

УДК 621.316.718

РАЗРАБОТКА ОТЕЧЕСТВЕННОГО МОДУЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ МЕХАНИЗМОМ, СТОЙКОГО К ВОЗДЕЙСТВИЮ СПЕЦИАЛЬНЫХ ФАКТОРОВ

*Азябин С.В., инженер-исследователь 3 категории АО «Российские космические системы»,
e-mail: design-centre@spacecorp.ru;*

*Бумагин А.В., к.т.н., заместитель начальника отдела АО «Российские космические системы»,
e-mail: design-centre@spacecorp.ru;*

Гондарь А.В., начальник сектора АО «Российские космические системы», e-mail: design-centre@spacecorp.ru;

*Иванов Н.А., ведущий инженер-исследователь АО «Российские космические системы»,
e-mail: design-centre@spacecorp.ru;*

*Мартынов Д.С., инженер-исследователь 3 категории АО «Российские космические системы»,
e-mail: design-centre@spacecorp.ru;*

Стещенко В.Б., к.т.н., доцент, заместитель генерального конструктора АО «Российские космические системы», e-mail: design-centre@spacecorp.ru;

Шишкин О.Н., начальник отдела АО «Российские космические системы», e-mail: design-centre@spacecorp.ru.

DEVELOPMENT OF DOMESTIC ACTUATORS CONTROL MODULE RESISTANT TO THE IMPACT OF SPECIAL FACTORS

*Azyabin S.V., Bumagin A.V., Gondar, A.V., Ivanov N.A.,
Martynov D.S., Steshenko V.B., Shishkin O.N.*

This article is devoted to domestic actuators control module resistant to the impact of special factors and can be used as part of on-board equipment, such as antennas drive control systems, photodetectors and valves. The module used algorithm «Slow Decay» for control of power switches H-bridge.

Key words: gate array, on-board equipment, actuator control, stepper motor, algorithm, digital control.

Ключевые слова: БМК, бортовая аппаратура, управление исполнительным механизмом, шаговый двигатель, алгоритм, цифровое управление.

Введение

Модуль управления исполнительным механизмом разработан в целях импортозамещения и выполняет задачу управления биполярным шаговым двигателем БА КА посредством силовых ключей схемы H-моста [1]. Ввиду требований к аппаратуре, применяемой в БА КА (габариты, масса, стойкость к внешним воздействиям), в модуле использована отечественная элементная база в бескорпусном исполнении, стойкая к ДФКП (микросхемы, транзисторы, диоды) и пассивные компоненты для поверхностного монтажа (керамические резисторы, керамические и танталовые конденсаторы) [3].

В настоящий момент на отечественном рынке не представлены функционально законченные модули управления исполнительными механизмами. Среди зарубежных изделий ближайшим функциональным аналогом является контроллер L6228 фирмы ST Microelectronics (Франция). Разработанный микромодуль отличается от зарубежного аналога увеличенным более чем в два раза током нагрузки, расширенным рабочим температурным диапазоном и стойкостью к воздействию ДФКП.

Модуль выполнен в корпусе из кобальта. Все элементы модуля размещены на поликоровой подложке. Вы-

Рассмотрен отечественный модуль управления исполнительным механизмом (МУИМ) стойкий к воздействию специальных факторов для применения в составе бортовой аппаратуры космических аппаратов (БА КА), таких как системы управления приводами антенн, фотоприемников и клапанов. В модуле использован алгоритм «Slow Decay» управления силовыми ключами H-моста.

бор материала подложки обусловлен высоким коэффициентом теплопроводности и близким к материалу корпуса коэффициентом теплового расширения.

МУИМ обладает следующими основными характеристиками:

- напряжение питания силовых цепей, B – не более 36;
- ток нагрузки (обмотки), A – не более 3,5;
- стойкость к воздействию ДФКП по суммарной накопленной дозе радиации, - не менее 100 крад (Si);
- пороговая стойкость ко всем видам одиночных эффектов от воздействия тяжёлых заряженных частиц (ТЗЧ) и высокоэнергетических протонов (ВЭП) – не ниже 60 МэВ ($мг \cdot см^2$).

МУИМ обеспечивает:

- функцию ограничения тока в обмотках шагового двигателя;
- функцию защиты от обратного напряжения цепи управления;
- функцию управления направлением вращения шагового двигателя;
- функцию управления режимами разгона и торможения;

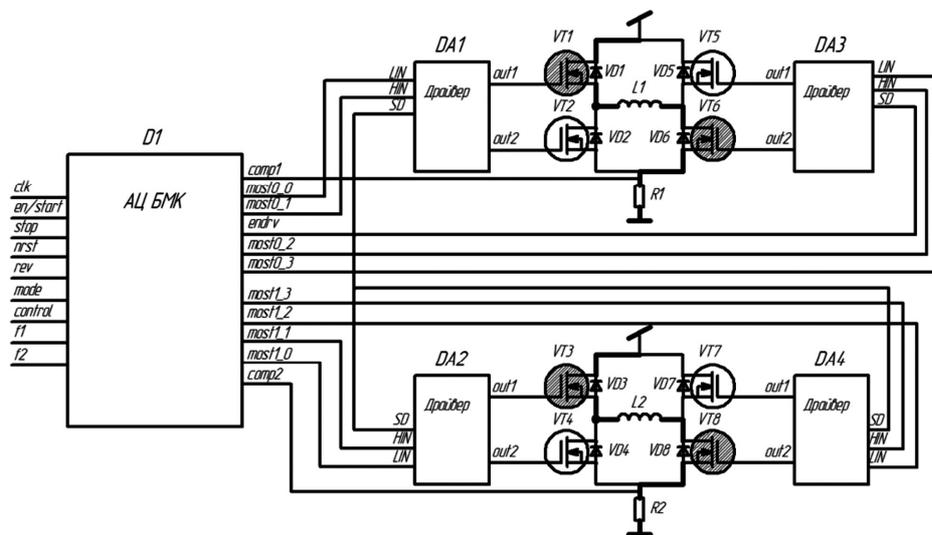


Рис. 1. Функциональная схема МУИМ

- режим шаг/полушаг;
- КМОП 3,3 В-совместимый уровень цифровых сигналов;

При этом в отличие от зарубежного аналога микро-модуль может работать в расширенном интеллектуальном режиме, обеспечивающем дополнительные функции (возможность выбора рабочей частоты, времени разгона и торможения).

Функциональная схема МУИМ представлена на рис. 1.

В состав МУИМ входят следующие элементы (рис. 1):

- интегральная схема D1, реализующая алгоритмы цифрового управления;
- драйверы полевых транзисторов DA1..DA4;
- силовые полевые транзисторы VT1..VT8;
- силовые диоды VD1..VD8;
- линейные стабилизаторы напряжения +5 В, +3,3 В. (Обмотки шагового двигателя L1, L2, резисторы обратной связи R1, R2 на функциональной схеме показаны условно).

Управляющая полузаказная ИС D1 выполнена на основе стойкого к ДФКП аналого-цифрового базового матричного кристалла АЦ БМК 5400TP015 разработки ООО «Дизайн центр Союз» [6]. Это решение позволило сократить сроки и стоимость разработки и не проводить отдельные квалификационные испытания микросхемы (механические, климатические, на стойкость к ДФКП), т.к. все испытания были проведены на тестовом кристалле.

Разработанное устройство функционирует следующим образом. В зависимости от сигнала на конфигурационном входе ИС D1 *Control* происходит выбор между режимом совместимости и расширенным интеллектуальным режимом. Выбор направления вращения, а также режимов шаг/полушаг осуществляется подачей сигналов на конфигурационные входы *Rev* и *Mode*, соответственно.

В режиме совместимости с контроллером L6228 при наличии на командном входе *En* логической «1» вращение двигателя осуществляется подачей на вход *Clk* тактовой частоты, пропорциональной частоте вращения двигателя. В расширенном интеллектуальном режиме для вращения двигателя также необходимо наличие на входе *Clk* тактовой частоты, но при этом процессы раз-

гона и торможения запускают фронты управляющих сигналов *En* и *Stop*. Выбор номинальной частоты вращения, времени разгона и торможения осуществляется подачей различных логических комбинаций на конфигурационные входы *F1*, *F2*.

Алгоритм, заложенный в ИС D1, осуществляет преобразование тактового сигнала *Clk* для последующей подачи управляющих сигналов на драйверы DA1..DA4, управляющие полевыми транзисторами. Преобразование логического уровня ИС КМОП 3,3 В в логический уровень драйверов +5 В осуществляется восьмиканальным преобразователем уровня, выполненном в составе D1.

Драйверы DA1..DA4 осуществляют управление транзисторами, входящими в состав H-мостов. Каждый полумост, состоящий из пар силовых полевых транзисторов VT1 и VT2, VT3 и VT4, VT5 и VT6, VT7 и VT8 управляется одним драйвером DA1..DA4, соответственно. Для управления вращением двигателя необходимо периодически изменять направление тока через обмотки L1 и L2. С этой целью поочередно включаются диагонали VT1-VT6, VT2-VT5 первого и VT3-VT8, VT4-VT7 – второго H-моста. Обмотки шагового двигателя L1, L2 подключаются к силовым выводам МУИМ *Upr01*, *Upr02*, *Upr11*, *Upr12*. Нагрузка R1, R2, подключенная к выводам *Nagr1*, *Nagr2*, обеспечивает обратную связь для схемы ограничения тока в обмотках. Макетный образец МУИМ представлен на рис. 2.

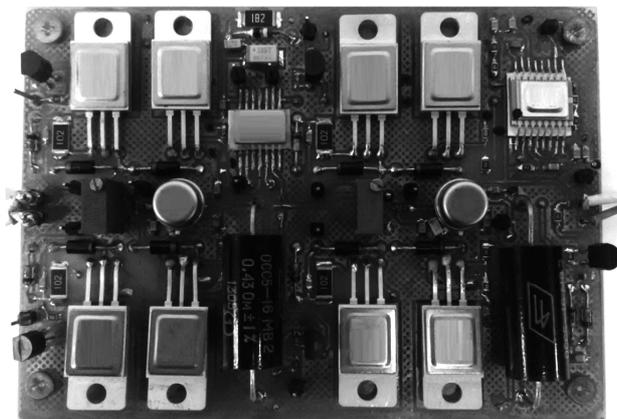


Рис. 2. Макетный образец МУИМ

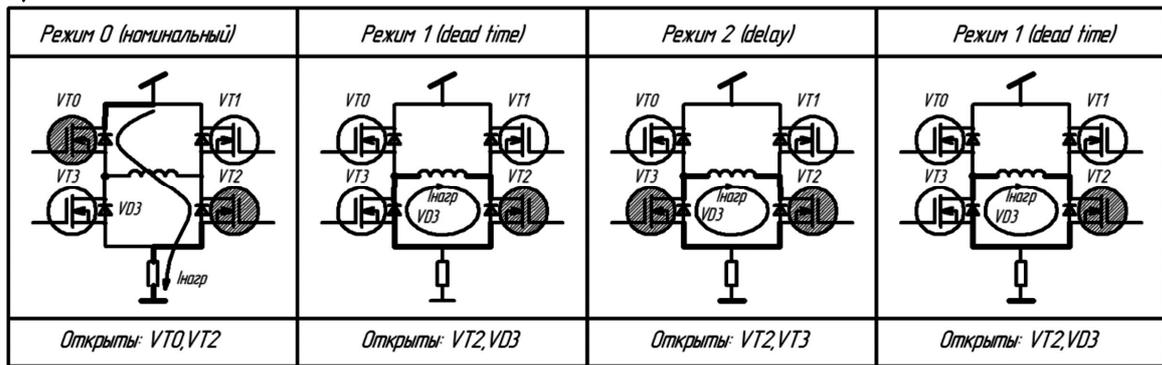


Рис. 3. Схема протекания тока в ключах H-моста в режиме «Slow decay»

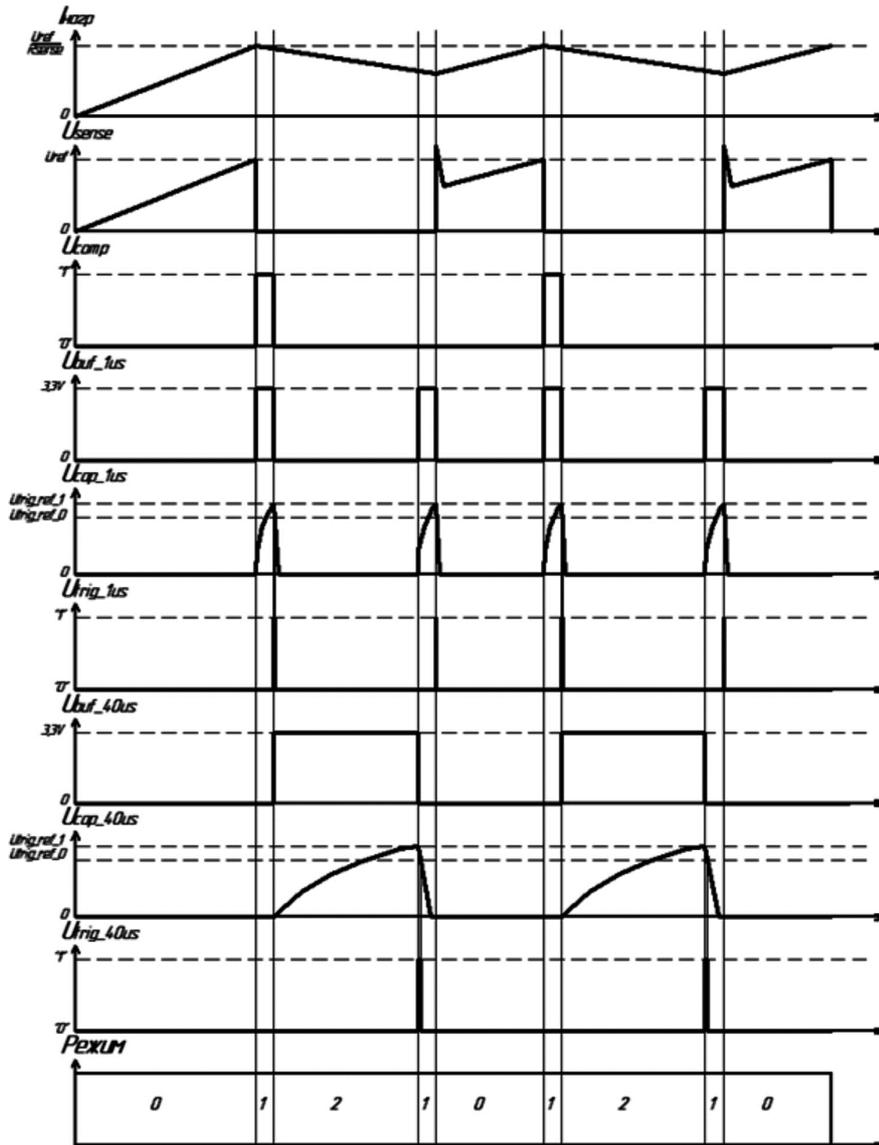


Рис. 4. Временные диаграммы режима «Slow Decay»

Рассмотрим алгоритм работы МУИМ в расширенном интеллектуальном режиме. Работа шагового двигателя начинается с команды «Пуск». При этом анализируется логическое состояние входов *Mode*, *Rev* и *Vst*. В зависимости от их логического состояния задается режим работы двигателя.

Сразу после подачи команды «Пуск» контроллер переходит в состояние разгона двигателя, которое характеризуется плавным увеличением рабочей частоты.

Максимальная рабочая частота и время разгона задаются подачей цифровых данных на шину *Vst* и могут изменяться в широких пределах. По завершению разгона двигателя контроллер переходит в рабочий режим, характеризующийся постоянной частотой вращения. Для изменения направления вращения двигателя и включения режима «шаг/полушаг» достаточно изменить логическое состояние на входе *Rev* или *Mode*, соответственно, и подать команду «Старт». В случае изменения направ-



ления вращения вала двигателя контроллер остановит и запустит его в обратном направлении.

Торможение двигателя осуществляется плавно по команде «Стоп». Время торможения так же как в случае с разгоном задается сигналами шины V_{st} и может изменяться в широких пределах. Если в процессе торможения на контроллер придет команда «Старт», то контроллер остановит процесс торможения и начнет разгон с последующим выходом в рабочий режим.

Рассмотрим применение функции ограничения тока в обмотках, реализованной с применением известного алгоритма «Slow Decay» (рис. 3) [5].

Временные диаграммы, отражающие принцип работы схемы защиты по току, приведены на рис. 4.

Разработанный контроллер реализует режим медленного затухания тока или «Slow Decay». При превышении порогового значения тока U_{ref}/R_{sense} в обмотках шагового двигателя $I_{нагр}$, на выходе компаратора U_{comp} формируется высокий логический уровень. Сигнал с U_{comp} подается на вход $Comp$ управляющего модуля. Фронт сигнала U_{comp} инициирует процесс медленного затухания тока. Указанный алгоритм состоит из двух периодов $Deathtime$ длительностью 1 мкс и одного периода рециркуляции тока в нижнем полумосте длительностью 40 мкс. Длительность указанных периодов задается цепями задержки, состоящими из конденсаторов, буферов и триггеров Шмидта.

Алгоритм медленного затухания реализован следующим образом. По фронту сигнала U_{comp} , на выходе буфера цепи задержки на 1 мкс формируется уровень сигнала $U_{buf_1\mu s}$, равный напряжению питания, благодаря чему в течение времени задержки 1 мкс происходит зарядка емкости до уровня $U_{trig_ref_1}$. Уровень напряжения на конденсаторе фиксируется триггером Шмидта, и по достижении порога срабатывания триггером формируется высокий логический уровень сигнала $U_{trig_1\mu s}$; далее снимается напряжение $U_{buf_1\mu s}$. При этом происходит быстрая разрядка конденсатора. На протяжении этого периода работающий транзистор верхнего полумоста отключается, а транзистор нижнего полумоста находится в открытом состоянии.

По истечении времени 1 мкс на выходе буфера цепи задержки на 40 мкс формируется уровень напряжения

$U_{buf_40\mu s}$, равный напряжению питания, благодаря чему в течение времени задержки 40 мкс происходит зарядка конденсатора до уровня $U_{trig_ref_1}$. Уровень напряжения на конденсаторе фиксируется триггером Шмидта, и по достижении порога триггером формируется высокий логический уровень сигнала $U_{trig_40\mu s}$; далее снимается напряжение $U_{buf_40\mu s}$. При этом происходит быстрая разрядка конденсатора. На протяжении этого периода транзисторы верхнего полумоста находятся в закрытом состоянии, а нижнего – в открытом. По окончании времени задержки 40 мкс снова включается цепь задержки на 1 мкс. По прошествии времени 1 мкс контроллер возвращается в штатный режим функционирования.

Использование АЦ БМК позволило реализовать компараторы обратной связи и элементы задержки схемы защиты по току обмоток двигателя в одной микросхеме.

Заключение

Разработан радиационно-стойкий модуль, являющийся функциональным аналогом контроллера управления шаговым двигателем L6228, полностью на отечественной ЭКБ, отличающийся от аналогов наличием дополнительных функций разгона и торможения, а также превосходящий аналог по ряду параметров. Модуль может применяться в широком спектре аппаратуры для управления исполнительными механизмами.

Литература

1. Анхимюк В.Л., Опейко О.Ф. Проектирование систем автоматического управления электроприводами. – Минск: Высшая школа, 1986.
2. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. – Л.: Энергоиздат, 1982.
3. Белоус А.И. и др., Космическая электроника. В 2 кн. Кн. 1 – М.: Техносфера, 2015.
4. Глазенко Т.А. Полупроводниковые преобразователи в электроприводах постоянного тока. Л.: Энергия, 1973.
5. Кенио Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления. – М.: Мир, 1987.
6. Микросхемы интегральные на основе АЦ БМК 5400ТР014 и АЦ БМК 5400ТР015. Технические условия. АЕНВ.431260.056ТУ, Москва 2014.