапазона работы инвертора ( $T_{\text{ОКР.}} = 28\text{ °С}$ ) можно получить следующие значения максимальной допустимой мощности потерь:

- работа на воздухе и первый вариант компоновки (рис. 2, а) дает значения  $P_{\Sigma\text{М.1-1}} = 232\text{ Вт}$ , а для второго варианта компоновки (рис. 2, б) –  $P_{\Sigma\text{М.1-2}} = 358\text{ Вт}$ ;

- при работе в воде и первом варианте компоновки (рис. 2, а)  $P_{\Sigma\text{М.2-1}} = 459\text{ Вт}$ , для второго варианта (рис. 2, б) –  $P_{\Sigma\text{М.2-2}} = 1276\text{ Вт}$ ;

С учетом того, что результирующий КПД системы бесконтактного заряда равен примерно 65%, по полученным значениям допустимой мощности потерь можно определить мощность, подводимую к выводам аккумуляторной батареи, и при заданном номинальном напряжении батареи определить ток заряда и время заряда батареи. Так, для батареи 14ЛИКГП-150С с номинальным напряжением 58,8 В максимальный ток заряда при работе инвертора на воздухе с температурой 28°С и принятой компоновкой инвертора по второму варианту ограничен значением 17,4 А. При номинальном токе заряда 60 А такое ограничение вызовет увеличение времени заряда примерно в 3,5 раза. Для компоновки по первому варианту ток заряда не должен превышать 11,3 А, а время заряда батареи при этом увеличится более чем в 5 раз. Полученные результаты доказывают преимущество второго варианта компоновки.

Аналогично можно определить ожидаемые характеристики заряда при работе инвертора в воде. Используя указанный выше КПД системы и полученное значение максимально допустимых потерь в инверторе  $P_{\Sigma\text{М.2-2}} = 1276\text{ Вт}$ , можно определить мощность, подводимую к выводам аккумулятор-

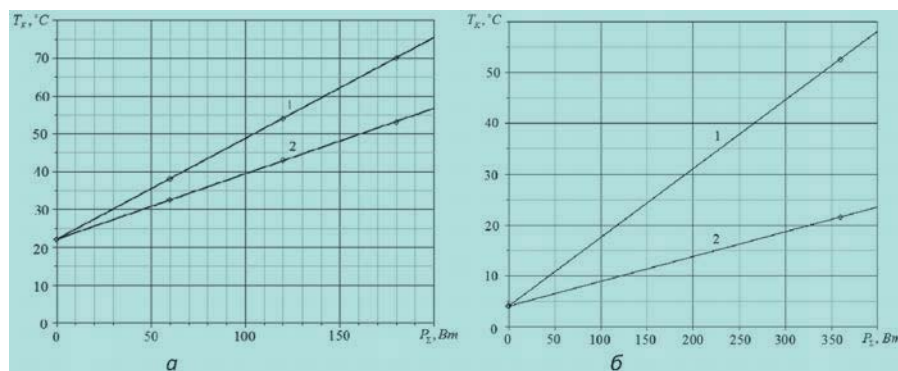


Рис. 5. Зависимости средней температуры корпуса транзисторного модуля от суммарной рассеиваемой мощности: а – на воздухе с температурой 22 °С для двух вариантов компоновок: 1 – для компоновки рис. 2, а; 2 – для компоновки рис. 2, б; б – в воде с температурой 4 °С для двух вариантов компоновок: 1 – для компоновки рис. 2, а; 2 – для компоновки рис. 2, б

ной батареи:  $P = 1276 / (1 - 0,65) = 3645$  Вт. Это обеспечит ток заряда 62 А и осуществление заряда батареи за время, не превышающее номинальное.

Приведенные характеристики заряда соответствуют температуре корпуса силового модуля инвертора 90°C. Температура кристалла модуля при этом может ожидать на уровне (100 ... 105) °С, что является допустимым значением (максимальная температура кристалла 150°C).

Отметим также, что приведенные соотношения получены для верхнего значения 28°C заданного температурного диапазона окружающей среды, т.е. соответствуют наиболее тяжелым условиям работы.

Известно, что внешнее давление значительно влияет на процессы теплообмена, поэтому представляет интерес оценка количественных характеристик теплоотдачи при погружении его под воду.

Коэффициент теплообмена при внешнем давлении, отличающемся от нормального, имеет вид:

$$\alpha_K^0 = \alpha_K \sqrt{P/P_0}, \quad (6)$$

где  $\alpha_K^0$ ,  $\alpha_K$  – коэффициенты теплообмена внешней стенки контейнера с окружающей водой при расположении контейнера в поверхностном слое и на некоторой глубине соответственно;  $P$  – давление окружающей воды;  $P_0$  – нормальное атмосферное давление.

При погружении АИН в контейнере на глубину порядка 300 м гидростатическое давление равно  $P \approx 30$  кг/см<sup>2</sup>. Следовательно,  $\alpha_K^0$  увеличится ориентировочно в 5,5 раз, и охлаждение оболочки АИН в этом случае должно возрасти. Результаты моделирования теплообмена при нахождении АИН на поверхности воды (глубина 1 м – коэффициент теплообмена  $\alpha_K^0 = 315$  Вт/м<sup>2</sup>К) и на глубине 300 м

(коэффициент  $\alpha_K^0 = 1650$  Вт/м<sup>2</sup>К) для второго варианта компоновки (рис. 2, б) приведены на рис. 6, а и б, б соответственно. Температура воды принималась независимой от глубины и в обоих случаях составляла 4 °С. Суммарные потери мощности в модулях инвертора, как и в рассмотренных выше примерах, приняты равными 360 Вт.

Сопоставление цветовой температурной шкалы и полей температур на рис. 6 показывает, что температура корпуса (основания) модуля при работе инвертора в поверхностном слое воды равна 20°C, а при осуществлении бесконтактного заряда аккумуляторной батареи на глубине 300 м температура корпуса модуля не превышает 15°C.

### 3. Эксперименты

Для оценки адекватности исследуемой математической модели и степени достоверности полученных результатов была разработана и собрана лабораторная установка, представленная комплектом измерительных приборов и емкостью с водой, в которую помещался контейнер с инвертором и высокочастотным трансформатором. Объем воды составлял около 500 литров, что позволяло проводить эксперименты при практически неизменных внешних условиях. Внешний вид и размещение исследуемых блоков в емкости, заполняемой водой, показан на рис. 7.

Эксперименты проводились при следующих условиях:

- компоновка инвертора выполнена по первому варианту;
- мощность, подводимая ко входу инвертора, – 1320 Вт;
- мощность потерь в выпрямителе и высокочастотном трансформаторе 29 Вт;
- температура воды 20,6°C;

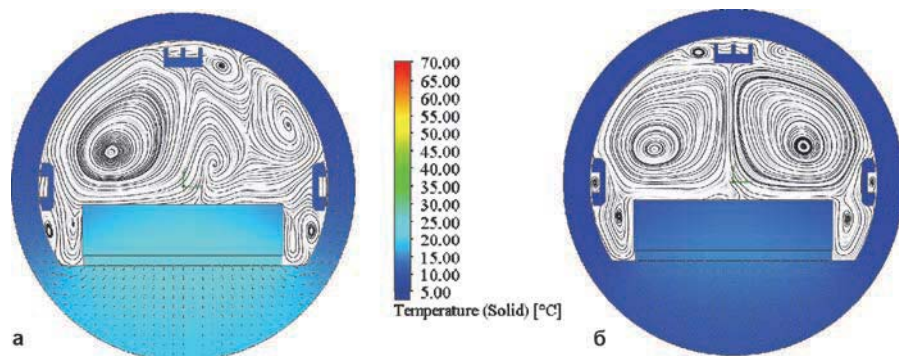


Рис. 6. Результаты моделирования режима стационарного теплообмена в воде: а – глубина погружения контейнера 1 м; б – глубина погружения контейнера 300 м

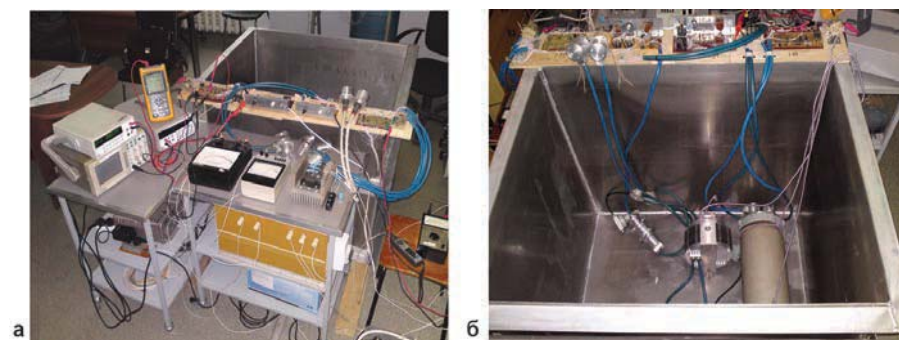


Рис. 7. Лабораторная установка для проведения тепловых испытаний инвертора в натуральных условиях: а – общий вид; б – размещение контейнера с инвертором и высокочастотного трансформатора в емкости

– мощность потерь в инверторе 269 Вт;

– измеренное значение температуры корпуса модуля равно  $T_k = 70^\circ\text{C}$ .

Значение результирующего теплового сопротивления перехода «корпус модуля – окружающая среда» можно определить с помощью выражения (5):

$$R_t = \frac{T_k - T_{\text{ОКР.}}}{P_\Sigma} = \frac{70 - 20,6}{269} = 0,184^\circ\text{C}/\text{Вт}. \quad (7)$$

В математической модели для аналогичных условий получено значение теплового сопротивления  $R_{t,2-1} = 0,135^\circ\text{C}/\text{Вт}$ , т.е. отличие

результата натурального эксперимента от компьютерного достигает 26,6%, что следует признать удовлетворительным. Этот результат ожидаемый, и полученное отличие хорошо объясняется разными условиями передачи тепла от поверхности радиатора к внутренней стенке контейнера, принятыми в модели и реализованными в реальной конструкции инвертора.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в вычислительных экспериментах оценки тепловых нагрузок на модули инвертора позволяют на начальной стадии проектирования решить вопросы рациональной компоновки

инвертора при его размещении в прочном контейнере ограниченного объема. Важным результатом компьютерного исследования являются рекомендации по выбору настроечных коэффициентов и параметров решения задачи, сочетающих необходимую точность и приемлемое время решения. Рассмотренный подход к теплофизическому моделированию режимов работы силовых преобразователей найдет применение в последующих разработках различных вариантов систем бесконтактной передачи электроэнергии и заряда аккумуляторных батарей автономных необитаемых подводных аппаратов.

### ЛИТЕРАТУРА

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 (16). С. 24–32.
2. Алямовский А. А. SolidWorksSimulation. Как решать практические задачи. СПб.: БХВ-Петербург, 2012. 448 с.
3. Flow Simulation 2009 Tutorial. URL: [http://mecanica.eafit.edu.co/~sorrego/Tutoriales\\_Solid\\_Flow\\_Sim09/Tutorial.pdf](http://mecanica.eafit.edu.co/~sorrego/Tutoriales_Solid_Flow_Sim09/Tutorial.pdf)
4. Шлыков Ю. П., Ганин Е. А., Царевский С. Н. Контактное термическое сопротивление. М.: Энергия, 1977. 328 с.
5. Дульнев Г. Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре: учебник для вузов по специальности «Конструирование и производство радиоаппаратуры». М.: Высшая школа, 1984. 247 с.

