электронный научно-технический журнал
ИНЖЕНЕРНЫЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51036. ISSN 2307-0595

Разработка электронной аппаратуры системы автоматического управления стендом для отработки мягкой посадки на динамически подобной модели по теме «ЛУНА-ГЛОБ»

08, август 2014

Савкин Л. В.[1,a], Щербаков А. Н.[1], Ильиных И. А.[1], Голиков Г. В.[2], Дмитриев В. Г.[3], Макаров А. С.[3]

УДК: 62-523.8

[1] Филиал ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», Российская Федерация, г. Калуга
[2] ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», Российская Федерация, г. Химки
[3] Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, г. Калуга
[a]Android4.1@mail.ru

Введение

Достижения современной электроники позволяют сегодня осуществлять сложнейшие проекты по созданию различных по уровню сложности систем управления в сравнительно короткие сроки. С этой целью разработчик электронной аппаратуры еще на начальных этапах проектирования, определившись с номенклатурой электронной компонентной базы (ЭКБ), может с помощью специализированных САПР и программных симуляторов промоделировать функционирование будущей системы управления.

Использование различных симуляторов позволяет моделировать работу электронной аппаратуры на всех этапах ее проектирования, включая математическое моделирование, разработку структурных, функциональных и принципиальных электрических схем, отладку программного обеспечения, разработку печатных плат и корпусов. Кроме того, сегодня ведется активное внедрение в САПР средств верификации проектов, позволяющих оценить эффективность будущей аппаратуры на системном и структурном уровнях.

В рамках проекта «ЛУНА-ГЛОБ» одной из задач, стоящих перед ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина» является создание стенда для отработки мягкой посадки на динамически подобной модели (далее бросковый стенд). С этой целью разрабатывается комплекс электронной аппаратуры, который должен обеспечить надежное функционирование электрической части броскового стенда во всех режимах бросковых испытаний.

Использование в процессе разработки системы автоматического управления бросковым стендом программных пакетов MATLAB, САПР Altium Designer и программного симулятора Proteus позволили значительно сократить общее время разработки структурной, функциональной и принципиальной электрических схем броскового стенда.

В данной статье рассматриваются основные особенности разрабатываемой системы управления и приводятся примеры важных с точки зрения повышения надежности схемо-технических и программно-алгоритмических решений.

1. Назначение и состав системы автоматического управления бросковым стендом

Система автоматического управления бросковым стендом предназначена для:

- измерения скорости движения макета спускаемого космического аппарата (КА) вдоль наклонной балки;
- сбора, обработки, хранения и выдачи информации результатов бросковых испытаний;
- формирования сигнала подрыва пирозамка (ПЗ) в устройстве крепления макета к тележке при достижении макетом заданной скорости;
- управления положением портала броскового стенда на горизонтальной оси;
- управления положением наклонной балки на вертикальной оси;
- осуществления автоматической блокировки системы управления бросковым стендом при не штатных ситуациях.

На рис. 1 показана структурная электрическая схема броскового стенда, которую можно поделить на две составляющих: силовую и не силовую.

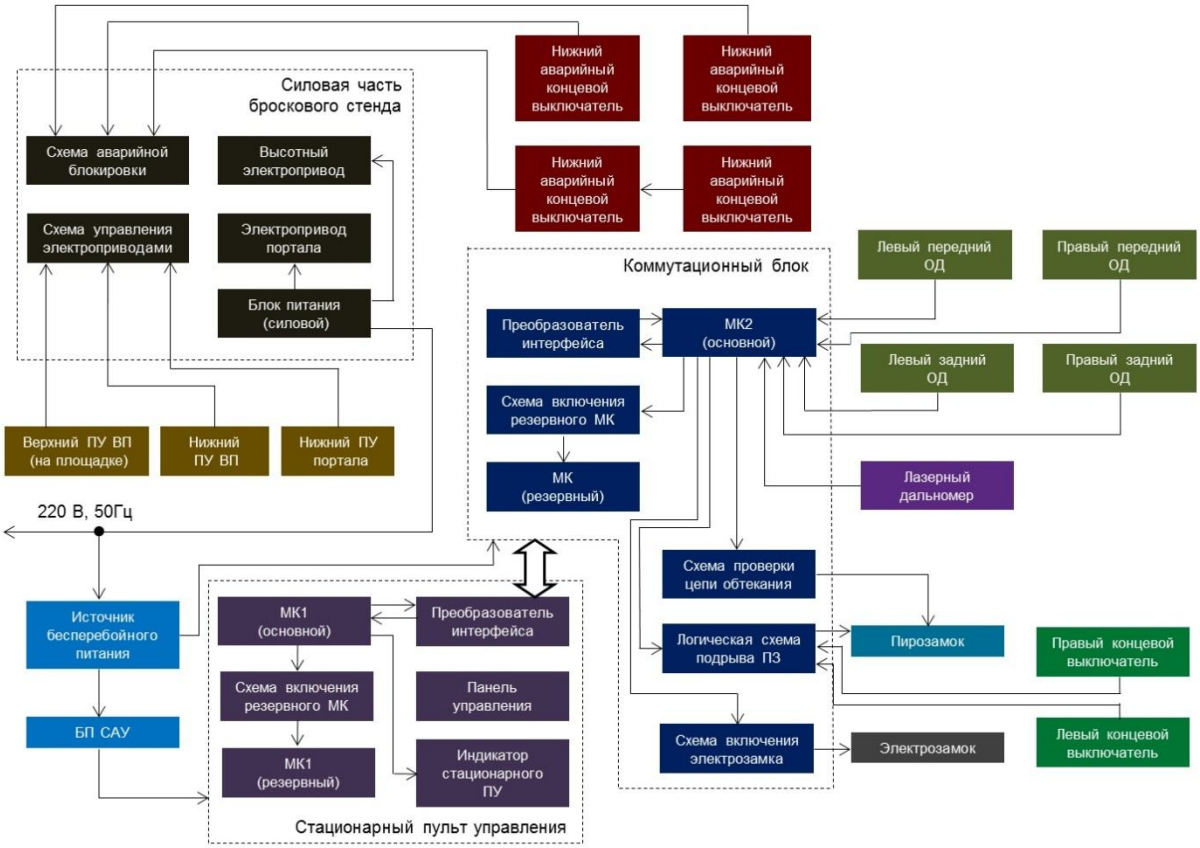

Рисунок 1. Структурная электрическая схема броскового стенда

К силовой части относятся схема аварийной блокировки, схема управления электроприводами, электроприводы портала и наклонной балки (высотный), силовой блок питания. При этом положением наклонной балки относительно земли можно управлять как непосредственно с нее самой с помощью верхнего пульта управления (верхний ПУ ВП), так и снизу у основания портала (нижний ПУ ВП). Управление положением портала осуществляется с помощью нижнего пульта управления, расположенного на земле.

К несиловой части относятся стационарный пульт управления, коммутационный блок, линейки оптических датчиков (ОД) и концевых выключателей, лазерный дальномер, ПЗ, электрозамок (ЭЗ), источник бесперебойного питания и блок питания системы автоматического управления (БП САУ). Стационарный пульт управления и коммутационный блок построены на базе микроконтроллеров ATmega 16 со схемой автоматического резервирования. Использование схемы резервирования, отработанной на микроконтроллерах семейства AVR, является одной из самых важных особенностей разрабатываемой аппаратуры.

Далее мы рассмотрим лишь самые ключевые особенности построения электронной аппаратуры системы автоматического управления, которые планируется реализовать в бросковом стенде.

2. Основные особенности системы автоматического управления бросковым стендом

2.1. Оптические щелевые датчики и лазерный дальномер

Внешний вид конструкции броскового стенда показан на рис. 2 слева.

Рисунок 2. Внешний вид броскового стенда и иллюстрация, поясняющая механизм движения макета по наклонной балке

Справа на этом же рисунке изображена наклонная балка, по которой в зависимости от заданного режима испытаний будет осуществляться движение тележки с прикрепленным к ней посредством пирозамка (ПЗ) макетом спускаемого КА. При достижении макетом скорости v_i, где i – номер режима бросковых испытаний, происходит подрыв ПЗ в устройстве крепления макета к тележке. В результате подрыва ПЗ осуществляется отделение макета спускаемого аппарата от несущей части тележки и приземление его на площадку для сброса.

Скорость движения макета v_i вычисляется исходя из таблицы 1, где указаны значения вертикальной v_y и горизонтальной v_x составляющих вектора скорости движения макета для i – го режима бросковых испытаний по формуле

$$v_i = \sqrt{v_{xi}^2 + v_{yi}^2},$$

где v_{yi} и v_{xi} соответственно вертикальная и горизонтальная составляющие скорости движения макета при i – м режиме бросковых испытаний.

Таблица 1 – Режимы бросковых испытаний

№ режима бросковых испытаний	**Вертикальна составляющая скорости движения макета v_y, м/с**	**Горизонтальная составляющая скорости движения макета v_x, м/с**	**Высота точки сброса h, м**
1	0,32	1,23	3,73
2	0,32	1,23	1,9
3	0,65	2,45	3,72
4	0,65	2,45	0,28
5	0	0	1,9
6	0	0	3,74

Одними из задач электронной аппаратуры является измерение скорости движения тележки с макетом по наклонной балке и формирование сигнала на подрыв ПЗ при достижении макетом скорости v_i. С этой целью неотъемлемой частью аппаратуры служат датчики двух типов:

1) оптические щелевые датчики;
2) лазерный дальномер.

С помощью оптических щелевых датчиков осуществляется как измерение скорости движения макета вдоль наклонной балки, так и формирование сигнала на подрыв ПЗ. Лазерный дальномер используется лишь для точного измерения скорости движения макета.

Оптические щелевые датчики, используемые в проекте, выполнены на базе лазерного светодиода и фототранзистора, разнесенных между собой расстоянием щелевого зазора равного 30 мм. Они крепятся к тележке таким образом, чтобы при движении каретки вдоль наклонной балки, щелевой зазор все время находился вдоль линейки эквидистантно расположенных металлических стержней (рис. 3).

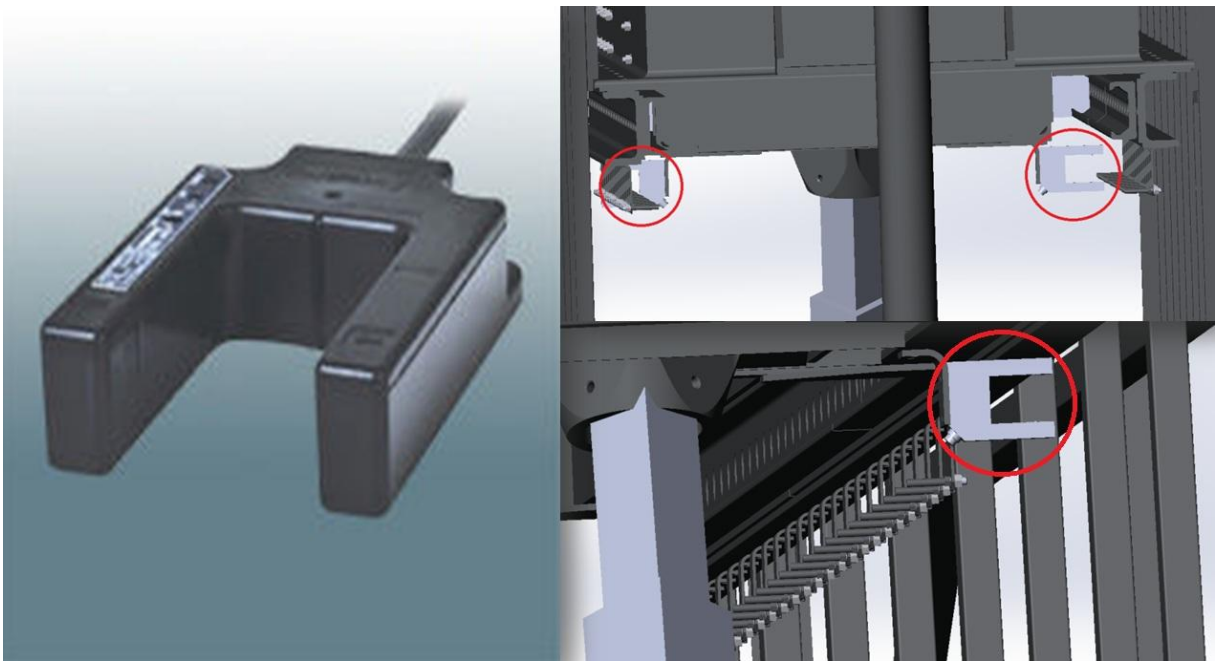

Рисунок 3. Оптический щелевой датчик и его крепление на бросковом стенде

Стержни размещены на прямой линии вдоль балки с шагом 100 мм. Каждый раз, пересекая стержень, на выходе оптического датчика будет формироваться напряжение уровня логического нуля U_0. В то время, когда в зазоре стержень будет отсутствовать, на выходе датчика будет напряжение соответствующее уровню логической единице U_1.

Рис. 4 иллюстрирует эпюры напряжений, сформированных на выходе оптического датчика при движении тележки вдоль наклонной балки.

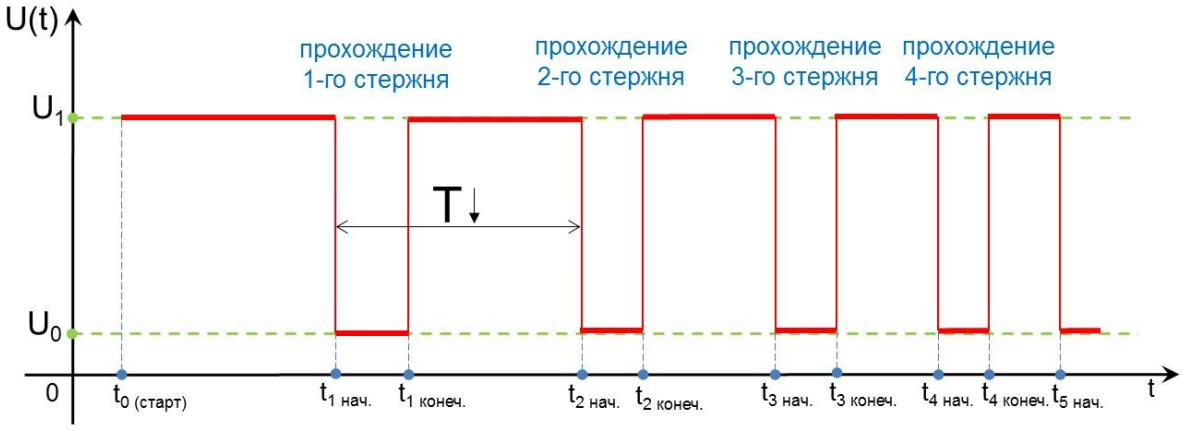

Рисунок 4. Эпюры напряжений оптического датчика

Из рис. 4 видно, что с течением времени период следования прямоугольных импульсов на выходе оптического датчика уменьшается, что связано с ускорением тележки при ее движении по наклонной балке. Моменты времени $t_{n\text{нач.}}$ и $t_{n\text{конеч.}}$ показывают соответ-

ственно время начала и время окончания затемнения n – ым стержнем луча оптического датчика в щелевом зазоре.

Задачей измерительной части системы управления является построение таблицы 2, на основе которой будут сформированы временные отчеты прохождения оптических датчиков вдоль стержней.

Таблица 2 – Формирование временных отчетов срабатывания оптических датчиков

Номер стержня N	**Временные отчеты**	
	Начало затемнения стержня, мкс	**Конец затемнения стержня, мкс**
1	$t_{1нач.}$	$t_{1конеч.}$
2	$t_{2нач.}$	$t_{2конеч.}$
3	$t_{3нач.}$	$t_{3конеч.}$
. . .	. . .	. . .
$\boldsymbol{n}$	$t_{nнач.}$	$t_{nконеч.}$

С помощью программы, установленной на МК коммутационного блока, производится пересчет временных отчетов в значения мгновенных скоростей движения тележки. Каждому стержню помимо присвоения номера, автоматически присваивается значение скорости, которое имела тележка, в момент прохождения ею стержня. Все данные измерений скорости сохраняются в памяти МК и в любой момент могут быть выведены оператором на экран индикатора стационарного пульта управления.

Как уже было сказано выше, в разрабатываемом проекте будет задействован лазерный дальномер, который крепится в конце наклонной балки у ее нижнего основания. С помощью дальномера будет осуществляться точное измерение скорости движения макета и выдача данных о результатах измерений в МК коммутационного блока по интерфейсу RS-485.

Следующую важную особенность системы управления, не смотря на то, что она напрямую относится к средствам измерения (оптические датчики и лазерный дальномер), следует выделить отдельно. Речь здесь идет больше об особенностях обработки сигналов измерений, а точнее об особенностях программно-алгоритмического обеспечения (ПАО), которые лучше привести независимо от аппаратной части.

2.2. Особенности построения ПАО для измерения скорости движения макета

Не смотря на то, что в описываемой электронной аппаратуре нет четко выделенной аппаратной части, предназначенной для измерений, все функции по обработке данных измерения скорости движения макета, поступающих с оптических датчиков и лазерного дальномера, возложены на базовый элемент системы управления – МК ATmega16.

Обработка всех данных измерений, их хранение и отображение на экране дисплея осуществляется посредством программ, установленных на МК стационарного пульта управления и коммутационного блока. При этом ПАО предусмотрено, что измерение ско-

рости движения макета по наклонной балке может производиться как перед проведением бросковых испытаний, так и во время испытаний.

Учитывая тот факт, что еще на ранних стадиях проектирования броскового стенда можно теоретически рассчитать изменение скорости движения тележки с макетом $v_i(t)$ для каждого i – го режима испытаний, в ПАО было предусмотрен так называемый узкий коридор значений $\Delta v_i(t)$, с помощью которого обеспечивается блокировка схемы подрыва ПЗ в случае выхода их строя одного из измерительных устройств (оптических датчиков или дальномера). Получая некорректные значения измеренных скоростей $v_i(t)$, выходящие за границы узкого коридора значений $\Delta v_i(t)$, МК коммутационного блока производит полную блокировку системы управления, давая знать оператору, что одно из измерительных устройств (или оба) неисправно.

2.3. Логическая схема подрыва ПЗ

В бросковом стенде планируется использовать четыре оптических датчика, размещенных совмещенными парами справа и слева передней части тележки (рис. 3, справа вверху).

Для надежного функционирования системы подрыва ПЗ, в ней предусмотрена логическая схема (рис. 5), посредством которой снижается вероятность нештатных срабатываний оптических датчиков. Данные срабатывания могут возникнуть по различным причинам: шумовые токи, скачки питающих напряжений, появление в щелевом зазоре летающих и ползающих насекомых.

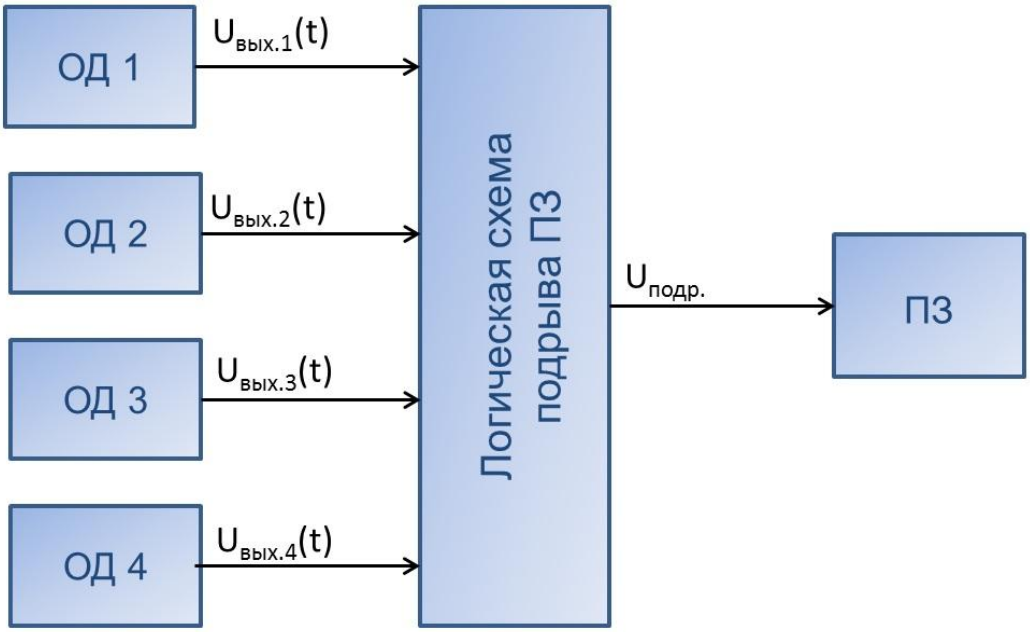

Рисунок 5. Логическая схема подрыва ПЗ

В таблице 3 показано, каким образом формируется напряжение подрыва ПЗ $U_{\text{подр.}}$ в зависимости от выходного напряжения оптических датчиков $U_{\text{вых.}j}(t)$, где j – порядковый номер оптического датчика (ОД).

Таблица 3 – Таблица состояний логической схемы подрыва ПЗ

	$\boldsymbol{U}_{\text{вых.}\mathbf{1}}(\boldsymbol{t})$	$\boldsymbol{U}_{\text{вых.}\mathbf{1}}(\boldsymbol{t})$	$\boldsymbol{U}_{\text{вых.}\mathbf{1}}(\boldsymbol{t})$	$\boldsymbol{U}_{\text{вых.}\mathbf{1}}(\boldsymbol{t})$	$\boldsymbol{U}_{\text{подр.}}$
$\boldsymbol{t_0}$	0	0	0	0	**0**
$\boldsymbol{t_1}$	0	0	0	1	**0**
$\boldsymbol{t_2}$	0	0	1	0	**0**
$\boldsymbol{t_3}$	0	0	1	1	**1**
$\boldsymbol{t_4}$	0	1	0	0	**0**
$\boldsymbol{t_5}$	0	1	0	1	**1**
$\boldsymbol{t_6}$	0	1	1	0	**1**
$\boldsymbol{t_7}$	0	1	1	1	**1**
$\boldsymbol{t_8}$	1	0	0	0	**0**
$\boldsymbol{t_9}$	1	0	0	1	**1**
$\boldsymbol{t_{10}}$	1	0	1	0	**1**
$\boldsymbol{t_{11}}$	1	0	1	1	**1**
$\boldsymbol{t_{12}}$	1	1	0	0	**1**
$\boldsymbol{t_{13}}$	1	1	0	1	**1**
$\boldsymbol{t_{14}}$	1	1	1	0	**1**
$\boldsymbol{t_{15}}$	1	1	1	1	**1**

Из приведенной таблицы видно, что для формирования сигнала на подрыв ПЗ ($\boldsymbol{U}_{\text{подр.}} = 1$), необходимо срабатывание как минимум двух датчиков из четырех.

Данную схему планируется реализовать аппаратно на базе мелкой логики, т. е. без использования программного обеспечения (ПО) МК.

В рассматриваемом случае уход от использования ПО обусловлен, прежде всего, необходимостью минимизировать время подрыва ПЗ с момента срабатывания оптических датчиков.

Следует также отметить, что в системе управления стендом предусматривается возможность отключения логической схемы подрыва. При этом подрыв будет осуществляться через транзисторный ключ, выполненный на базе мощного полевого транзистора.

2.4. Схема автоматического резервирования МК

Одним из важнейших подходов к проектированию аппаратуры управления бросковым стендом является рассмотрение и отработка разнообразных схемотехнических реше-

ний по повышению надежности функционирования электронной аппаратуры. С этой целью принято решение использовать автоматическое резервирование обоих МК, входящих в состав электронной аппаратуры, т. е. МК стационарного пульта управления и МК коммутационного блока.

С помощью рис. 6 иллюстрируется принцип автоматического резервирования МК.

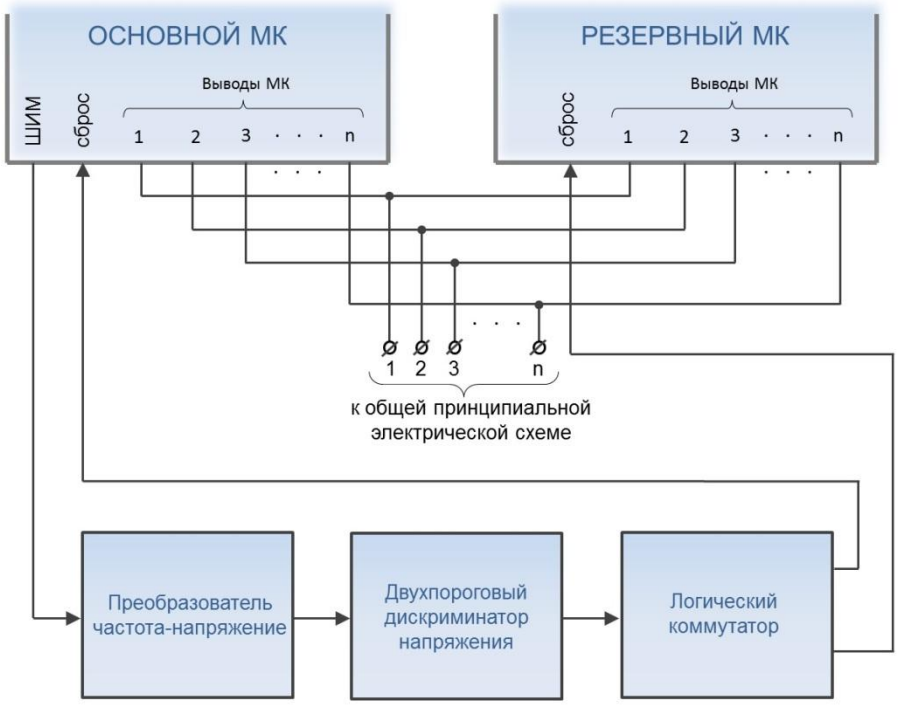

Рисунок 6. Принцип автоматического резервирования МК стационарного пульта управления и коммутационного блока

Выводы основного МК (условно пронумерованы от 1 до n), задействованные в общей принципиальной электрической схеме устройства, соединяются параллельно соответствующим выводам аналогичного резервного МК. Отключение резервного МК от общей схемы устройства обеспечивается подачей на его вывод сброса «$\overline{\text{Reset}}$» логического нуля, в то время как включенное состояние основного МК достигается за счет подачи на его вывод сброса «$\overline{\text{Reset}}$» логической единицы.

С помощью широтно-импульсного модулятора (ШИМ) основного МК формируется прямоугольная импульсная последовательность с частотой $f_{\text{ШИМ}}$. Проверка правильности функционирования основного МК осуществляется контролем частоты $f_{\text{ШИМ}}$ с помощью цепи резервирования, включающей в себя преобразователь частота-напряжение (ПЧН), двухпороговый дискриминатор напряжения (ДДН) и логический коммутатор (ЛК).

Прямоугольные импульсы с ШИМ поступают на вход ПЧН, с выхода которого снимается напряжение, величиной прямопропорциональной частоте импульсов $f_{\text{ШИМ}}$, т. е.

$$U_{\text{ШИМ}}(t) \sim f_{\text{ШИМ}}(t),$$

где $U_{\text{ШИМ}}(t)$ – напряжение на выходе ПЧН, соответствующее заданному значению частоты прямоугольных импульсов $f_{\text{ШИМ}}(t)$.

Это напряжение поступает на вход ДДН, выполненный на базе сдвоенного компаратора напряжений с двумя выделенными уровнями напряжений $U_{\text{пор}.max}$ и $U_{\text{пор}.min}$(рис. 7).

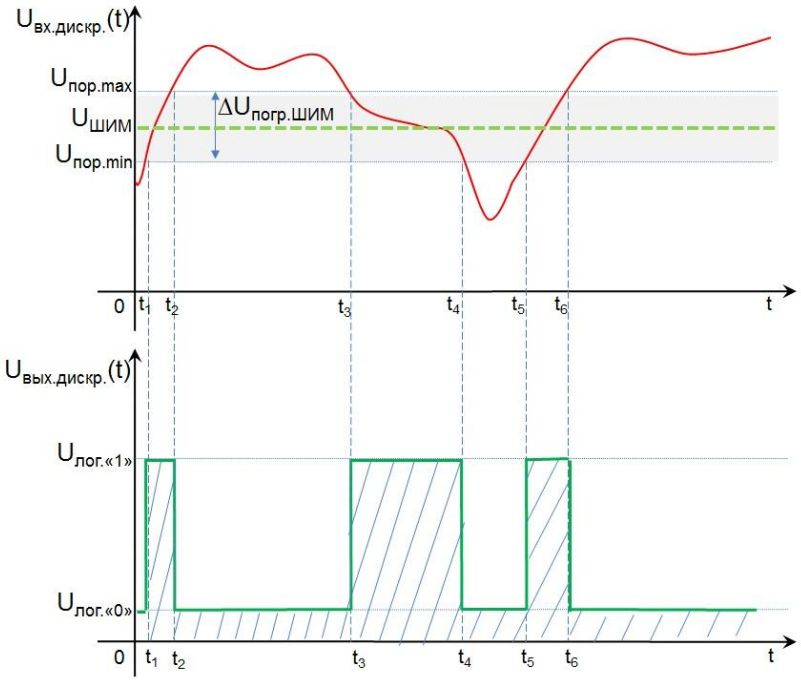

Рисунок 7. Иллюстрация, поясняющая принцип работы ДДН

С помощью этих двух уровней задается область значений $\Delta U_{\text{погр.ШИМ}}$, которая учитывает возможную погрешность частоты прямоугольных импульсов, формируемых в ШИМ основного МК.

На рис. 7 показано, каким образом формируются выходные логические уровни ДДН в зависимости от уровня входного напряжения, поступающего с ПЧН. Все значения входных напряжений ДДН $U_{\text{вх.дискр.}}$, лежащие вне области $\Delta U_{\text{погр.ШИМ}}$, формируют на его выходе напряжение уровня логического нуля $U_{\text{лог.«0»}}$. Значения $U_{\text{вх.дискр.}}$, лежащие в области $\Delta U_{\text{погр.ШИМ}}$, соответствуют сформированному на выходе ДДН напряжению, равному уровню логической единицы $U_{\text{лог.«1»}}$.

Т. о. можно записать, что $U_{\text{вх.дискр.}} = U_{\text{лог.«1»}}$, при условии

$$U_{\text{пор}.min} < kU_{\text{ШИМ}} < U_{\text{пор}.max},$$

где $U_{\text{пор}.min}$ и $U_{\text{пор}.max}$ соответственно минимальный и максимальный уровни напряжений дискриминации, а k – коэффициент, учитывающий погрешность частоты прямоугольных импульсов $f_{\text{ШИМ}}$.

При нормальном функционировании основного МК ($f_{\text{ШИМ}} = const$) на выходе ДДН сформирована логическая единица $U_{\text{лог.«1»}}$, поступающая на вход ЛК. ЛК, в свою очередь,

обеспечивает включенное состояние основного МК и выключенное состояние резервного МК, подавая на вход сброса «$\overline{\text{Reset}}$» первого логическую единицу, а второго – логический ноль.

При сбоях в работе основного МК, его зависании или выходе из строя напряжение на входе ДДН $U_{\text{вх.дискр.}}$ выйдет за пределы заданной области контролируемого напряжения $\Delta U_{\text{погр.ШИМ}}$, в результате чего на выходе ДДН сформируется логический ноль. В этот момент на выходе ЛК логические уровни напряжений поменяются местами, а, следовательно, произойдет переключение основного МК на резервный.

ЛК в данном случае имеет простую таблицу истинности и реализован на одном логическом элементе «НЕ» (инверторе), так как показано на рис. 3.

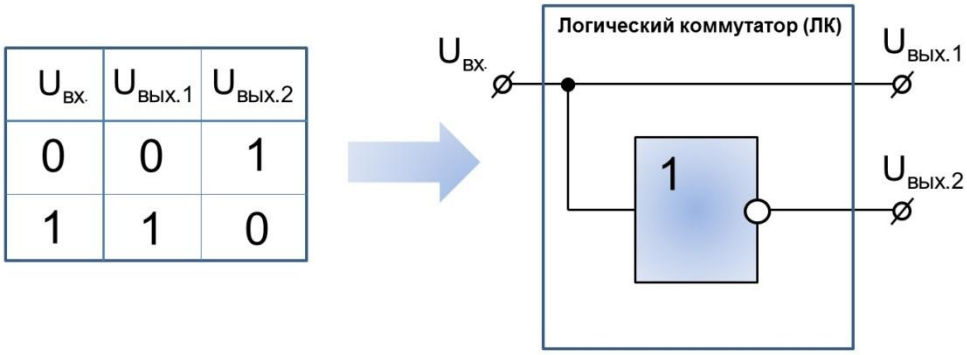

Рисунок 8. Вариант логического коммутатора на одном элементе «НЕ»

Резервные МК стационарного пульта управления и коммутационного блока запрограммированы аналогично основным, а в нашем случае оба МК еще и одного типа (ATmega16).

Заключение

Мы рассмотрели основные особенности разрабатываемой системы управления и привели примеры важных с точки зрения надежного функционирования схемотехнических и программно-алгоритмических решений. В качестве выводов можно отметить следующее:

- для измерения скорости движения макета по наклонной балке используется два типа измерительной аппаратуры: оптические щелевые датчики и лазерный дальномер;
- в бросковом стенде оптические щелевые датчики используются не только для измерения скорости перемещения каретки по наклонной балке, но и для формирования сигнала на подрыв ПЗ;

- в системе управления программно осуществлена двойная регистрация скорости движения по наклонной балке с помощью оптических щелевых датчиков и лазерного дальномера;
- в целях повышения надежности и безопасности функционирования системы подрыва ПЗ, в ней предусмотрена логическая схема формирования сигнала на подрыв ПЗ;
- в электронной аппаратуре применено автоматическое резервирование МК, входящих в состав стационарного пульта управления и коммутационного блока.

На данном этапе разработки уже созданы прототипы стационарного пульта управления броскового стенда и коммутационного блока, отработана схема автоматического резервирования МК.

Продолжает совершенствоваться логическая схема подрыва ПЗ с целью максимального снижения времени формирования сигнала на подрыв ПЗ с момента срабатывания оптических датчиков.

Параллельно с корректировкой электрической принципиальной схемы разрабатываются печатные платы электронных приборов.

Многие из полученных результатов разработки электронной аппаратуры по данному проекту представляют практический интерес для создания бросковых стендов аналогичных проектов, таких как «ЛУНА-РЕСУРС» и «Exomars». Это относится как к аппаратной части системы автоматического управления, так и к программно-алгоритмической.

Список литературы

1. Макаров В.П., Маркачев Н.А., Захаров Ю.В., Гришин С.А., Голиков Г.В. Создание и совершенствование стенда бросковых испытаний автоматических космических аппаратов/Вестник НПО им. С.А. Лавочкина, №1, 2013,с.56-62.
2. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. – М.: Изд. БИНОМ, 2012.-704 с.
3. Аверченков О.Е. Схемотехника: аппаратура и программы. – М.: Изд. ДМК, 2012.-588с.
4. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2007.-751 с.
5. Ревич Ю.В. Практическое программирование микроконтроллеров Atmel AVR на языке ассемблера. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012.-352 с.