

УДК 621.3+629.78

ДАТЧИКОВАЯ АППАРАТУРА «ШТИЛЬ-М» ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА КОСМИЧЕСКОМ АППАРАТЕ «РЕСУРС-П»

© 2014 Н. Д. Сёмкин¹, К. Е. Воронов¹, Р. А. Помельников²,
С. А. Шатров², А. В. Пияков¹, В. В. Брагин¹

¹Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

²ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», г. Самара

Описана датчиковая аппаратура «Штиль-М», предназначенная для контроля магнитной обстановки космического аппарата «Ресурс-П» посредством шести трёхкомпонентных датчиков-магнитометров, измерения вектора магнитного поля посредством одного трёхкомпонентного датчика-магнитометра, а также для контроля помех по цепям питания и регистрации возможных электростатических разрядов. Приведены результаты измерений данных величин.

Магнитное поле, электростатический разряд, помехи, датчиковая аппаратура, космический аппарат.

Введение

Контроль магнитной и помеховой обстановки космического аппарата (КА) является важной задачей, необходимой для оценки электромагнитной совместимости аппаратуры и выявления причин возможных сбоев при её работе.

В настоящее время поставлено множество экспериментов по измерению магнитных полей на различных космических аппаратах [1] и космических станциях [2, 3, 4].

Датчиковая аппаратура «Штиль-М» предназначена для проведения измерений уровней магнитного поля по трём компонентам и уровней помех в цепях питания космического аппарата «Ресурс-П», измерения помехового напряжения на шине питания +27 В, измерения помехового напряжения в цепи «шина-корпус», а также для измерения параметров электростатического разряда, возникающего на поверхности КА «Ресурс-П».

Конструкция датчиковой аппаратуры «Штиль-М»

Датчиковая аппаратура (ДА) «Штиль-М» состоит из блока электроники (БЭ) и шести трёхкомпонентных магнитометров для измерения состояния маг-

нитного поля, в соединительных кабелях которых содержится по одной двухпроводной линии, предназначенной для измерения параметров электростатического разряда.

Структурная схема ДА «Штиль-М» приведена на рис. 1, фотография – на рис. 2.

Для обеспечения приёма информации с датчиков магнитного поля, модуля измерения напряжения питания и напряжения «шина-корпус» и модуля измерения электростатических разрядов, а также предварительной обработки и хранения полученной информации в блоке электроники «Штиль-М» применён одноплатный компьютер VSX-104. Этот компьютер построен на базе ×86 совместимого процессора Vortex, имеет 128 мегабайт оперативной памяти и 4 гигабайта памяти на флеш-диске. Подключение датчиков-магнитометров, модуля измерения электростатических разрядов и модуля измерения напряжения питания и напряжения «шина-корпус» производится по последовательному интерфейсу RS-232. Для обеспечения требуемого количества RS-232 портов используется расширитель портов. В блоке электроники «Штиль-М» использован расширитель портов, представляющий собой коммутатор. Такое си-

стемотехническое решение позволяет уменьшить энергопотребление коммутатора (0,1 Вт) примерно в 10 раз по сравнению с существующими коммутаторами (более 1 Вт), однако одновременно можно получать данные только с одного устройства, подключенного к такому коммута-

тору. Сам коммутатор подключен к COM3 порту одноплатного компьютера VSX-104. К портам коммутатора подключены шесть датчиков-магнитометров, модуль измерения напряжения питания и напряжения «шина-корпус» и модуль измерения электростатических разрядов.

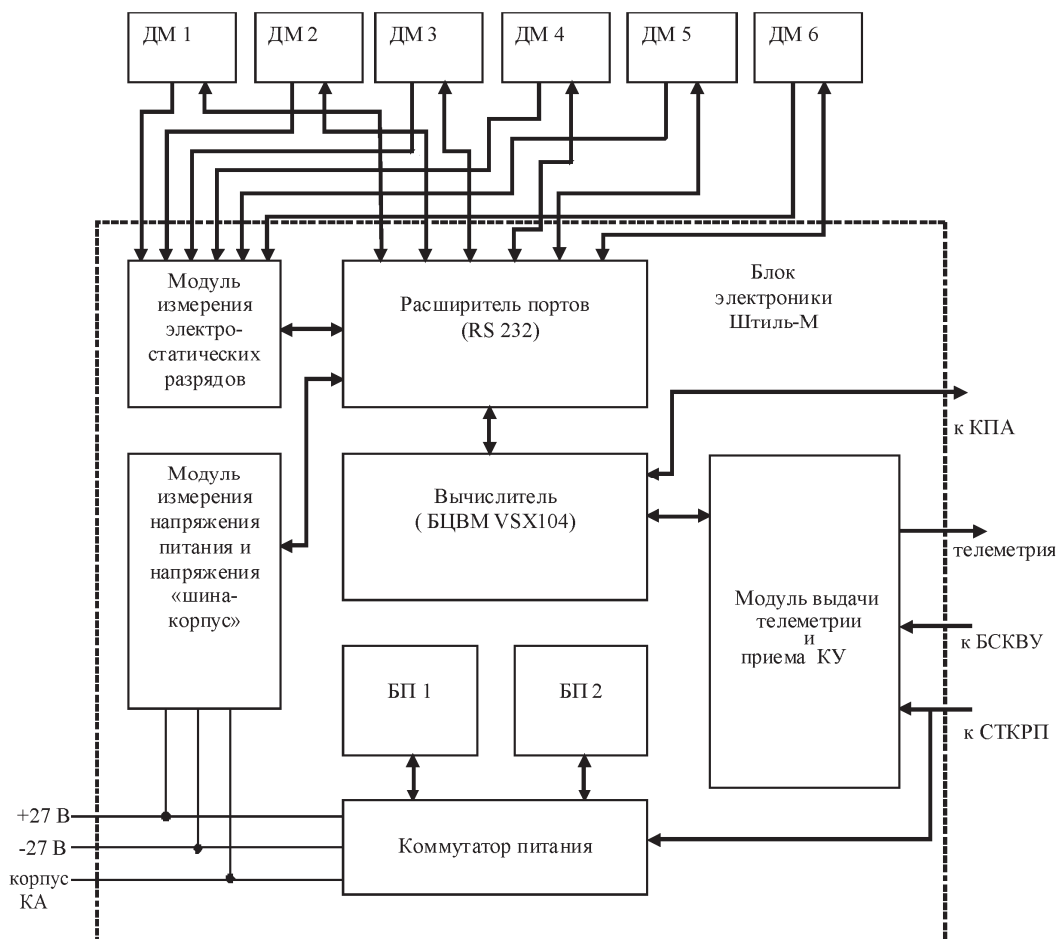


Рис. 1. Общая структурная схема аппаратуры «Штиль-М»



Рис. 2. Внешний вид датчиковой аппаратуры «Штиль-М»

Модуль измерения параметров электростатического разряда выполняет: запись параметров одиночных электростатических разрядов по одному из шести каналов; запись пиковых значений индуцированного напряжения, соответствующих моменту разряда по остальным пяти каналам; измерение максимального значения амплитуды напряжения коротких одиночных импульсов помех длительностью менее 2 мкс; определение канала записи параметров разряда; обработку и хранение результатов измерений (рис. 3).

Структурно модуль разбит на две части: аналоговую, выполняющую роль согласования по уровню входных сигналов с измерительных датчиков с диапазоном входного сигнала устройства оцифровки аналогового сигнала – АЦП и запоминания пикового значения входного напряжения, и цифровую, выполняющую роль быстрого преобразования аналогового сигнала в цифровые отсчёты с буфери-

зацией результатов измерения в быстродействующее оперативное запоминающее устройство (ОЗУ). Результаты измерения из ОЗУ последовательно выдаются в канал связи с вычислителем. Последующая обработка и преобразование данных выполняется в вычислителе.

Входные высоковольтные сигналы с датчиков 1÷6 поступают на делители напряжения с регулируемым коэффициентом деления. Высоковольтный делитель собран на высоковольтных конденсаторах и резисторах. Он обеспечивает равномерную амплитудно-частотную характеристику во всём диапазоне спектра принимаемого сигнала.

Предусмотрена возможность управления коэффициентом деления высоковольтного делителя путём подачи управляющего сигнала с микроконтроллера на элемент управления коэффициентом деления.

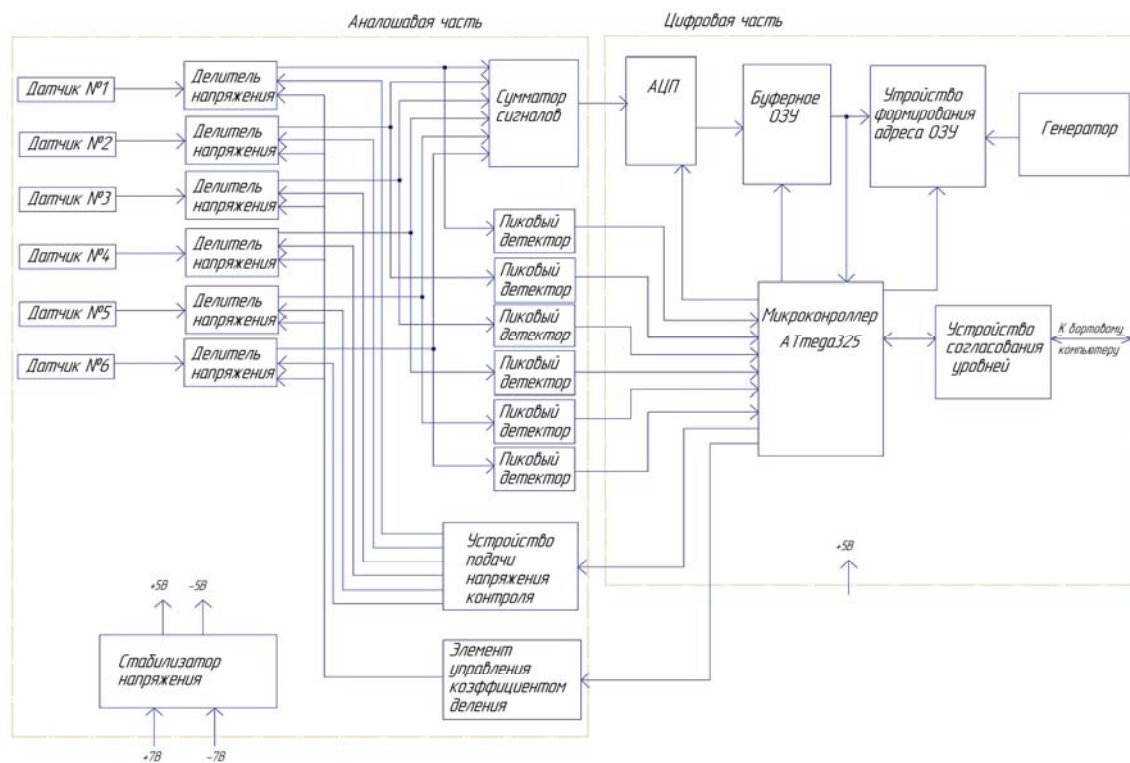


Рис. 3. Структурная схема измерителя параметров электростатического разряда

Сигналы с выходов делителя поступают на пиковые детекторы и на сумматор сигналов. Полученный суммарный сигнал оцифровывается с помощью АЦП и описывает форму и амплитуду разрядного импульса. Так как сигнал достаточно короткий, то он сначала записывается в быстродействующее буферное ОЗУ. После этого данные по запросу с бортового компьютера переписываются из буферного ОЗУ в память бортового компьютера.

Для проверки работоспособности каждого из каналов датчиков предусмотрено устройство подачи тестового напряжения контроля, которое имеет заданные входные параметры и подаётся на входные цепи.

Для определения номера датчика, с которого пришёл сигнал, используются пиковые детекторы. Так же по данным с пиковых детекторов определяется момент прихода сигнала и фиксируется амплитудное значение коротких импульсов.

Микроконтроллер обеспечивает обмен данными с бортовым компьютером, контролирует процесс измерения сигналов, а также управляет процессом контроля работоспособности модуля в целом.

Устройство согласования уровней обеспечивает необходимый интерфейс для связи микроконтроллера и бортового компьютера.

Питание модуля производится источниками +5 В (200 ма) для цифровых цепей и $\pm 7,2$ В (10 ма) для аналоговых цепей.

Модуль выполнен на двух двусторонних печатных платах из стеклотекстолита 165×55 мм. Подключение производится при помощи разъёмов DIN48 и DIN96.

Модуль измерения помехового напряжения на шине питания + 27 В и напряжения в цепи «шина-корпус» представляет собой программно-аппаратный комплекс, позволяющий осуществлять непрерывный круглосуточный контроль и регистрацию помех в подключаемых к нему цепях питания КА. Модуль позволяет проводить измерения параметров помеховых импульсов: в шинах питания + 27 В и между шиной питания и корпусом КА. При этом модуль измерения помехового напряжения на шине питания + 27 В и напряжения в цепи «шина-корпус» обеспечивает: измерение напряжения бортового питания, поступающего на его вход; сравнение измеренного значения с заранее установленным порогом, сохранение его в собственном ОЗУ в случае выхода текущего измеренного значения за заданные пороги (установки) и передачу сохранённых значений из ОЗУ в бортовую ЭВМ (рис. 4).

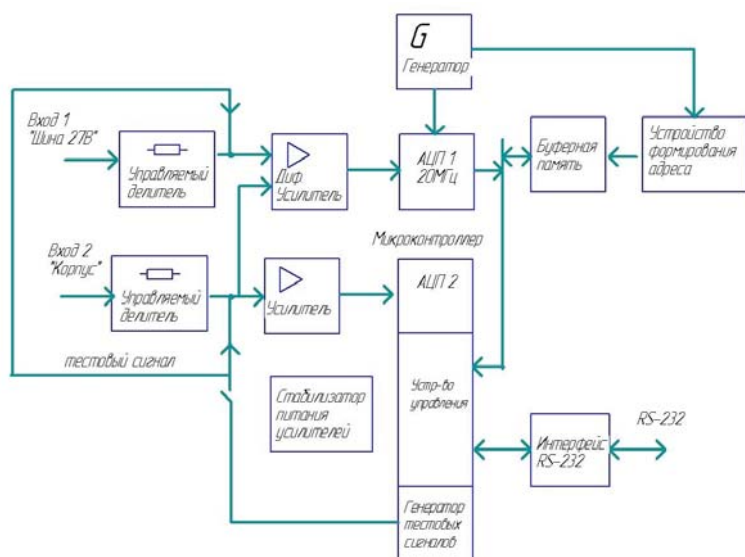


Рис. 4. Структурная схема измерителя помех по шине питания и помех в цепи «шина-корпус»

Регистрация осуществляется по двум независимым измерительным каналам. Первый канал работает в дифференциальном режиме, поддерживает одновременно режим непрерывного измерения амплитуды напряжения помехи с частотой до 10 МГц и режим пикового детектора, производится регистрация один раз за секунду максимальной величины напряжения относительно установившегося значения. Регистрация осуществляется по событиям, которыми являются превышение сигнала в контролируемой цепи за установленные пределы (установки). Шаг установки составляет $\sim 0,1$ В. Одно регистрируемое событие представляет собой 8096 выборок АЦП. При этом с помощью циклического буфера обеспечивается сохранение 50% предыстории события. При возникновении превышения уровня запись в память останавливается и производится перебор записанных данных для точного определения момента максимального отклонения, затем 1024 выборки вокруг этой точки передаются в память бортовой ЭВМ. Аналогичным образом работает канал низкочастотных измерений. Устройство имеет перестраиваемый входной резистивный делитель напряжения с коэффициентом деления 1:100 и 1:1000. Коэффициент деления выбирается автоматически на основе анализа амплитуды входного сигнала. Режим 1:100 используется для диапазона входных напряжений «шина-корпус» ± 100 В, режим 1:1000 – для ± 1000 В. Входное сопротивление устройства во всех режимах составляет 10 МОм. Для измерений высокочастотной составляющей переменного напряжения (10 КГц – 10 МГц) используется инструментальный усилитель и 8-разрядный АЦП с частотой дискретизации 20 МГц. Результаты измерений АЦП циклически записываются в буферную память объемом 8 КБ. Для измерения низкочастотной составляющей сигнала (от постоянного тока до 10 КГц) используется 8-разрядный АЦП с дифференциальным входом. На входе АЦП включён усилитель с перестраиваемым коэффициентом усиления

(1×, 10×, 200×), который выбирается в процессе работы автоматически для оптимизации динамического диапазона измерителя.

Питание модуля производится источниками +5 В (200 мА) для цифровых цепей и $\pm 7,2$ В (10 мА) для аналоговых цепей.

Модуль выполнен на двусторонней печатной плате из стеклотекстолита 165×55 мм. Подключение производится при помощи двух разъёмов – DIN48 и DIN96. Модуль подключается к бортовой ЭВМ посредством интерфейса RS-232. Выходными данными является массив измеренных значений. Модуль выдачи телеметрической информации и приёма команд управления (КУ) обеспечивает согласование и гальваническую развязку между выходным буфером вычислителя и телеметрической системой космического аппарата. Функциональная схема блока выдачи телеметрии и приёма КУ приведена на рис. 5.

Блок выдачи ТМИ осуществляет передачу ТМИ по 24 каналам. Для уменьшения линий связи от контроллера обработки сигналы передаются по последовательному интерфейсу SPI. Последовательный код преобразуется в параллельный при помощи регистров RG. В качестве гальванической развязки используются оптроны. Приём телеметрического пакета от вычислителя и управление выдачей осуществляется микроконтроллером. Связь с вычислителем осуществляется по унифицированному последовательному порту с протоколом RS 232.

Приём команд управления и передача их управляющему одноплатному компьютеру осуществляется микроконтроллером блока выдачи телеметрии. Структурно модуль приёма команд управления и блок выдачи телеметрии выполнены в виде единого блока, осуществляющего информационный обмен с системами КА. Сигналы бортового времени принимаются от бортового синхронизирующего координатно-временного устройства (БСКВУ) по двум четырёхпроводным каналам.

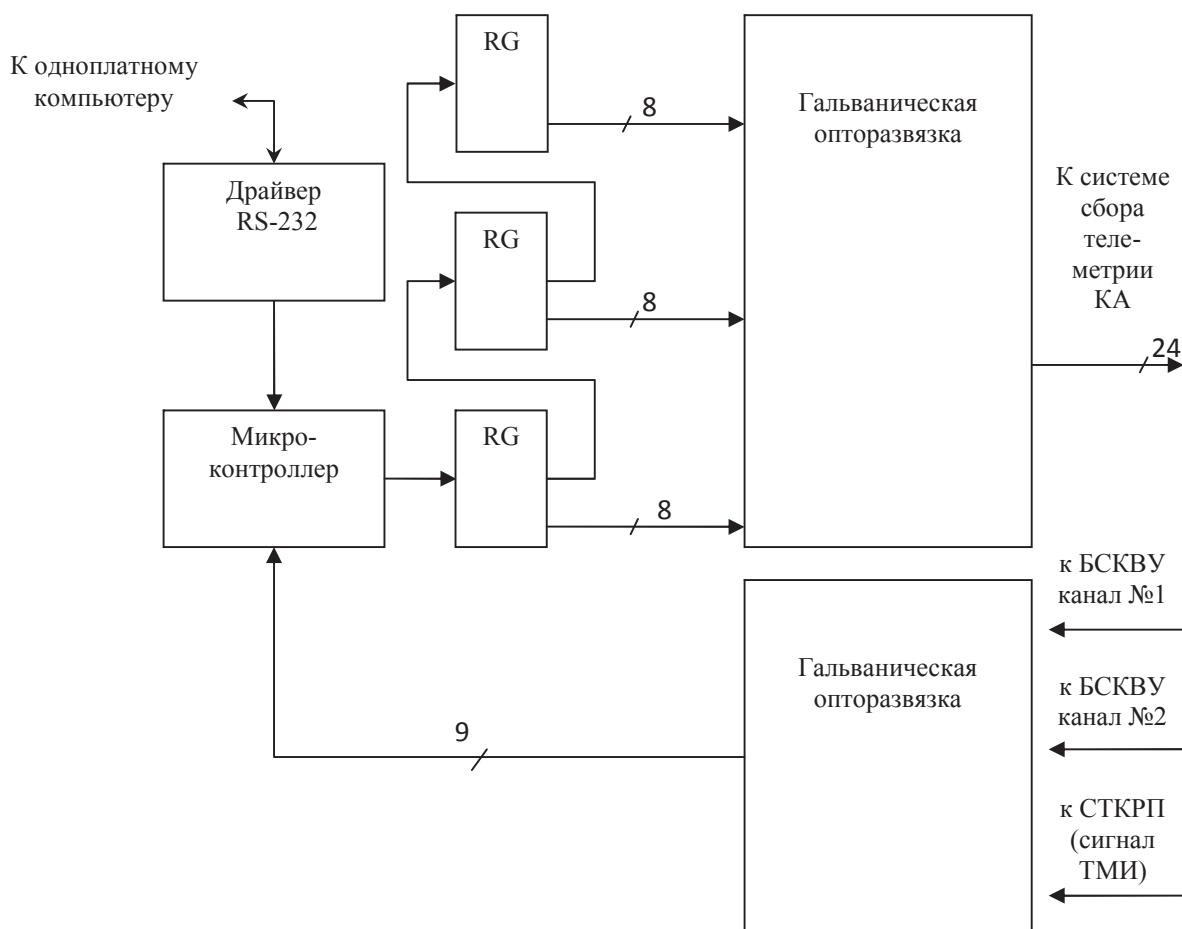


Рис. 5. Функциональная схема блока выдачи ТМИ и приёма КУ

Коммутатор питания используется для подключения и отключения питающего напряжения к блокам питания БП 1, БП 2 по командам управления. Коммутатор питания выполнен на основе поляризованных реле с управлением импульсным напряжением + 27 В.

Корпус блока электроники выполнен из алюминиевого сплава Д16 ГОСТ 21631-76 толщиной листа 5 мм. Для обеспечения коррозионной стойкости корпус покрыт термостойкой полимерной краской П-ЭП-ПЛ-102Т (2329-190-05011907 ТУ). На лицевой панели расположены коммуникационные разъёмы типа РС и штырь заземления. Электрические соединения между модулями выполняются с помощью монтажного провода МГТФ, собранного в жгуты.

Программное обеспечение «ШТИЛЬ-М» разработано на языке высокого уровня FreePascal с использованием методов объектно-ориентированного программирования. Предполагается работа программы в операционной системе MS-DOS, так как именно эта система (в комплект вычислителя входили три операционные системы: MS-DOS, Slackware Linux и Windows CE5.0) обеспечивает минимальное время загрузки вычислителя. Отдельные части программы (например управление тактовой частотой процессора) написаны на языке Си, что связано с удобством использования 32-разрядной адресации в 16-разрядной операционной системе.

Алгоритм программы предусматривает два основных режима работы устройства: с подключённой и отключённой

контрольно-проверочной аппаратурой (КПА). В первом режиме доступны команды тестирования устройства и высокоскоростной передачи результатов измерения, а во втором режиме «ШТИЛЬ-М» работает автономно, выполняя функции, обозначенные в техническом задании.

Датчики магнитного поля ДМ служат для измерения магнитного поля по трём осям.

Результаты первых измерений

Функционирование датчиковой аппаратуры «Штиль-М» предполагается в течение длительного срока (более пяти лет), и в настоящее время продолжает набираться статистика измерений. На момент написания статьи полученных данных ещё мало, чтобы говорить об окончательных результатах эксперимента. Однако считаем целесообразным привести результаты первых измерений для демонстрации возможностей датчиковой аппаратуры «Штиль-М».

Общая длина телеметрического пакета, формируемого датчиковой аппаратурой «Штиль-М», составляет 81 000 байт. Структурно-телеметрический пакет состоит из пяти блоков: блока контроля модуля магнитного поля и электростатических разрядов, блока измерения напряжения «шина-корпус», блока оцифровки электростатического разряда, блока измерения вектора магнитного поля и блока оцифровки напряжения питания и напряжения «шина-корпус».

Блок контроля модуля магнитного поля и электростатических разрядов формируется в памяти датчиковой аппаратуры каждые 5 минут. В нём содержатся данные о времени борта, полученные с БСКВУ, время с внутренних часов «Штиль-М», максимальные значения модулей магнитного поля за пять минут непрерывного измерения со всех шести датчиков-магнитометров, температуры дат-

чиков-магнитометров и максимальные значения пиковых детекторов модуля измерения электростатических разрядов. За сутки полёта формируется блок данных из 288 записей.

Зависимости максимальных значений модуля магнитного поля для всех шести датчиков-магнитометров приведены на рис. 6. Зависимости температур от времени приведены на рис. 7, а значения пиковых детекторов модуля измерения электростатических разрядов – на рис. 8.

Полученные значения согласуются с расчётными. Начало отсчёта на рисунках 6, 7 и 8 соответствует 5 дням 10 часам 12 минутам 59 секундам бортового времени КА «Ресурс-П».

Периодический вид зависимостей модуля магнитного поля от времени (рис. 6) обусловлен орбитальным движением КА, единичные всплески – работой бортовой аппаратуры.

Как видно из рис. 7, температура магнитометров стабильна и практически не меняется со временем.

Как видно из рис. 8, значения пиковых детекторов большую часть времени стабильны и не превышают напряжения шума, однако на шестом канале были зафиксированы четыре значения, резко превышающих значения остальных измерений. Малая ширина телеметрического канала не позволяет передать все оцифрованные значения с измерительных линий модуля измерения электростатических разрядов: в блоке оцифровки электростатического разряда содержится всего одна запись, соответствующая максимальному значению пикового детектора. В данном случае характерной для разрядного импульса зависимости напряжения от времени блок оцифровки разрядного импульса не содержит. Из этого можно сделать вывод, что пиковые детекторы шестого канала зафиксировали помехи, а не разряды.

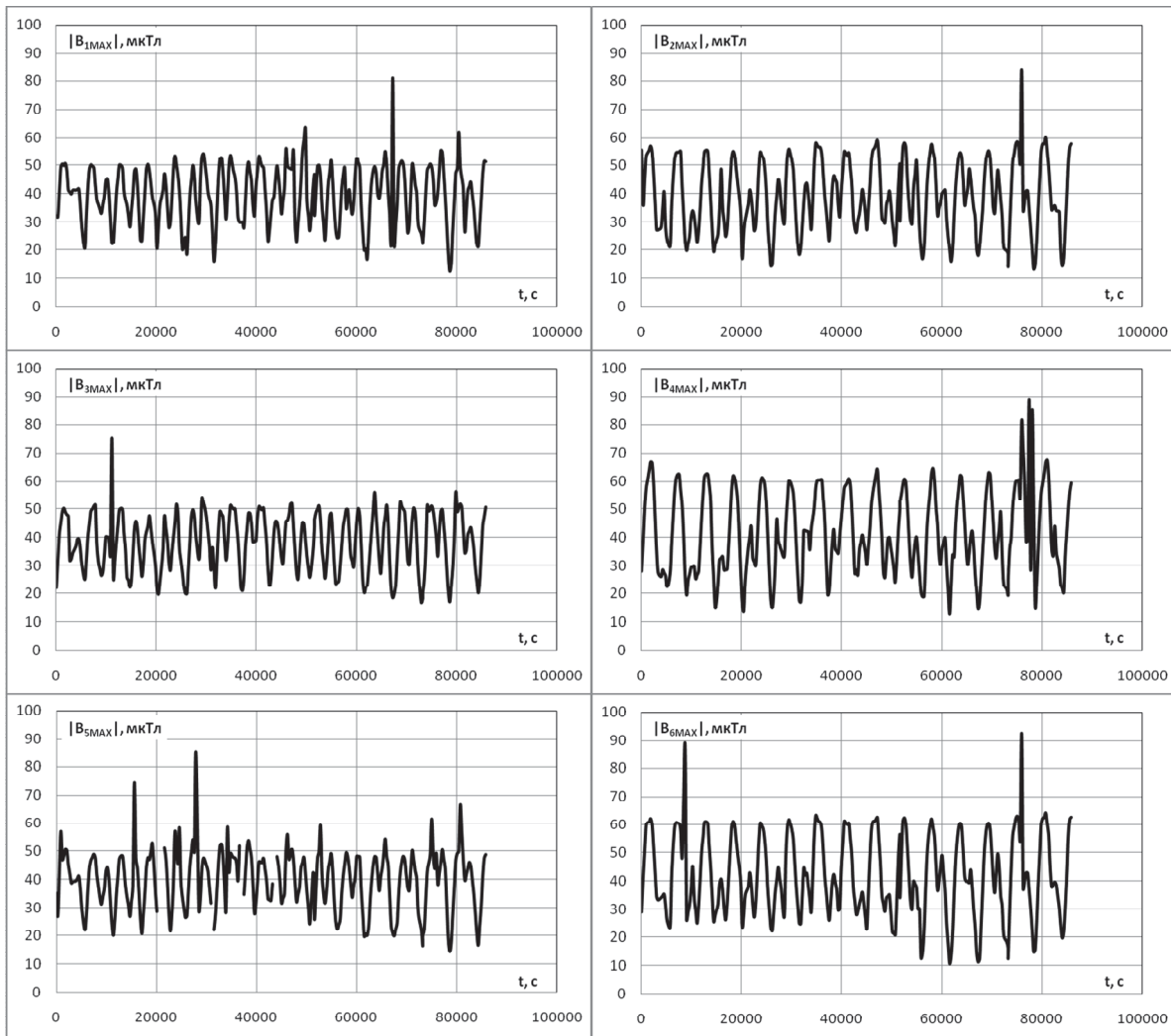


Рис. 6. Значения модуля магнитного поля

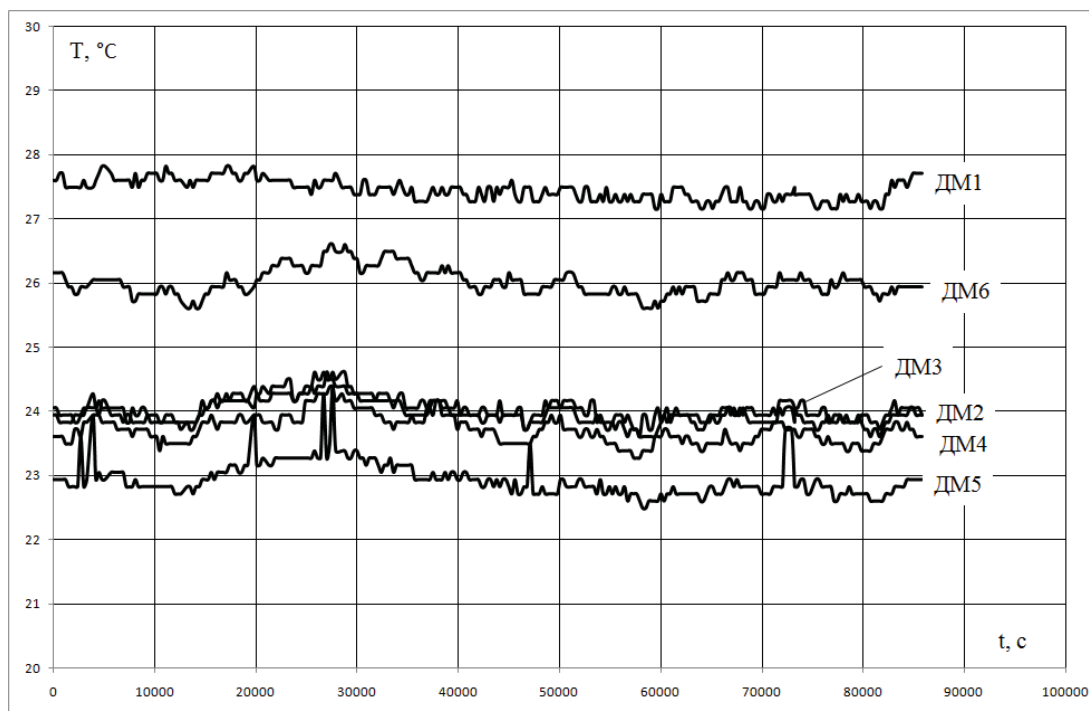


Рис. 7. Значения температур в местах установки магнитометров

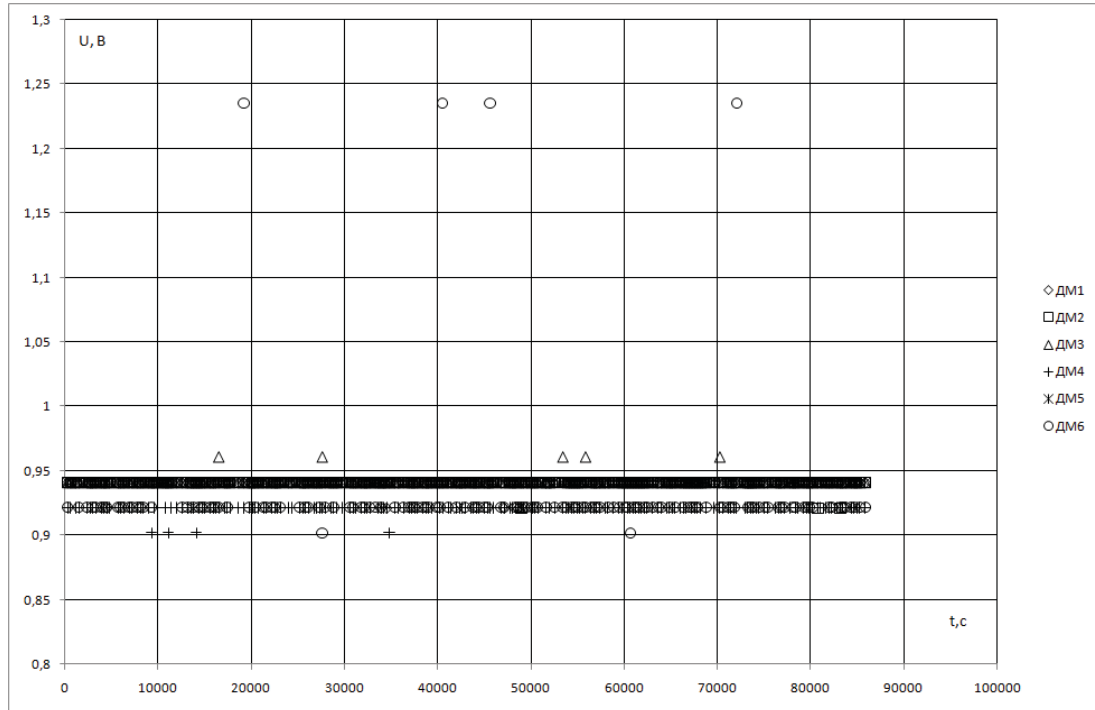


Рис. 8. Значения с пиковых детекторов модуля измерения электростатических разрядов

В блоке измерения напряжения «шина-корпус» содержатся измерения напряжения «шина-корпус», производимые каждые две секунды. Запись в телеметрию производится каждые пять минут одновременно с записью в блок контроля вектора магнитного поля и электростатических разрядов, что позволяет синхронизировать записи с бортовым временем и

сократить дублирование данных в телеметрической информации. Всего блок измерения напряжения «шина-корпус» содержит данные за два последних часа работы датчиковой аппаратуры «Штиль-М». Данные измерений приведены на рис. 9. Начало отсчёта на рис. 9 соответствует 6 дням 8 часам 12 минутам 59 секундам бортового времени КА «Ресурс-П».

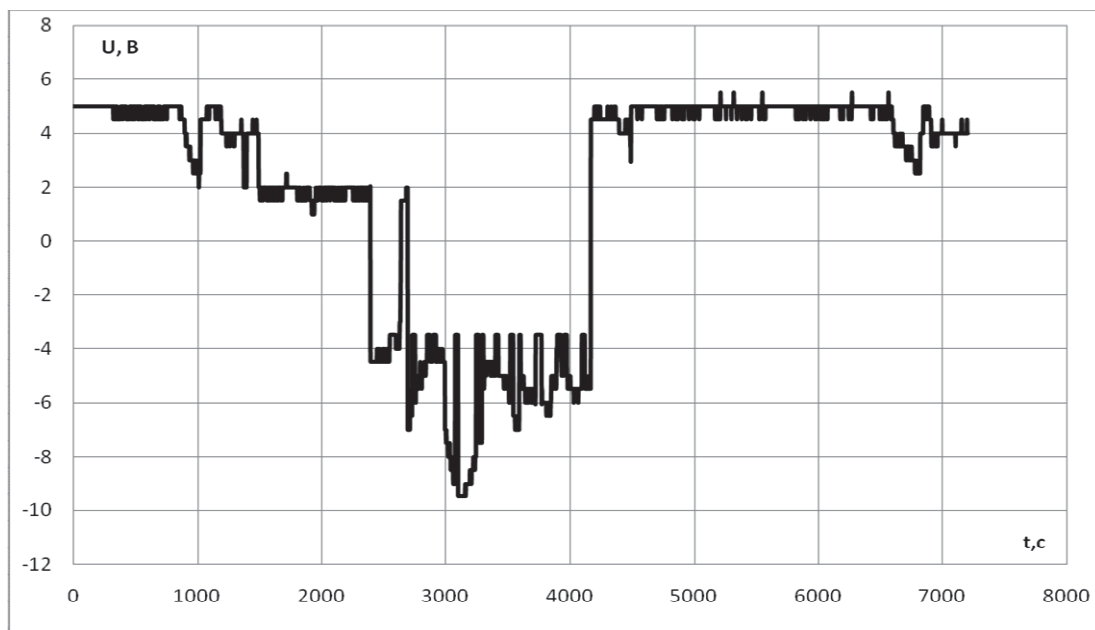


Рис. 9. Зависимость напряжения «шина-корпус»

Изменения напряжения «шина-корпус» объясняются орбитальным движением КА, а именно его переходом из зоны тени на солнечную сторону и обратно.

В блоке измерения вектора магнитного поля содержатся измерения магнитного поля первым магнитометром. Каждые 10 секунд производится одно измере-

ние вектора магнитного поля. За пять минут (период обновления пакета телеметрии) производится 30 таких измерений. Всего блок измерения вектора магнитного поля содержит данные за четыре последних часа работы датчиковой аппаратуры «Штиль-М». Данные измерений представлены на рис. 10.

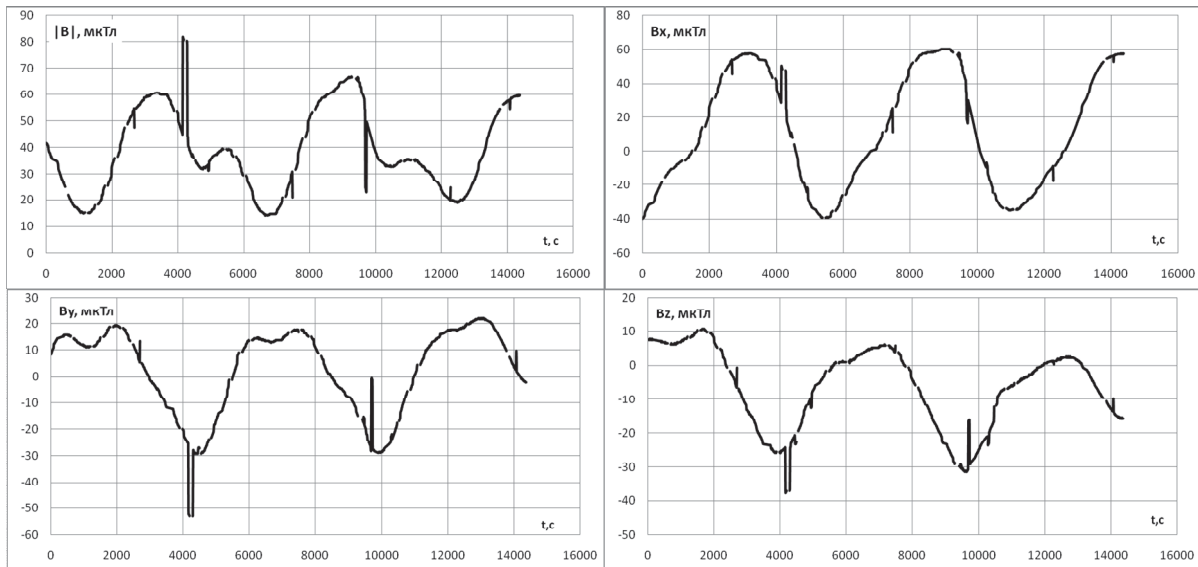


Рис. 10. Зависимости составляющих магнитного поля

Начало отсчёта на рис. 10 соответствует 6 дням 6 часам 12 минутам 59 секундам бортового времени КА «Ресурс-П». Периодичность зависимостей соответствует орбитальному движению КА.

В блоке оцифровки напряжения питания и напряжения «шина-корпус» содержится 24 измерения (12 оцифровок напряжения питания и 12 оцифровок

напряжения «шина-корпус»), содержащих максимальные значения за каждые пять минут непрерывной оцифровки. Резких изменений напряжения «шина-корпус» зафиксировано не было, поэтому приведём лишь данные оцифровки напряжения питания (рис. 11).

Как видно из рис. 11, напряжение бортовой сети составляет +27 вольт, однако имеют место шумы.

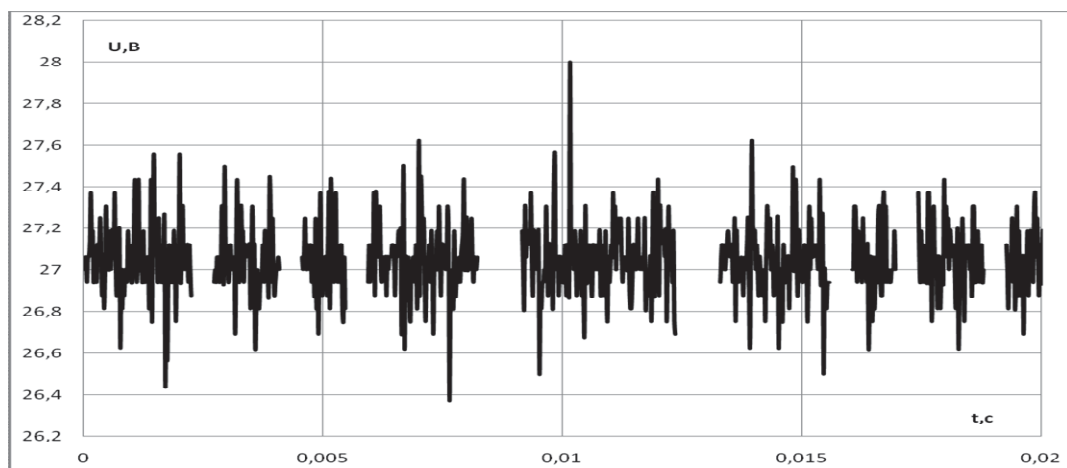


Рис. 11. Напряжение бортовой сети

Библиографический список

1. Определение вращательного движения спутника ФОТОН М-2 по данным бортовых измерений магнитного поля Земли / В. И. Абрашкин, Н. Л. Богоявленский, К. Е. Воронов и др. // Препринт Института прикладной математики им. М.В.Келдыша (http://www.keldysh.ru/papers/2005/prep96/FOTON_M2.PDF).
2. Серебров А.А., Усачев Ю.В., Шабельников В.Г. Исследование низкочастотных магнитных полей в обитаемых модулях космической станции «МИР» // Исследовано в России: электрон. журнал, 2004. № 36. С. 386-403.
3. Система управления и сбора данных аппаратуры СПРУТ-VI / А.И. Акулин, А.А. Беляев, Е.А. Грачев и др. // Приборы и техника эксперимента. 2004. № 1. С. 101-104.
4. Магнитометрическая система аппаратуры СПРУТ-VI / Е.А. Грачев, О.Р. Григорян, W. Riedler и др. // Приборы и техника эксперимента. 2004. № 1. С. 127-133.

Информация об авторах

Сёмкин Николай Данилович, доктор технических наук, заведующий кафедрой конструирования и технологии электронных систем и устройств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: semkin@ssau.ru. Область научных интересов: высокоскоростной удар, масс-спектрометрия, космическое приборостроение.

Воронов Константин Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: voronov@ssau.ru. Область научных интересов: высокоскоростной удар, масс-спектрометрия, космическое приборостроение.

Помельников Роман Александрович, кандидат технических наук, начальник отдела ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», Самара. E-mail: r_cosmos@mail.ru. Область научных интересов: высокоскоростной удар, масс-

спектрометрия, космическое приборостроение.

Шатров Сергей Александрович, инженер ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», г. Самара. Область научных интересов: высокоскоростной удар, масс-спектрометрия, космическое приборостроение.

Пияков Алексей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: piyakov@ssau.ru. Область научных интересов: высокоскоростной удар, космическое приборостроение.

Брагин Василий Владимирович, аспирант, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: bragin_vv@inbox.ru. Область научных интересов: электромагнитная совместимость, физика космической плазмы.

SENSOR EQUIPMENT “SHTIL-M” FOR CARRYING OUT EXPERIMENTS ON THE “RESOURCE-P” SPACECRAFT

© 2014 N. D. Semkin¹, K. E. Voronov¹, R. A. Pomelnikov²,
S. A. Shatrov², A. V. Piyakov¹, V. V. Bragin¹

¹Samara State Aerospace University

²Federal State Unitary Enterprise State Research and Production Space Rocket Center
“TsSKB-Progress”

Sensor equipment «Shtil-M» is described which is designed to monitor the magnetic environment of the “Resource-P” spacecraft with six three-component magnetometer sensors, to measure the magnetic field vector with a three-component magnetometer sensor, and to control the noise in power lines and possible electrostatic discharge registration. The results of measurements of the observed values are given.

Magnetic field, electrostatic discharge, noise, sensor equipment, spacecraft.

References

1. Determination of the rotational motion of the Foton M-2 satellite according to onboard measurements of the magnetic field of the Earth / Abrashkin V.I., Bogoyavlenskiy N.L., Voronov K.E. et al. // Preprint Instituta prikladnoy matematiki im. M.V.Keldysha. (http://www.keldysh.ru/papers/2005/prep96/FOTON_M2.PDF).
2. Serebrov A.A., Usachev Yu.V., Shabel'nikov V.G. Study of low frequency magnetic fields in the habitable space station «Mir» // Issledovano v Rossii. 2004. No. 36. P. 386-403.
3. Control and data acquisition system of SPRUT-VI equipment / Akulin A.I., Belyaev A.A., Grachev E.A. et al. // Pribory i tekhnika eksperimenta. 2004. No. 1. P.101-104.
4. Magnetometric system of SPRUT-VI equipment / Grachev E.A., Grigoryan O.R., Riedler W. et al. // Pribory i tekhnika eksperimenta. 2004. No. 1. P.127-133.

About the authors

Semkin Nikolay Danilovich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Department of Radio Engineering, Samara State Aerospace University E-mail: semkin@ssau.ru. Area of research: high-speed impact, mass spectrometry, space devices.

Voronov Konstantin Evgenyevich, Candidate of Science (Engineering), Department of Radio Engineering, Samara State Aerospace University. E-mail: voronov@ssau.ru. Area of research: high-speed impact, mass spectrometry, space devices.

Piyakov Alexey Vladimirovich, Candidate of Science (Engineering), Department of Design and Technology of Electronic Systems and Devices, Samara State Aerospace University. E-mail: piyakov@ssau.ru. Area of research: space device engineering.

Pomelnikov Roman Alexandrovich, Candidate of Science (Engineering), Head of Department, Federal State Unitary Enterprise “State Research and Production Space Rocket Center “TsSKB-Progress”. E-mail: r_cosmos@mail.ru. Area of research: hypervelocity impact, mass-spectrometry, space devices.

Shatrov Sergey Alexandrovich, engineer, Federal State Unitary Enterprise “State Research and Production Space Rocket Center “TsSKB-Progress”. Area of research: hypervelocity impact, mass-spectrometry, space devices.

Bragin Vasily Vladimirovich, post-graduate student, Department of Radio Engineering, Samara State Aerospace University. E-mail: bragin_vv@inbox.ru. Area of research: electromagnetic compatibility, space plasma physics.