
УДК 656.7:658.012.011.56; 656.7:004; 656.6:658.012.011.56; 656.6:004

Разработка малогабаритного микроконтроллерного вычислительного модуля для систем и комплексов ориентации, навигации, гравиметрии и управления аэроморских динамичных подвижных объектов

Афонин А. А. *, Курмаков Д. В., Ямашев Г. Г., Сулаков А. С. **

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ,
Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

**e-mail: Al_aa@mail.ru*

***e-mail: kaf305-mai@mail.ru*

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы разработки малогабаритного микроконтроллерного вычислительного модуля для современных систем и комплексов ориентации, навигации, гравиметрии и управления аэроморских динамичных подвижных объектов. Представлена общая концепция построения вычислительного модуля в составе бесплатформенного гравиинерциального навигационного комплекса (БГНК), принципиальная схема вычислительного модуля, описана структура программного обеспечения вычислительного модуля, намечен дальнейший вектор работ по его совершенствованию как в направлении расширения функциональных возможностей, так и в направлениях оптимизации процесса разработки устройства и обеспечения его соответствия требованиям международных авиационных стандартов. Приведены результаты работ по созданию прототипа вычислительного модуля БГНК.

Ключевые слова:

микроконтроллер, вычислительный модуль, печатная плата, топология, программное обеспечение, операционная система реального времени, гравиметрия, ориентация, навигация, бесплатформенный гравиинерциальный навигационный комплекс

Введение

В настоящее время актуальной является проблема высокоточного определения параметров гравитационного поля Земли, в особенности в ее отдалённых и труднодоступных районах, акваториях морей и океанов, их шельфов. Данная проблема имеет большое хозяйственное, научное и оборонное значение и в настоящее время решается путем применения дорогостоящих платформенных скалярных гравиметрических комплексов на борту среднетоннажных судов и подводных лодок, самолетов и вертолетов среднего класса. Традиционная аэроморская гравиметрия отличается отработанностью применяемых технологий и достаточным (для большинства задач) уровнем точности, в то же время ей характерны низкая производительность, детальность и оперативность, высокие материальные затраты, в особенности определяемые стоимостью эксплуатации носителя с экипажем. В то же время, решение отмеченной проблемы возможно посредством применения миниатюрного БГНК, расположенного на борту малоразмерного динамичного носителя – беспилотного летательного аппарата (БЛА) или малоразмерного подводного аппарата (МПА). БГНК является источником высокоточной векторной гравиметрической и ориентационно-навигационной информации, в том числе снабжающей данными систему автоматического управления малогабаритного необитаемого носителя. Использование таких носителей с БГНК позволит существенно снизить затраты на гравиметрическую съемку, повысить их производительность, оперативность, детальность, уменьшить риски работ в море и в воздухе. При разработке комплекса важной является задача создания программно-аппаратного и алгоритмического обеспечения, при решении которой в рамках разрабатываемого малогабаритного вычислительного модуля были бы реализованы функциональные алгоритмы комплекса, к которым относятся: алгоритмы ориентации, навигации, векторной гравиметрии, оценивания параметров и коррекции. На текущем этапе развития вычислительной техники видится возможным построение данного вычислительного модуля на основе современных микроконтроллеров. Решение этой задачи, в частности, позволит создать достаточно производительный, точный, надежный и миниатюрный вычислительный модуль БГНК для эффективного решения указанной проблемы, в частности, для решения ряда насущных задач, связанных с актуальными вопросами геодезии, физики Земли, навигации, включая корреляционно-экстремальную навигацию по данным о геофизических аномалиях, геофизического мониторинга природно-техногенной сферы, включая мониторинг территорий (акваторий), сооружений, коммуникаций и образований искусственного или естественного происхождения, а также

гравиразведки залежей полезных ископаемых. Актуальность решения последней задачи особенно подчеркивается Энергетической стратегией России.

В настоящее время коллективом кафедры “Автоматизированные комплексы систем ориентации и навигации” МАИ в рамках перспективного и актуального научного направления в области разработки и исследования высокоточных интеллектуальных бортовых систем и комплексов аэроморских подвижных объектов разрабатывается БГНК. При этом, в частности, решается задача создания специализированного высокопроизводительного вычислительного модуля, назначением которого является сбор и обработка информации измерительных подсистем комплекса, обладающего минимальными массогабаритными характеристиками. Кроме того, в связи с возможно длительным функционированием на борту автономных компактных носителей актуальным является снижение его энергопотребления и повышение помехозащищенности, а также увеличение объема памяти, необходимого для накопления измерительной информации. Требуемая высокая производительность вычислительного модуля БГНК обусловлена сложностью выполняемых им вычислений. Вычислительный модуль должен решать задачи начальной выставки, навигации, ориентации и векторной гравиметрии, оптимальной оценки различных параметров и их коррекции, а также задачи опроса измерителей, записи массивов выходной информации в память, обеспечение функционирования системы индикации и контроля состояния периферийных устройств, самоконтроля и др. При этом в процессе вычислений возникает необходимость выполнения ряда сложных математических операций, в частности, численное решение систем из десятков дифференциальных уравнений, векторно-матричных преобразований с операндами большой размерности, вычисление соотношений с использованием расширенной разрядной сетки с частотой выдачи информации до десятков Гц в режиме реального времени. Сегодня широкое распространение получил подход к построению малоразмерных бортовых вычислительных комплексов на основе применения микроконтроллеров, функционирующих под управлением операционных систем реального времени. По проведенным оценкам современные 32-х разрядные микроконтроллеры обладают достаточной производительностью для решения описанных выше задач, но широко представленные на рынке устройства – универсальные отладочные платы на их основе, не смотря на широкий набор функций, имеют ряд недостатков для специализированного применения в составе БГНК. В частности к ним относятся избыточный функционал, который не будет востребован в структуре БГНК, что связано с сохранением излишних массогабаритных характеристик и энергопотребления. Как правило устройствам

присущи ограниченные объемы памяти и невысокая помехозащищенность. В этой связи возникает необходимость создания специализированной платы вычислительного модуля, лишенной перечисленных недостатков.

Принципиальная схема БГНК, включающая микроконтроллерный вычислительный модуль, трехкомпонентные блоки прецизионных акселерометров и гироскопов, приемник спутниковой навигационной системы (СНС), работающей в дифференциальном или фазовом режиме, а также возможно другие измерители представлена на рис. 1. Рациональные структура, состав и основные алгоритмы работы БГНК описаны в [1-3]. На схеме отмечены каналы передачи информации от измерителей комплекса в вычислительный модуль и из вычислительного модуля в систему автоматического управления носителем (САУ), показана общая структура вычислительного модуля на основе микроконтроллера.

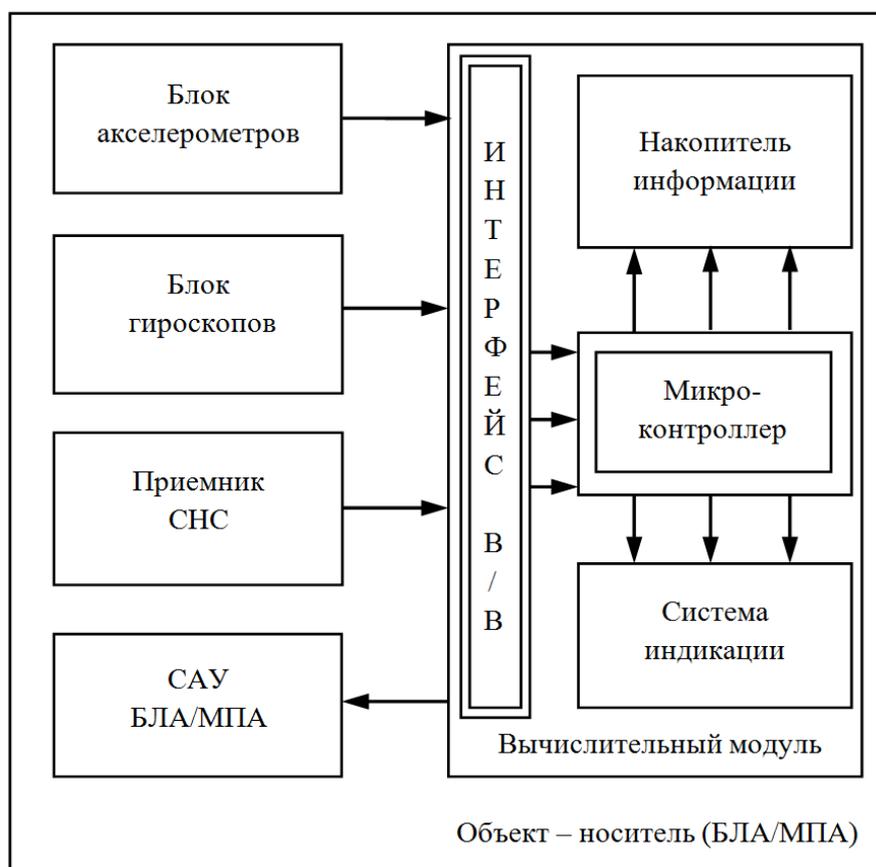


Рисунок 1 – Принципиальная схема БГНК минимального состава

Сигналы измерителей поступают на входные разъемы печатной платы разрабатываемого вычислительного модуля посредством широко применяемых интерфейсов

RS-485, RS-232. Данные с подключенных к модулю устройств принимаются и обрабатываются микроконтроллером в соответствии с алгоритмами БГНК, результаты измерений и текущие вычисленные ориентационные, навигационные и гравиметрические параметры записываются на накопитель информации на основе flash-памяти, необходимые данные направляются в САУ объекта – носителя комплекса. В случае необходимости посредством системы индикации отображается текущее состояние комплекса.

Структура и состав аппаратного и программного обеспечения вычислительного модуля

Программно-аппаратный вычислительный модуль БГНК включает в себя аппаратную платформу, функционирующую под управлением операционной системы реального времени (ОСРВ) и прикладное программное обеспечение, реализующие функциональные алгоритмы комплекса. Разработке вычислительного модуля предшествовал анализ и детальная проработка современных действительных стандартов в области создания, сертификации и эксплуатации программного и аппаратного обеспечения авионики с целью достижения всех качеств, соответствующих современным требованиям к авиационному оборудованию. Путем соблюдения требований стандартов ведущих мировых организаций, сертифицирующих авиационное оборудование при разработке вычислительного модуля, осуществляется как выполнение требований безопасности и отказоустойчивости разрабатываемого комплекса, так и возможности его дальнейшего развития и обеспечение перспектив внедрения и коммерциализации в сфере беспилотной авиации.

На рис. 2 представлена принципиальная схема аппаратного обеспечения вычислительного модуля. Анализ существующей элементной базы, применяемой в современных вычислительных комплексах авиационного назначения, показал, что оптимальным вариантом для построения малогабаритного вычислительного модуля является выбор современного микроконтроллера в качестве вычислительного ядра модуля. Вычислительный модуль целесообразно выполнить в виде малогабаритной печатной платы с размещенными на ней функциональными элементами. В качестве основы для реализации аппаратной платформы вычислительного модуля выбран 32-разрядный микроконтроллер AT91SAM9G20 [4] компании Atmel. Микроконтроллер AT91SAM9G20, производства Atmel, выполнен по архитектуре ARM9 в 217-выводном корпусе и имеет тактовую частоту работы 400 МГц. В микроконтроллере присутствует аппаратная поддержка работы с подключаемой памятью, а также поддержка реализованных на плате интерфейсов RS-485, RS-232, USB.

Вычислительный модуль помимо микроконтроллера содержит блок питания с разъемом питания J1, микроконтроллер DD1, флэш-память DC1 увеличенного объема, оперативную память DC2, выходы интерфейсов J2, J3, J4, J5, J6. Блок питания предназначен для формирования напряжений питания 5 В, 3,3 В и 1 В, из подключаемого по разъему J1 питания 5 В. Флэш-память DC1 предназначена для хранения исполняемого кода программ и хранения результатов измерений и вычисленных параметров. Оперативная память DD2 необходима для временного хранения данных и команд, исполняемых процессорным ядром микроконтроллера. Микроконтроллер DD1 предназначен для исполнения программы, приема и передачи данных с внешних интерфейсов и работы с памятью. Адресация памяти производится по шине «Адрес», обмен данными производится по шине «Данные». При этом малые габариты модуля достигаются использованием технологии поверхностного монтажа компактно расположенных SMD-компонентов на плате и трехслойной структурой печатной платы. Слои металлизации и дополнительное заземленное металлизированное покрытие верхнего и нижнего слоев печатной платы позволяют повысить помехозащищенность устройства, а установка на плату только необходимых БГНК узлов, рациональное расположение элементов и их связей позволяет минимизировать массу и габариты модуля, его энергопотребление.

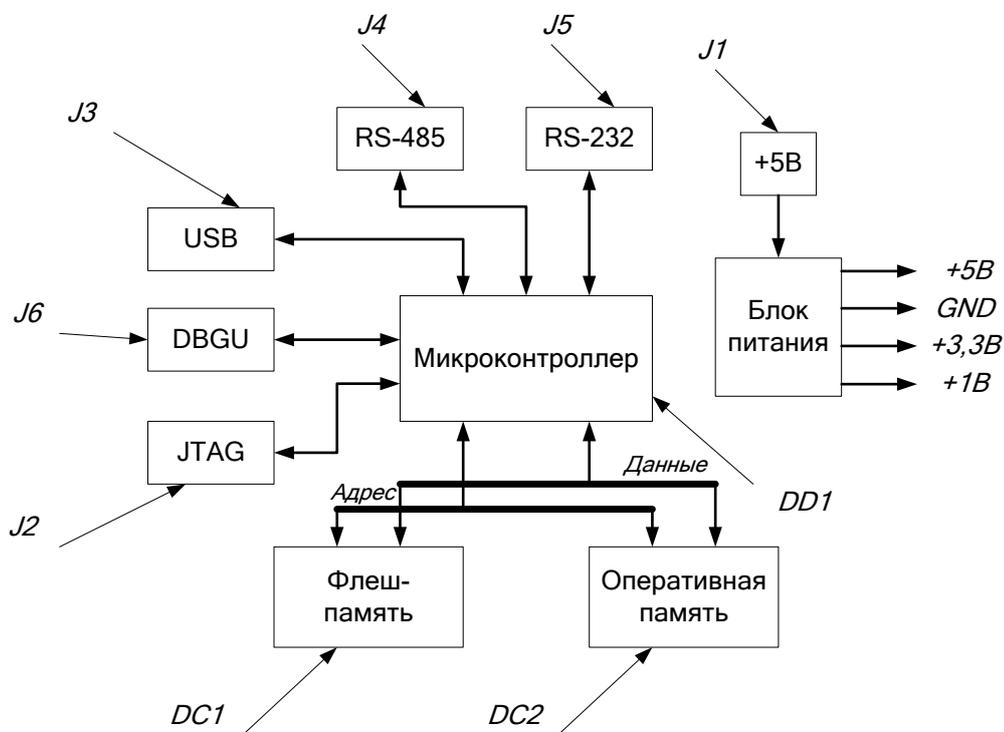


Рисунок 2 – Принципиальная схема аппаратного обеспечения вычислительного модуля, блок питания обеспечивает все его узлы необходимым питанием

Программное обеспечение вычислительного модуля включает в себя прикладное программное обеспечение, разработанное на языке С в специализированной среде разработки приложений для микроконтроллерных систем IAR Embedded Workbench. Прикладное программное обеспечение реализует алгоритмы БГНК, в частности алгоритмы ориентации, навигации, векторной гравиметрии, оценивания параметров и коррекции с применением оптимальной калмановской фильтрации, а также алгоритмы обмена информацией с измерителями, накопителем и системой индикации. Загрузка программного обеспечения в микроконтроллер производится по интерфейсу JTAG, размещенному на плате модуля с помощью специализированных программных средств, таких как IAR Embedded Workbench. Помимо этого в состав программного обеспечения вычислительного модуля входит операционная система реального времени (ОСРВ) под управлением которой функционирует прикладное программное обеспечение БГНК. Выбранный микроконтроллер позволяет работать под управлением различных операционных систем реального времени, таких как RT Linux, Windows CE и др. Основными задачами ОСРВ в вычислительном модуле являются управление процессами, динамическое распределение памяти, управление таймерами, обеспечение взаимодействия между процессами и их синхронизация, а также контроль устройств ввода/вывода.

Таким образом, объединение операционной системы и прикладного программного обеспечения в составе микроконтроллерного вычислительного модуля позволяет завершить формирование программно-аппаратного и алгоритмического обеспечения БГНК.

В перспективах реализации проекта является возможным внедрение новых технологий проектирования прикладного программного обеспечения вычислительного модуля, которые обеспечивают соответствие разрабатываемого программного обеспечения требованиям стандарта DO-178B [5]. В частности, перспективным является применение программной среды Matlab-Simulink [6] для реализации алгоритмов БГНК и осуществления автоматической кодогенерации под целевую микроконтроллерную систему, а также автоматизированную верификацию проекта, анализ полноты покрытия кода и генерацию документации. При этом в качестве системы индикации можно использовать сенсорный жидкокристаллический дисплей, подключаемый к плате вычислительного модуля. Система индикации может применяться при вводе и настройке оператором начальных параметров работы БГНК перед проведением гравиметрической съемки в автоматическом режиме на борту носителя, для индикации состояния БГНК и его подсистем в тестовых и отладочных

режимах работы, при настройке параметров подключений к внешним системам и других работах. При разработке программного обеспечения системы индикации вычислительного модуля видится перспективным применение современных инструментов автоматизированного проектирования критичных по безопасности встраиваемых систем, таких как Scade Suit и Scade Display [7]. Данные системы проектирования позволяют осуществлять автоматическую генерацию кода под целевую микроконтроллерную платформу вычислителя, сертифицируемого по стандарту DO-178B. Ожидается, что применение подобных решений позволит снизить трудоемкость разработки вычислительного модуля БГНК путем применения унифицированной методологии разработки моделей, объединяя алгоритмические описания, сделанные в более ранних исследованиях с описаниями, реализованными с помощью логики конечных автоматов, а также создать более точные программные модели полностью исключив потенциально возможную неоднозначность или избыточность кода. Кроме того, оценка полноты тестового покрытия встраиваемого кода в процессе верификации проекта значительно снизит вероятность появления ошибок. Таким образом, возможное применение в перспективах разработки вычислительного модуля БГНК наиболее современных средств проектирования позволит уйти от традиционного программирования вычислительных систем и перейти к автоматической кодогенерации, документированию и верификации.

Результаты разработки вычислительного модуля

На рис. 3 показана трехмерная модель разрабатываемого вычислительного модуля БГНК, выполненная в среде автоматизированного проектирования печатных плат. Печатная плата вычислительного модуля БГНК предназначена для реализации его алгоритмов в режиме реального времени. Специальное программное обеспечение комплекса может быть реализована как для запуска на микроконтроллере без предустановленной операционной системы, так и для запуска в ее среде, в том числе и ОСРВ. Исходные данные для решения уравнений в рамках функциональных алгоритмов БГНК могут поступать как из файлов на сменном носителе, так и в реальном времени по одному или нескольким из реализованных на плате интерфейсов от подключенных измерителей. Результаты измерений и вычислений также могут быть записаны в память устройства, либо переданы по одному из интерфейсов потребителю.

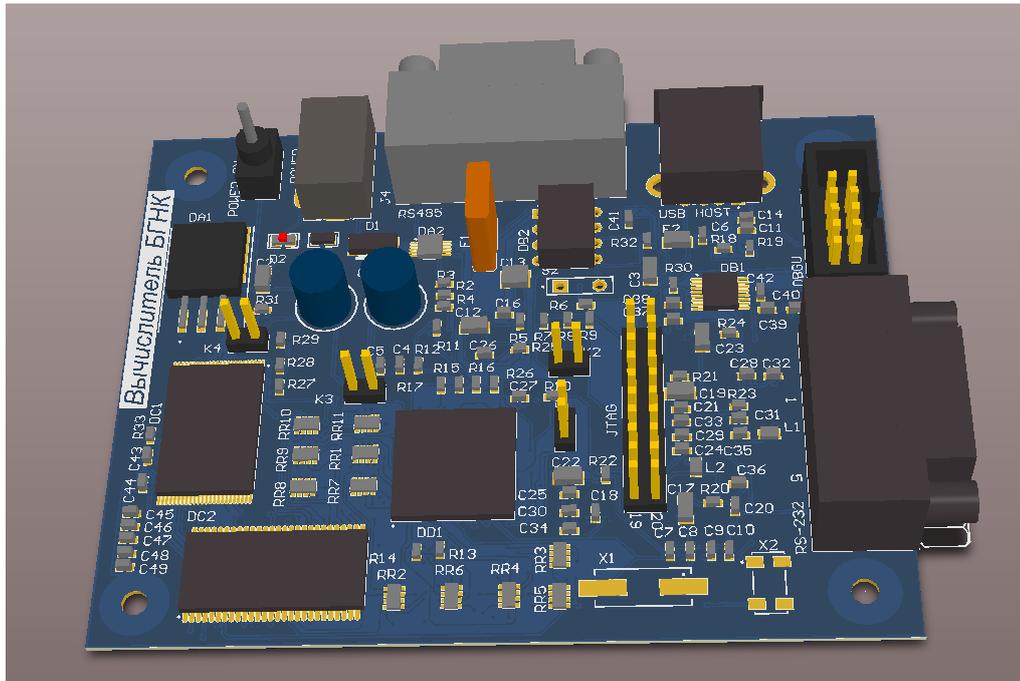
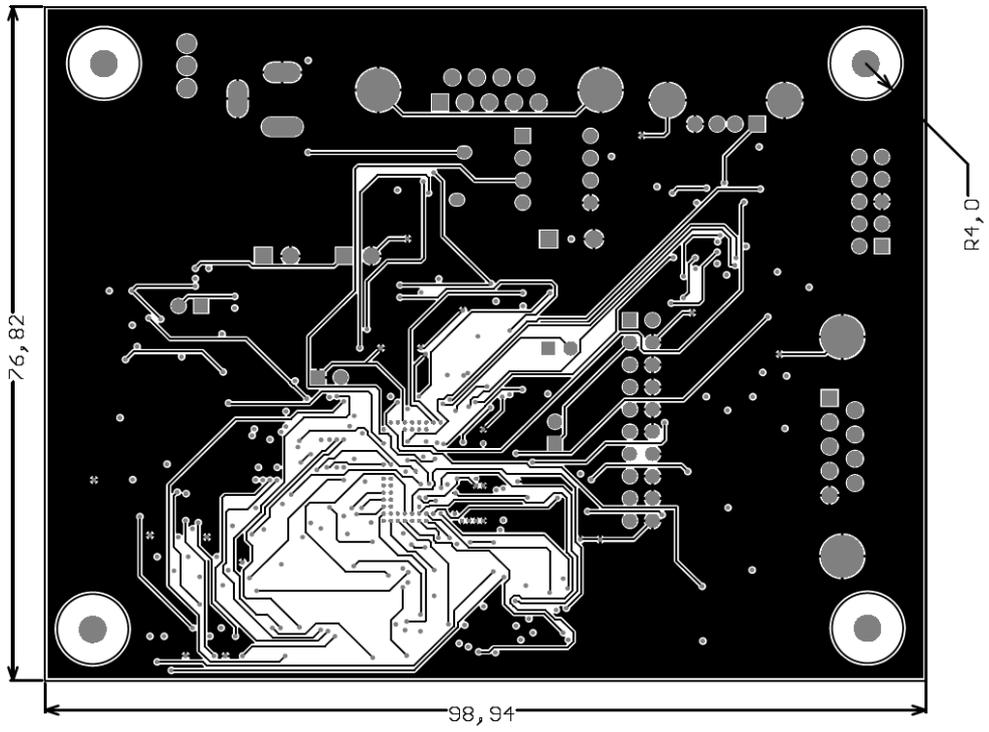


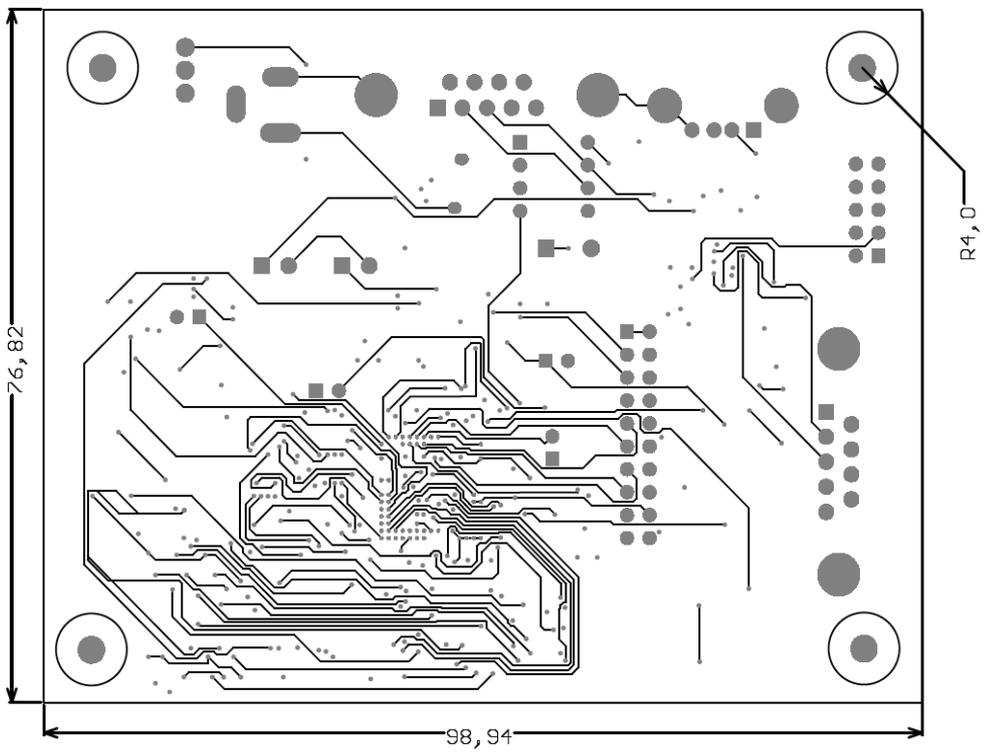
Рисунок 3 – Трехмерная модель платы вычислительного модуля

В ходе проведенных работ был разработан комплект конструкторской документации, в том числе спецификация элементов печатной платы, топология слоев, схема расположения элементов, принципиальная электрическая схема и др. Были выбраны рациональные конфигурация и размеры монтажных отверстий. В итоге выполненный на трехслойной печатной плате толщиной в 1 мм вычислительный модуль достиг размера 88,23x98,94 мм. Топология слоев приведена на рис. 4. Элементы печатной платы расположены на верхнем слое, согласно рис. 5.

a)



b)



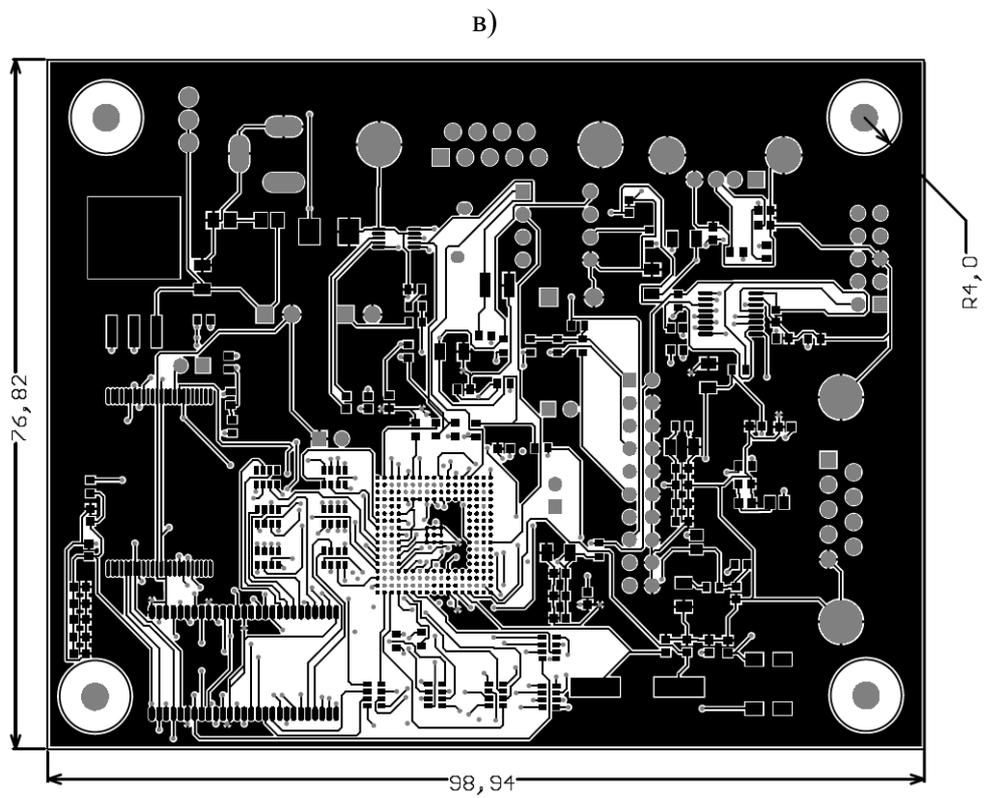


Рисунок 4 – Топологические чертежи а) верхнего, б) промежуточного и в) нижнего слоев печатной платы вычислительного модуля

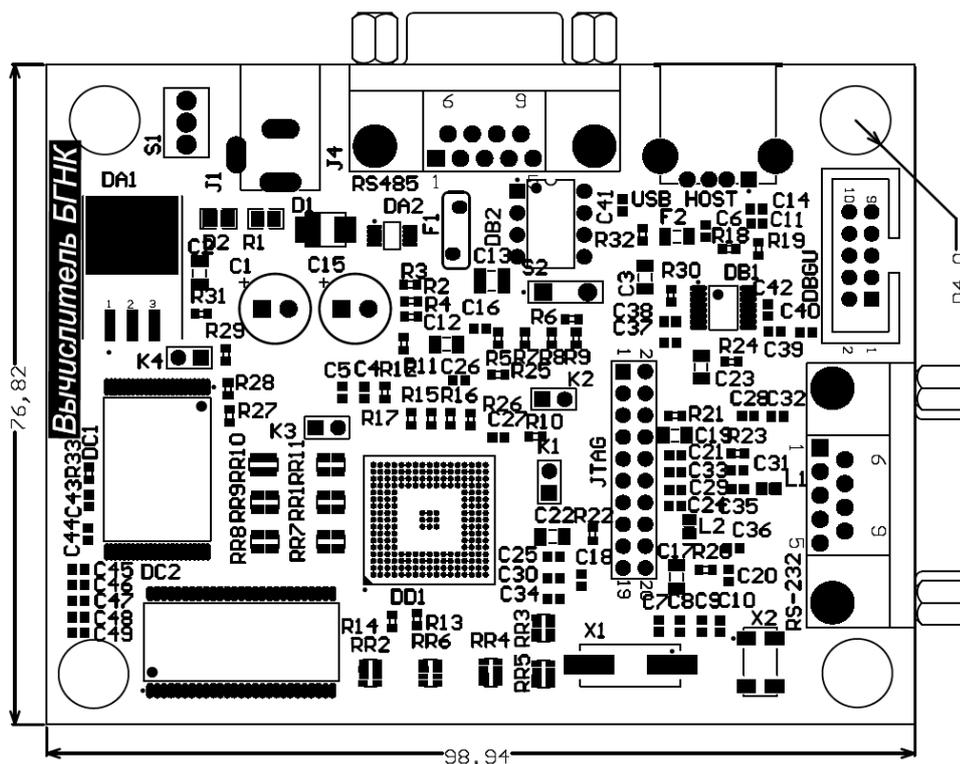


Рисунок 5 – Схема расположения элементов вычислительного модуля, где показаны контактные площадки для следующих элементов вычислительного модуля: C1-C49 – конденсаторы; D1 – диод; D2 – светодиод; DA1, DA2 – преобразователи напряжения; DB1, DB2 – микросхемы драйверов интерфейсов; DC1 – микросхема флэш-памяти; DC2 – микросхема оперативной памяти; DD1 – микроконтроллер; F1, F2 – предохранители; J1 – разъем питания; J2-J6 – разъемы интерфейсов; K1-K4 – перемычки; L1, L2 – катушки индуктивности; R1-R33 – резисторы; RR1-RR11 – резисторные микросборки; S1 – переключатель; S2 – кнопка; X1, X2 – кварцевые резонаторы

Таким образом, вычислительный модуль БГНК представляет собой компактную плату с весьма ограниченным энергопотреблением, которая может быть интегрирована совместно с другими модулями комплекса в состав бортового оборудования малоразмерного авиационного или морского носителя. Производительный микропроцессор в составе применяемого в модуле 32-х разрядного микроконтроллера работает с тактовой частотой 400 МГц и построен на базе современной архитектуры ARM, что обеспечивают высокую вычислительную производительность модуля. В состав вычислительного модуля входит микросхема ОЗУ объемом 64 Мб и ПЗУ объемом 2 Гб на основе микросхемы flash-памяти. Входящие в состав вычислительного модуля интерфейсы RS-485 и RS-232C подключенные к

соответствующим приемопередатчикам микроконтроллера и обладающие скоростью передачи данных 38 Кб/сек, могут обеспечивать обмен информацией с измерительными устройствами, входящими в состав БГНК (трехосным блоком гироскопов, трехкомпонентным блоком акселерометров и приемником СНС). Температурный диапазон работы микроконтроллерного вычислительного модуля составляет от -40 до +85 градусов Цельсия. Предполагается, что данный вычислительный модуль качественно и надежно обеспечит функционирование БГНК, по крайней мере, в его минимальном составе. Несмотря на свое целевое назначение, данный вычислительный модуль может быть использован не только в составе БГНК, но и также в составе других информационно-измерительных систем и комплексов, например, решающих задачи ориентации, навигации, сбора и оперативной обработки данных различных видов, а также управления малоразмерных подвижных объектов широкого класса и назначения.

Заключение

В статье описана общая структура и состав БГНК, включая его разрабатываемый микроконтроллерный вычислительный модуль, предназначенный для сбора и обработки измерительной информации. Представлены его состав и структура, функциональное назначение, описано аппаратное и программное обеспечение модуля, а также приведены результаты разработки печатной платы вычислительного модуля и перспективные направления его дальнейшего совершенствования. В настоящее время проводятся работы по изготовлению опытного образца трехслойной печатной платы вычислительного модуля с разработанной топологией, проведение окончательного интеграционного тестирования разработанного прикладного программного обеспечения для микроконтроллера, размещенного на данной плате и прямое подключение внешних измерителей по соответствующим интерфейсам RS-485/RS-232, программной реализацией соответствующих протоколов обмена информацией. Ожидается, что разработанный вычислительный модуль качественно и надежно обеспечит функционирование БГНК в условиях малоразмерного воздушного или подводного борта.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по проектам 14.740.11.1434 от 03.11.2011г., 14.B37.21.1904 от 04.10.2012г. и 14.B37.21.1545 от 20.09.2012г. ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы”.

Библиографический список

1. Афонин А.А., Репников А.В., Сулаков А.С., Ямашев Г.Г. Анализ результатов моделирования работы бесплатформенного гравиинерциального навигационного комплекса. //Электронный журнал “Труды МАИ”, 2011, Выпуск № 49, с. 1-18.
2. Тювин А.В., Афонин А.А., Черноморский А.И. Об одной концепции векторных гравиметрических измерений // Авиакосмическое приборостроение, 2005, №3, с. 24-29.
3. Афонин А.А., Сулаков А.С. О коррекции параметров ориентации, навигации и гравиметрии в замкнутой схеме включения фильтра Калмана навигационного комплекса // Авиакосмическое приборостроение. –М.: 2011, № 8, с. 17-24.
4. URL: <http://www.atmel.com/devices/sam9g20.aspx> (дата обращения: 01.11.2012).
5. RTCA/DO-178B Software considerations in airborne systems and equipment certification // RTCA, 1992.
6. Mohinder S. Grewal, Lawrence R. Weill, Angus P. Andrews. Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration // John Wiley & Sons, Inc., January 2001, 416 p.
7. URL: <http://www.esterel-technologies.com> (дата обращения: 01.11.2012).