

УДК 004.272.43

doi 10.26089/NumMet.v17r111

РЕКОНФИГУРИРУЕМАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ ПЛИС С ЖИДКОСТНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

И. И. Левин¹, А. И. Дордопуло², Ю. И. Доронченко³,
М. К. Раскладкин⁴, А. М. Федоров⁵

Статья посвящена проблемам построения перспективных реконфигурируемых вычислительных систем с жидкостным охлаждением для программируемых логических интегральных схем семейства Xilinx Virtex UltraScale. Рассматриваются архитектура, компоновка и сравнительные технические характеристики систем погружного жидкостного охлаждения. Приводятся результаты расчетов, макетирования и экспериментальной проверки основных технических решений созданного вычислительного модуля нового поколения для построения высокопроизводительных вычислительных систем с жидкостным охлаждением с производительностью 1 Пфлопс в стандартном вычислительном шкафу высотой 47U при потребляемой мощности 150 кВт. Реконфигурируемая вычислительная система с жидкостным охлаждением обеспечивает существенное преимущество по таким технико-экономическим параметрам, как реальная и удельная производительность, энергоэффективность, массогабаритные характеристики и другим по сравнению с аналогичными системами.

Ключевые слова: реконфигурируемые вычислительные системы, программируемые логические интегральные схемы, жидкостное охлаждение, вычислительный модуль, высокопроизводительные вычислительные системы, реальная и удельная производительность, энергоэффективность.

1. Введение. Одним из перспективных способов достижения высокой реальной производительности вычислительной системы является адаптация ее архитектуры под структуру решаемой задачи, а также создание специализированного вычислительного устройства, аппаратно реализующего все вычислительные операции информационного графа задачи с наименьшими задержками. Естественным требованием к современной вычислительной системе является аппаратная поддержка возможности изменения как алгоритма решаемой задачи, так и самой задачи, что обуславливает применение программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) в качестве основного вычислительного ресурса реконфигурируемых вычислительных систем (РВС) [1]. В Научно-исследовательском центре суперЭВМ и нейрокомпьютеров (НИЦ СЭ и НК, г. Таганрог) разрабатываются и производятся РВС класса суперЭВМ, в которых основным вычислительным ресурсом являются не микропроцессоры, а множество кристаллов ПЛИС, объединенных в вычислительные поля высокоскоростными каналами передачи данных. Спектр выпускаемых и проектируемых изделий достаточно широк: от полностью автономных малогабаритных реконфигурируемых ускорителей (вычислительных блоков), вычислительных модулей в настольном или стоечном конструктивном исполнении ("Ригель" на основе Xilinx Virtex-6 и "Тайгета" на основе Xilinx Virtex-7) до вычислительных систем, состоящих из нескольких вычислительных шкафов, размещаемых в специально оборудованном машинном зале (РВС-7).

РВС, содержащие большие вычислительные поля ПЛИС, находят применение при решении вычислительно трудоемких задач в различных областях науки и техники, поскольку обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с многопроцессорными вычислительными системами кластерной архитектуры: высокими реальной и удельной производительностями, высокой энергоэффективностью и

¹ Научно-исследовательский центр супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров, пер. Итальянский, 106, 347900, г. Таганрог; директор, e-mail: levin@superevm.ru

² Научно-исследовательский институт многопроцессорных вычислительных систем имени академика А. В. Каляева, Южный федеральный университет, ул. Чехова, 2, 347928, г. Таганрог; зав. лабораторией, e-mail: scorpio@mvs.tsure.ru

³ Научно-исследовательский центр супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров, пер. Итальянский, 106, 347900, г. Таганрог; технический директор, e-mail: doronchenko@superevm.ru

⁴ Научно-исследовательский центр супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров, пер. Итальянский, 106, 347900, г. Таганрог; начальник отдела, e-mail: niimvs@yandex.ru

⁵ Научно-исследовательский центр супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров, пер. Итальянский, 106, 347900, г. Таганрог; главный теплотехник, e-mail: niimvs@yandex.ru

др. Основной отличительной особенностью производимых в НИЦ СЭ и НК РВС является высокая плотность компоновки элементов, достигаемая за счет использования инновационной технологии воздушного охлаждения. Это, в свою очередь, обеспечивает высокую удельную энергоэффективность данных систем. Так, вычислительный модуль (ВМ) “Орион” и ВМ “Ригель-2” [2] на основе ПЛИС Xilinx Virtex-6 имеют удельную энергоэффективность 1.15 Гфлопс/Ватт потребляемой мощности, а ВМ “Тайгета” и ВМ “Плеяда” [3] на основе ПЛИС Xilinx Virtex-7 — уже 2 Гфлопс/Ватт.

В создаваемых НИЦ СЭ и НК изделиях используются одни из наиболее производительных ПЛИС семейства, для которых, начиная с семейства Xilinx Virtex-2, соблюдается правило увеличения степени интеграции, как минимум, в два раза и частоты в 1,25 раза при переходе к следующему семейству. Эта закономерность естественным образом приводит к росту потребляемой кристаллом ПЛИС мощности и к увеличению максимального значения температуры на кристалле. Так, для ПЛИС XC6VLX240T-1FFG1759С ВМ “Ригель-2” максимальный перегрев ПЛИС относительно комнатной температуры 25°С в рабочем режиме с потребляемой ВМ мощностью 1255 Вт составляет 33,1°С, т.е. максимальная температура кристалла ПЛИС ВМ “Ригель-2” составляет 58,1°С. Для ПЛИС XC7VX485T-1FFG1761С ВМ “Тайгета” максимальный перегрев ПЛИС относительно комнатной температуры 25°С в рабочем режиме с потребляемой ВМ мощностью 1661 Вт составляет уже 47,9°С, т.е. максимальная температура кристалла ПЛИС ВМ “Тайгета” составляет 72,9°С. Если принять во внимание, что допустимая температура работы ПЛИС составляет 65–70°С, то очевидно, что для нормальной и безопасной для оборудования эксплуатации ВМ “Тайгета” необходим специально охлажденный до 15°С воздух в кондиционируемом шкафу.

Согласно полученным экспериментальным данным переход от семейства ПЛИС Virtex-6 к следующему семейству ПЛИС Virtex-7 ведет к росту максимальной температуры ПЛИС на 11–15°С. Поэтому дальнейшее развитие технологий изготовления ПЛИС и переход на следующее семейство ПЛИС Virtex Ultra Scale приведет к росту величины перегрева ПЛИС на дополнительные 10–15°С, что сместит зону их рабочей температуры до 80–85°С с выходом за допустимые пределы рабочей температуры ПЛИС (65–70°С), что негативно скажется на их надежности.

Практический опыт эксплуатации больших вычислительных комплексов на основе ВМ РВС показывает, что воздушные системы охлаждения подошли к своему тепловому пределу. Поэтому использование воздушного охлаждения при переходе к следующему поколению ПЛИС Virtex UltraScale, содержащих порядка 100 миллионов эквивалентных вентиляей и обладающих энергопотреблением не менее 100 Вт на кристалл ПЛИС, не позволяет обеспечить стабильную и надежную работу РВС при заполнении кристаллов на 85–95% от доступного аппаратного ресурса. Это обстоятельство потребовало перехода к принципиально иному способу охлаждения, позволившему сохранить темпы роста производительности РВС для перспективных проектируемых семейств ПЛИС фирмы Xilinx: Virtex UltraScale, Virtex UltraScale+, Virtex UltraScale2 и др.

2. Жидкостное охлаждение для реконфигурируемых вычислительных систем. Развитие вычислительных технологий приводит к разработке все более производительной в плане вычислительной мощности, а значит и более тепловыделяющей вычислительной техники. Утилизация выделяемого тепла осуществляется системой охлаждения электронных компонентов, которая реализует перенос тепла от более горячего тела (охлаждаемый объект) к менее горячему (система охлаждения). При постоянном нагреве охлаждаемого объекта температура системы охлаждения повышается и со временем сравняется с температурой охлаждаемого объекта, передача тепла прекратится, что вызовет его перегрев. Система охлаждения защищается от перегрева с помощью холодного вещества — хладагента (теплоносителя), характеристикой эффективности охлаждения которого являются теплоемкость и теплоотдача. Перенос тепла, как правило, осуществляется либо с помощью механизма теплопроводности, требующего физического контакта теплоносителя с охлаждаемым объектом, либо с помощью механизма конвективного теплообмена с хладагентом, который связан с физическим переносом свободно циркулирующего охлаждающего вещества.

Для организации переноса тепла к хладагенту необходимо организовать тепловой контакт системы охлаждения с хладагентом. Для этого применяют различные радиаторы — устройства для рассеивания тепла в хладагенте, которые устанавливаются на наиболее нагреваемые компоненты вычислительных систем. Для повышения эффективности переноса тепла от электронного компонента к радиатору между ними устанавливается термоинтерфейс — слой теплопроводящего состава (обычно многокомпонентного) между охлаждаемой поверхностью и отводящим тепло устройством, применяемый для уменьшения термического сопротивления между двумя соприкасающимися поверхностями. Современные процессоры и ПЛИС нуждаются в охлаждающих устройствах с как можно более низким термическим сопротивлением, так как в настоящий момент даже самые продвинутые радиаторы и термоинтерфейсы не справляются с

этой задачей при воздушном охлаждении.

Системы воздушного охлаждения достаточно успешно использовались для охлаждения суперкомпьютеров до 2012 г. С ростом мощности и степени интеграции применяемых кристаллов микропроцессоров и ПЛИС использование воздушных систем охлаждения для разрабатываемых перспективных суперкомпьютеров, в том числе вычислительных систем гибридного типа, практически достигло своего предела. Поэтому большинство разработчиков вычислительной техники видит выход в применении систем жидкостного охлаждения, которые на сегодняшний день представляются наиболее перспективной областью разработки для охлаждения современных высоконагруженных электронных компонентов вычислительных систем. Существенным преимуществом всех жидкостных схем охлаждения являются лучшая теплоемкость жидкостей по сравнению с воздухом (от 1500 до 4000 раз) и больший коэффициент теплоотдачи (увеличение до 100 раз). Для охлаждения одного современного кристалла ПЛИС необходимо наличие 1 м^3 воздуха или $0,00025 \text{ м}^3$ (250 мл) воды в минуту. На перекачивание 250 мл воды тратится намного меньше электроэнергии, чем для перекачивания 1 м^3 воздуха. Тепловой поток, передаваемый одинаковыми поверхностями при традиционных скоростях теплоносителя, при жидкостном охлаждении в 70 раз больше, чем при воздушном охлаждении. Дополнительным преимуществом является использование традиционных, достаточно надежных и недорогих рабочих элементов (насосы, теплообменники, клапаны, механизмы управления и т.д.). Для организаций, которые работают с высокой плотностью оборудования при высоких тепловых режимах, жидкостное охлаждение по существу оказывается единственным решением проблемы организации охлаждения современных вычислительных систем. Дополнительными резервами повышения эффективности жидкостного охлаждения является улучшение исходных параметров теплоносителя: увеличение скорости, снижение температуры, создание турбулентного режима течения, повышение теплоемкости, снижение вязкости.

В жидкостных системах охлаждения вычислительной техники роль хладагента выполняет жидкость (вода либо диэлектрические жидкости). Нагретые электронные компоненты отдают тепло постоянно циркулирующему хладагенту — жидкости, которая после ее охлаждения во внешнем теплообменнике вновь поступает для охлаждения нагретых электронных компонентов. Жидкостные системы охлаждения можно разделить на системы закрытого типа, где нет прямого контакта между жидкостью и электронными компонентами на печатных платах, и системы открытого типа (погружные), в которых жидкость непосредственно омывает электронные компоненты. Каждый тип систем жидкостного охлаждения имеет свои достоинства и недостатки.

В системах закрытого типа все тепловыделяющие элементы печатной платы накрываются одним или несколькими плоскими пластинами с каналом для прокачки жидкости. Так, например, в суперкомпьютере “СКИФ-Аврора” использовался принцип “одна охлаждающая пластина на одну печатную плату”. Соответственно, пластина имела сложный рельеф, чтобы иметь плотный тепловой контакт с каждой микросхемой. В суперкомпьютере IBM Aquasar используется принцип “одна охлаждающая пластина на одну (горячую) микросхему”. В любом случае каналы пластин объединяются коллекторами в единый контур, соединенный с общим радиатором (или другим теплообменником), обычно расположенным за пределами корпуса и/или шкафа или даже машинного зала. С помощью насоса через пластины прокачивается теплоноситель, который отводит тепло от элементов вычислителя и рассеивает его через теплообменник. В такой системе требуется обеспечить доступ теплоносителя к каждому тепловыделяющему элементу вычислителя, что означает довольно сложную “трубопроводную систему”, большое количество герметичных соединений. При этом требования к возможности обслуживания печатных плат без серьезного демонтажа в системе охлаждения неизбежно означают применение специальных жидкостных разъемов, которые обеспечат герметичность соединений с одновременной легкостью операций по сборке/разборке системы.

В системах жидкостного охлаждения закрытого типа можно в качестве хладагента использовать обычную воду или растворы гликолей. Однако утечка теплоносителя может привести к возможному попаданию электропроводной жидкости на незащищенные контакты рабочих плат охлаждаемого компьютера, что, в свою очередь, может быть фатальным как для отдельных электронных компонентов, так и для вычислительной системы в целом. Для устранения неисправности требуются остановка всего комплекса, проверка системы электропитания и ее просушка. В системах управления и мониторинга таких компьютеров всегда предусматривают многочисленные внутренние датчики влажности и протечек. Для решения проблемы протечек часто используется метод, основанный на использовании в системе охлаждения отрицательного давления воды, когда вода не накачивается под давлением, а высасывается, что практически исключает утечку влаги. При нарушении герметичности в систему охлаждения попадет воздух, а вода оттуда не вытечет. Для детектирования утечек используются специальные датчики, а модульная конструкция позволяет осуществлять ремонт без прерывания работы системы в целом. Однако

все эти мероприятия значительно усложняют конструкцию гидравлической системы.

Еще одна проблема систем жидкостного охлаждения закрытого типа — проблема “точки росы”. Воздух центра обработки данных (ЦОД) входит в контакт с пластинами охлаждения. Это значит, что если какие-то участки этих пластин слишком холодные, а воздух в ЦОД более теплый и не слишком сухой, то на пластинах может сконденсироваться влага. Последствия этого процесса аналогичны последствиям протечек. Проблема решается либо переходом на охлаждение горячей водой, что неэффективно, либо контролем и поддержанием параметров температуры и влажности воздуха в ЦОД, что сложно и дорого.

Конструкция еще более усложняется, когда необходимо охладить несколько компонентов потоком воды, пропорциональным их тепловыделению. Не считая разветвленных трубок, приходится применять сложные регулирующие приборы (простыми тройниками и крестовинами не обойдешься). Альтернативный вариант — использовать конструкцию с заводскими регулировками потоков; но в этом случае пользователь лишен возможности существенно изменить конфигурацию охлаждаемых вычислительных модулей.

К достоинствам систем жидкостного охлаждения закрытого типа относятся:

- возможность использования в качестве хладагента воды или водных растворов, преимуществами которых является доступность, прекрасные теплотехнические свойства (теплопроводность, теплоемкость, вязкость), простота и сравнительная безопасность эксплуатации;

- наличие большого числа унифицированных механизмов, узлов и деталей для систем водоснабжения, которые можно использовать;

- большой опыт эксплуатации систем с водяным охлаждением в промышленности.

При этом системы жидкостного охлаждения закрытого типа обладают целым рядом существенных недостатков, сдерживающих их массовое применение:

- сложностью определения места утечки воды;

- зачастую катастрофическими последствиями не обнаруженных своевременно протечек;

- технологическими сложностями ликвидации протечек (необходимость отключения всего вычислительного шкафа, что не всегда возможно и удобно);

- необходимостью поддержания микроклимата помещения вычислительного зала (проблема “точки росы”);

- проблемой охлаждения остальных элементов на плате вычислительного модуля PBC; даже при небольшом изменении конфигурации PBC необходимо изготавливать новый теплообменник;

- проблемой электрохимической коррозии при использовании алюминиевых теплообменников либо массогабаритными ограничениями при использовании более устойчивых медных теплообменников (алюминий в три раза легче меди);

- необходимостью удаления воздуха из системы охлаждения как при пусконаладке, так и в процессе эксплуатации;

- сложностью компоновки вычислительных модулей в шкафу при большом количестве фитингов, необходимых для подключения каждого вычислительного модуля;

- необходимостью использования специализированного вычислительного шкафа со значительными массогабаритными характеристиками.

В системах жидкостного охлаждения открытого типа основным компонентом является хладагент, представляющий собой диэлектрическую жидкость, как правило, на основе белого минерального масла, благодаря которому теплоаккумулирующая способность хладагента гораздо выше, чем у воздуха при том же объеме. Конструктивно такие системы представляют собой заполненную хладагентом ванну (в том числе устанавливаемую в вычислительном шкафу), в которой размещаются печатные платы и серверы вычислительного оборудования. Выделяемое электронными компонентами тепло рассеивается циркулирующим в пределах всего объема ванны хладагентом. Достоинствами погружной системы охлаждения являются простота конструкции и адаптация под меняющуюся геометрию печатных плат, отсутствие сложной системы коллекторов и жидкостных разъемов, отсутствие проблем управления потоками жидкости и проблем “точки росы”, повышение надежности и снижение стоимости изделия.

Основная проблема систем жидкостного охлаждения открытого типа заключается в химическом составе используемого хладагента, который должен удовлетворять жестким требованиям по теплопроводности, электропроводности, вязкости, токсичности, пожаробезопасности, стабильности основных параметров и при этом стоимость жидкости должна быть разумной.

Системы жидкостного охлаждения открытого типа обладают следующими преимуществами:

- нечувствительностью к протечкам и их последствиям, возможностью эксплуатации системы даже при наличии местных протечек хладагента;

- нечувствительностью к климатическим характеристикам помещения вычислительного зала;
- решением проблемы охлаждения остальных элементов РВС, так как плата вычислительного модуля погружена в хладагент;
- возможностью изменения конфигурации платы вычислительного модуля без изменения системы охлаждения;
- простотой гидравлической балансировки системы благодаря отсутствию сложной системы коллекторов;
- возможностью использования как унифицированных механизмов, узлов и деталей для гидравлических систем общего машиностроения, так и накопленного опыта эксплуатации электрооборудования с использованием трансформаторных масел;
- повышением общей надежности системы жидкостного охлаждения.

Недостатками систем жидкостного охлаждения открытого типа являются:

- необходимость дополнительного насосного и теплообменного оборудования для улучшения теплотехнических свойств (теплопроводность, теплоемкость, вязкость) хладагента, в роли которого используются специальные диэлектрические органические жидкости;
- необходимость обучения обслуживающего персонала и соблюдение повышенных мер безопасности при работе с хладагентом;
- необходимость более частой очистки помещения машинного зала из-за высокой проникающей способности хладагента, особенно в случае протечки;
- необходимость специальной оснастки для регламентных и аварийных эксплуатационных операций (монтаж/демонтаж вычислительного модуля, залив/слив хладагента и т.д.);
- повышение стоимости эксплуатации из-за необходимости регулярной замены хладагента по истечении срока службы и необходимость организации учета (транспортирование, прием, учет, хранение, выдача, утилизация хладагента и др.) хладагента в организации.

Оценивая приведенные достоинства и недостатки двух систем жидкостного охлаждения, можно с достаточной степенью уверенности отметить более весомые преимущества систем жидкостного охлаждения электронных компонентов вычислительных систем открытого типа. Поэтому для вычислительных модулей РВС, проектируемых на основе перспективных семейств ПЛИС, целесообразно использовать жидкостное охлаждение, в частности, непосредственное погружение плат вычислительных модулей в жидкостный хладагент на основе минерального масла.

Технологии жидкостного охлаждения серверов и отдельных вычислительных модулей в настоящее время разрабатывают многие компании, некоторые из них добились определенных успехов в данном направлении. Одной из наиболее известных в России разработок в данной области является технология непосредственного жидкостного охлаждения IMMERS [4], разработанная группой отечественных компаний «СТОПУС» и Института программных систем им. А.К. Айламазяна РАН. На основе данной технологии создан ряд решений в области компактных суперкомпьютеров, обладающих определенными достоинствами. Однако данная технология предназначена для охлаждения вычислительных модулей, содержащих один-два микропроцессора, а предпринятые попытки ее адаптации для охлаждения вычислительных модулей, содержащих большое число тепловыделяющих элементов (поле ПЛИС из восьми кристаллов), выявили ряд недостатков [5] для жидкостного охлаждения вычислительных модулей РВС. Особенностью выпускаемых в Научно-исследовательском центре суперЭВМ и нейрокомпьютеров РВС является наличие не менее 6–8 кристаллов ПЛИС на одной печатной плате и высокая плотность компоновки платы, что существенно увеличивает число тепловыделяющих элементов по сравнению с микропроцессорными модулями. Это затрудняет применение как технологии непосредственного жидкостного охлаждения IMMERS, так и других готовых решений погружных систем и требует дополнительных технических и конструктивных решений для эффективного охлаждения вычислительных модулей РВС.

3. Реконфигурируемая вычислительная система на основе ПЛИС Xilinx UltraScale. В этой связи с 2013 г. в НИЦ СЭ и НК активно развивается направление по созданию РВС нового поколения на основе собственной системы жидкостного охлаждения для печатных плат с высокой степенью компоновки и большим количеством тепловыделяющих электронных компонентов. В основу критериев проектирования вычислительного модуля (ВМ) нового поколения для РВС с жидкостным охлаждением открытого типа были положены следующие принципы:

- основой конфигурации вычислительного шкафа является вычислительный модуль с размерами 3U на 19" и автономной циркулирующей охлаждающей жидкости;
- в одном вычислительном шкафу стандартной высоты 47U должно размещаться не менее 12 вычислительных модулей с жидкостным охлаждением;

- в одном вычислительном модуле должно размещаться 12–16 плат с установленными на них кристаллами ПЛИС;
- на каждой печатной плате должно быть размещено до восьми ПЛИС с выделяемым тепловым потоком порядка 100 Вт от каждой ПЛИС;
- для охлаждения жидкости должна использоваться традиционная система водяного охлаждения на базе промышленных чиллеров.

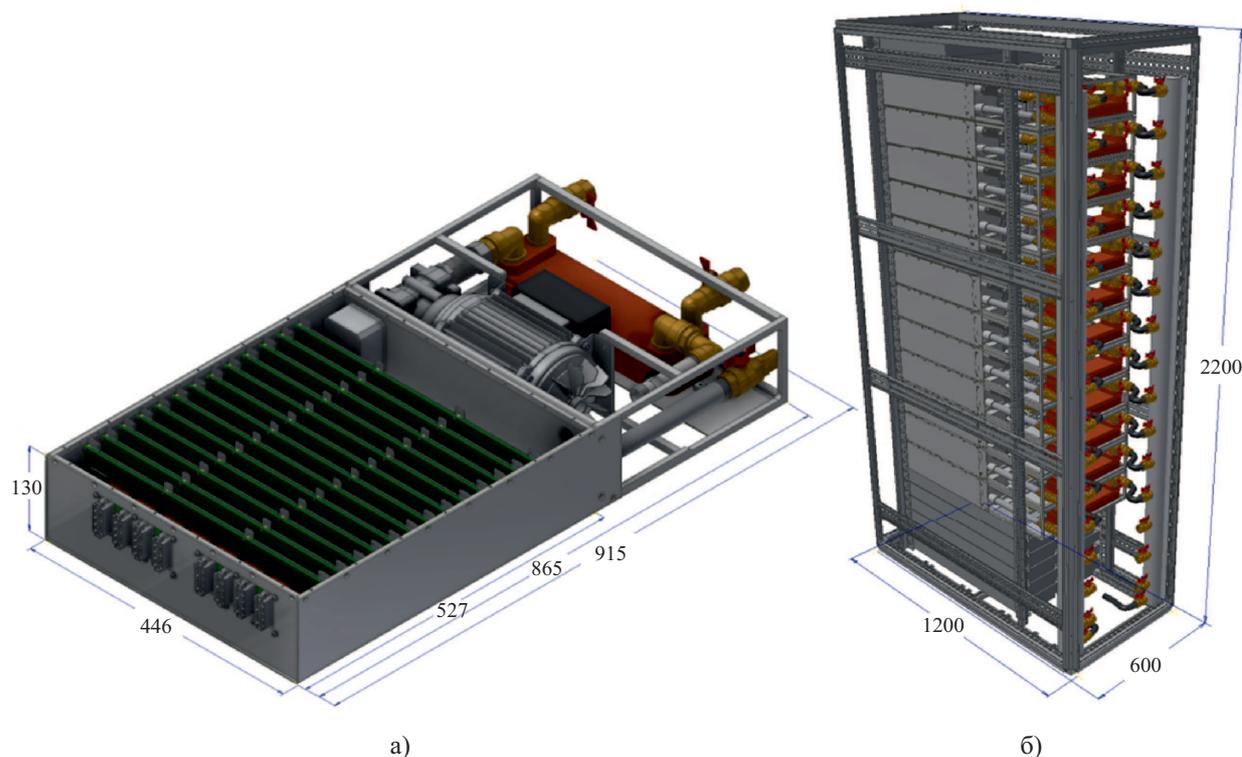


Рис. 1. Эскиз вычислительной системы на основе жидкостного охлаждения:
а) эскиз ВМ нового поколения, б) эскиз вычислительного шкафа

Основным элементом модульной реализации погружной системы жидкостного охлаждения электронных компонентов вычислительных систем открытого типа является реконфигурируемый вычислительный модуль нового поколения, эскиз которого представлен на рис. 1а. ВМ нового поколения состоит из вычислительной секции, теплообменной секции, корпуса, насоса, теплообменника и штуцера. В корпусе, образующем основу вычислительной секции, размещены герметичный контейнер с диэлектрической охлаждающей жидкостью, содержащий электронные устройства с компонентами, которые выделяют тепло в процессе работы. В качестве электронных устройств могут быть вычислительные модули (не менее 12–16), платы управления, ОЗУ, блоки питания, накопители, дочерние платы и др. Сверху вычислительная секция закрыта крышкой.

К вычислительной секции примыкает теплообменная секция, содержащая насос и теплообменник. Насос обеспечивает циркуляцию хладагента в ВМ по следующему замкнутому контуру: из вычислительного модуля нагретый хладагент поступает в теплообменник, охлаждается там, из теплообменника охлажденный хладагент вновь поступает в вычислительный модуль, охлаждает там нагретые электронные компоненты, там же нагревается и затем вновь поступает в теплообменник и т.д. Теплообменник подключен к внешнему теплообменному контуру через штуцеры и предназначен для охлаждения хладагента с помощью вторичной охлаждающей жидкости. В качестве теплообменника можно использовать пластинчатый теплообменник, в котором первичный и вторичный контуры разделены между собой. Тогда в качестве вторичной охлаждающей жидкости можно использовать обыкновенную воду, охлаждаемую промышленным чиллером. При этом чиллер может располагаться вне здания серверной и соединяться с реконфигурируемыми вычислительными модулями через стационарную систему инженерных коммуникаций. Эскиз вычислительного шкафа с установленными ВМ представлен на рис. 1б.

Вычислительная и теплообменная секции механически соединены между собой, образуя единый реконфигурируемый вычислительный модуль. Для эксплуатации реконфигурируемого вычислительного мо-

для требуется подключение к источнику вторичной охлаждающей жидкости (через краны), к источнику энергоснабжения и к сетевому концентратору (через электрические разъемы).

В корпусе вычислительного шкафа ВМ размещены друг над другом. Их количество ограничивается линейными размерами шкафа, техническими возможностями помещения вычислительного зала и подводимых инженерных коммуникаций. Каждый ВМ вычислительного шкафа подключается к источнику вторичной охлаждающей жидкости с помощью подающих обратных коллекторов через штуцеры (или балансировочные клапаны) и гибкие трубопроводы; подключение к источнику энергоснабжения и сетевому концентратору осуществляется через электрические разъемы. Через штуцеры (или балансировочные клапаны) подают холодную и отводят нагретую вторичную охлаждающую жидкость в стационарную систему инженерных коммуникаций, подключенную к шкафу. Множество вычислительных шкафов, размещенных в одном или нескольких помещениях, образует вычислительный комплекс. Для эксплуатации вычислительный комплекс также подключается к источнику вторичной охлаждающей жидкости, к источнику энергоснабжения, модулю управления вычислительным комплексом.

Рассмотренная модульная реализация системы жидкостного охлаждения электронных компонентов вычислительных систем открытого типа, помимо свойственным системам открытого типа достоинств, обладает рядом дополнительных преимуществ:

- платы вычислительных модулей и реконфигурируемые вычислительные модули идентичны, относительно автономны и взаимозаменяемы; при выходе из строя одного ВМ или при необходимости проведения профилактических работ нет необходимости полностью отключать вычислительный шкаф и останавливать рабочую задачу;
- достигается повышенная плотность компоновки ПЛИС в ВМ;
- предложенное техническое решение позволяет при необходимости наращивать производительность реконфигурируемых вычислительных модулей без кардинального увеличения габаритных размеров (более производительные насос и теплообменник позволяют вписаться в выбранные габариты); увеличение количества плат вычислительных модулей незначительно увеличит размер реконфигурируемого вычислительного модуля по глубине при неизменной плотности компоновки.

В силу простоты конструкции теплообменной секции реконфигурируемого вычислительного модуля значительно повышается его надежность.

Вычислительный 19" шкаф суперкомпьютера, эскиз которого представлен на рис. 16, обладает следующими техническими характеристиками:

- стандартный вычислительный шкаф высотой 47U;
- 12 вычислительных модулей высотой 3U с жидкостным охлаждением;
- каждый вычислительный модуль содержит 12 плат мощностью 800 Вт каждая;
- каждая плата содержит восемь кристаллов ПЛИС Kintex UltraScale – XCKU095-1FFVB2104C по 95 миллионов эквивалентных вентилях (134 400 логических блоков) каждый;
- производительность ВМ нового поколения — 105 Тфлопс;
- производительность вычислительного шкафа с 12 ВМ — 1 Пфлопс;
- потребляемая мощность вычислительного шкафа с 12 ВМ — 124 кВт.

Производительность одного вычислительного шкафа с системой жидкостного охлаждения, содержащего 12 ВМ с 12 платами каждый, в 6,55 раз превышает производительность аналогичного шкафа с ВМ "Тайгета". При этом производительность одного ВМ нового поколения по сравнению с ВМ "Тайгета" повышена в 8,74 раза. Такое качественное повышение удельной производительности системы обеспечено более чем трехкратным повышением плотности компоновки системы за счет оригинальных конструктивных решений, а также повышением тактовой частоты и увеличением числа вентилях в кристалле.

Для проверки технических, технологических решений и определения ожидаемых технико-экономических и эксплуатационных характеристик разрабатываемой высокопроизводительной реконфигурируемой вычислительной системы с жидкостным охлаждением был создан ряд макетов, опытных и технологических образцов. На рис. 2 представлен технологический образец ВМ нового поколения, для которого были разработаны новые конструкции печатных плат и вычислительных модулей, характеризующиеся высокой плотностью компоновки.

Плата перспективного вычислительного модуля содержит восемь ПЛИС семейства Virtex UltraScale логической емкостью не менее 100 миллионов эквивалентных вентилях каждая. В вычислительной секции ВМ размещается 12–16 плат вычислительных модулей с потребляемой мощностью до 800 Вт каждая, причем все платы полностью погружены в электрически нейтральный жидкостный хладагент; в теплообменной располагаются насосная группа и теплообменник, обеспечивающие проток и охлаждение хладагента. Высота конструктива ВМ нового поколения равна 3U.



Рис. 2. Технологический образец ВМ нового поколения

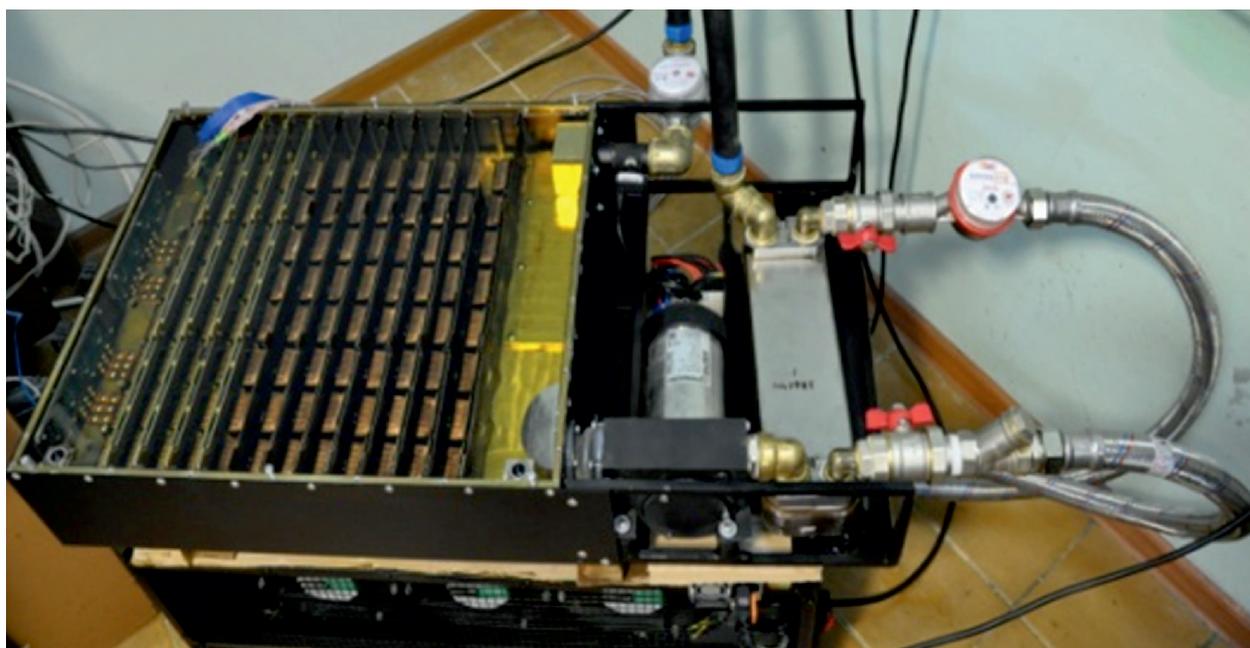


Рис. 3. Технологический образец вычислительного модуля с погружной системой жидкостного охлаждения открытого типа

Для создания эффективной погружной системы охлаждения был разработан диэлектрический хлад-агент, обладающий наилучшей электрической прочностью, высокой теплопроводностью, максимально возможной теплоемкостью при низкой вязкости. На основе масла ГК методом вакуумной перегонки было получено масло с пониженной вязкостью “Масло маловязкое диэлектрик МД-4,5 для охлаждения электронных компонентов ЭВМ”, на него разработаны технические условия ТУ 38.401-58-421-2015 и получены рекомендации для его применения. Масло МД-4,5 прошло всестороннее исследование в теплотехнической лаборатории НИЦ СЭ и НК на технологическом образце вычислительного модуля с погружной системой жидкостного охлаждения открытого типа, представленном рис. 3. Цикл проведенных лабораторных и эксплуатационных испытаний подтвердил целесообразность использования масла МД-4,5 для охлаждения электронных компонентов ЭВМ и применение маломощных насосов для его циркуляции (вследствие пониженной вязкости).

При разработке ВМ нового поколения получен ряд прорывных технических решений: разработан погружной блок питания для напряжения 380 В и преобразователь DC/DC 380/12 В, обеспечена минимальная высота платы ВМ 100 мм, разработана погружная плата управления собственного производства. Для подсистемы охлаждения ВМ нового поколения определены необходимые элементы системы охлаждения: выбран оригинальный термоинтерфейс, разработана собственная конструкция радиатора ПЛИС малой высоты для конвективного теплообмена, выбраны оптимальный для используемого хладагента насос и теплообменник. Кроме того, определены конструкция компенсатора объемного расширения хладагента и элементы контроля подсистемы охлаждения: оптические датчики уровня и датчик протока. Разработанные решения по конструкции системы охлаждения и циркуляции хладагента позволяют эффективно решать проблему теплоотвода с наиболее нагретых компонентов ВМ.

Комплекс разработанных решений погружной системы жидкостного охлаждения позволил обеспечить в рабочем режиме ВМ температуру хладагента не более 30° С при потребляемой мощности 91 Вт для каждой ПЛИС (8736 Вт для ВМ). При этом максимальная температура ПЛИС не превышает 55° С, что свидетельствует о резерве мощности разработанной погружной системы жидкостного охлаждения, позволяющей обеспечить эффективное охлаждение для проектируемых перспективных семейств ПЛИС фирмы Xilinx (UltraScale+, UltraScale 2 и др.).

4. Заключение. Использование воздушных систем охлаждения для разрабатываемых суперкомпьютеров практически достигло своего предела, что обусловлено снижением эффективности охлаждения с ростом потребляемой (и отдаваемой) мощности, вызванным увеличением степени интеграции кристаллов микропроцессоров и других микросхем. Поэтому использование жидкостного охлаждения для организации работы современных вычислительных систем является приоритетным направлением совершенствования систем охлаждения с широкими перспективами дальнейшего развития. Жидкостное охлаждение вычислительных модулей PBC, содержащих не менее восьми кристаллов ПЛИС с высокой плотностью компоновки, обладает спецификой по сравнению с охлаждением кристаллов микропроцессоров, что требует разработки специализированной погружной системы охлаждения. Разработанная оригинальная жидкостная система охлаждения для вычислительного модуля PBC нового поколения позволяет обеспечить высокие эксплуатационные показатели системы — максимальную температуру ПЛИС, не превышающую 55° С при температуре хладагента не более 30° С в рабочем режиме. Полученные прорывные решения погружной системы жидкостного охлаждения позволяют в пределах одного вычислительного шкафа высотой 47U разместить не менее 12 ВМ нового поколения с суммарной производительностью свыше 1 Пфлопс. Резерв мощности системы жидкостного охлаждения ВМ нового поколения позволяет обеспечить эффективное охлаждение не только для существующих, но и для проектируемых перспективных семейств ПЛИС фирмы Xilinx UltraScale+ и UltraScale 2.

Поскольку ПЛИС как элементная база реконфигурируемых суперЭВМ обеспечивает устойчивый, близкий к линейному, рост производительности PBC, это позволяет обеспечить удельную производительность PBC на основе ПЛИС Xilinx Virtex UltraScale на уровне лучших мировых показателей для суперЭВМ с кластерной архитектурой, открывая новые перспективы по созданию суперкомпьютеров сверхвысокой производительности.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по Соглашению о предоставлении субсидии № 14.578.21.0006 от 05.06.2014, уникальный идентификатор RFMEFI57814X0006.

Статья рекомендована к публикации Программным комитетом Международной научной конференции “Параллельные вычислительные технологии” (ПаВТ–2016; <http://agora.guru.ru/pavt2016>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А., Шмойлов В.И.* Реконфигурируемые мультимедийные вычислительные структуры. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009.
2. *Kalyaev I.A., Levin I.I., Dordopulo A.I., Slasten L.M.* Reconfigurable computer systems based on Virtex-6 and Virtex-7 FPGAs // Proc. 12th IFAC Conf. on Programmable Devices and Embedded Systems, Velke Karlovice, Czech Republic, September 25–27, 2013. Vol. 12, Issue 1. Oxford: Elsevier, 2013. 210–214.
3. *Левин И.И., Дордопуло А.И., Каляев И.А., Доронченко Ю.И., Раскладкин М.К.* Современные и перспективные высокопроизводительные вычислительные системы с реконфигурируемой архитектурой // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Вычислительная математика и информатика. 2015. 4, № 3. 24–37.
4. <http://immers.ru/>.
5. *Левин И.И., Дордопуло А.И., Доронченко Ю.И., Раскладкин М.К.* Реконфигурируемая вычислительная система

на основе ПЛИС Virtex UltraScale с жидкостным охлаждением // Тр. Международной научной конференции “Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ-2016)”. 2016 (в печати).

Поступила в редакцию
15.03.2016

A Reconfigurable Computer System Based on FPGAs with Liquid Cooling

I. I. Levin¹, A. I. Dordopulo², Yu. I. Doronchenko³, M. K. Raskladkin⁴, and A. M. Fedorov⁵

¹ *Supercomputers and Neurocomputers Research Center; Italyansky pereulok 106, Taganrog, Rostov region, 347900, Russia; Dr. Sci., Professor, Director, e-mail: levin@superevm.ru*

² *Kalyaev Scientific Research Institute of Multiprocessor Computer Systems, Southern Federal University; ulitsa Chekhova 2, Taganrog, Rostov region, 347928, Russia; Ph.D., Head of Laboratory, e-mail: scorpio@mvs.tsure.ru*

³ *Supercomputers and Neurocomputers Research Center; Italyansky pereulok 106, Taganrog, Rostov region, 347900, Russia; Ph.D., Technical Director, e-mail: doronchenko@superevm.ru*

⁴ *Supercomputers and Neurocomputers Research Center; Italyansky pereulok 106, Taganrog, Rostov region, 347900, Russia; Ph.D., Head of Section, e-mail: niimvs@yandex.ru*

⁵ *Supercomputers and Neurocomputers Research Center; Italyansky pereulok 106, Taganrog, Rostov region, 347900, Russia; Principal Heating Engineer, e-mail: niimvs@yandex.ru*

Received March 15, 2016

Abstract: The paper deals with problems of design of promising reconfigurable computer systems with liquid cooling for Xilinx Virtex UltraScale FPGAs. Architecture, placement and comparative technical parameters of systems with immersion liquid cooling are considered. Results of design, prototyping and experimental testing of the principal technical solutions of the designed computational module of the next generation are discussed. The computational module is intended for the creation of high-performance computer systems with liquid cooling with performance of 1 PFlops in a standard 47U computer rack with power of 150 kWatt. The reconfigurable computer system with liquid cooling provides considerable advantage in such technical and economical parameters as the real performance and the specific performance, power efficiency, mass and dimension parameters, etc. in comparison with similar systems.

Keywords: reconfigurable computer systems, FPGAs, liquid cooling, computational module, high-performance computer systems, real and specific performance, power efficiency.

References

1. I. A. Kalyaev, I. I. Levin, E. A. Semernikov, and V. I. Shmoilov, *Reconfigurable Multipipeline Computing Structures* (Southern Sci. Center, Rostov-on-Don, 2009; Nova Sci. Publ., New York, 2012).
2. I. A. Kalyaev, I. I. Levin, A. I. Dordopulo, and L. M. Slasten, “Reconfigurable Computer Systems Based on Virtex-6 and Virtex-7 FPGAs,” in *Proc. 12th IFAC Conf. on Programmable Devices and Embedded Systems, Velke Karlovice, Czech Republic, September 25–27, 2013* (Elsevier, Oxford, 2013), Vol. 12, Issue 1, pp. 210–214.
3. I. I. Levin, A. I. Dordopulo, I. A. Kalyaev, et al., “Modern and Next-Generation High-Performance Computer Systems with Reconfigurable Architecture,” *Vestn. South Ural State Univ. Ser. Vychisl. Mat. Inf.* **4** (3), 24–37 (2015).
4. IMMERS Company. <http://immers.ru>. Cited March 22, 2016.
5. I. I. Levin, A. I. Dordopulo, Yu. I. Doronchenko, and M. K. Raskladkin, “Reconfigurable Computer System Based on Virtex UltraScale with Liquid Cooling,” in *Proc. Int. Conf. on Parallel Computational Technologies, Arkhangelsk, Russia, March 28–April 1, 2016*, in press.