

МАЛОГАБАРИТНАЯ АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ УПРАВЛЯЕМОГО ЗАПУСКА НАНОСПУТНИКОВ

О. В. ФИЛОНИН

*Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева,
(национальный исследовательский университет)
448086, Самара, Россия,
E-mail: phylonin@gmail.com*

Представлена малогобаритная микропроцессорная система запуска наноспутников с определенными параметрами отделения (начальной скоростью, зенитным и азимутальным углами) на заданные траектории. Система содержит магнитоиндукционный эжектор, механизмы ориентации отделяемого аппарата в зенитном и азимутальном направлениях, микропроцессорный модуль управления. Система отделения может быть размещена на любом средстве доставки или на Российском сегменте МКС.

Ключевые слова: наноспутник, система выведения отделяемого аппарата, система запуска, микропроцессорный модуль управления

В настоящее время многие отечественные, зарубежные компании и университеты активно занимаются разработкой наноспутников (НС). Такие спутники приобрели популярность благодаря тому, что их создание не требует значительных финансовых затрат, однако позволяет испытать в условиях космического пространства перспективные миниатюрные датчики и элементы бортовых систем, оригинальные технические решения прежде, чем применять в дорогостоящих проектах космические аппараты (КА). В то же время развитие наноспутников, которые первоначально исполняли роль спутников на средствах доставки основного КА, поставило перед разработчиками множество задач. Одной из главных задач такого рода является эффективный вывод нано- или микроспутника на заданную траекторию, с определенными параметрами запуска. Первоначально эти задачи решались с помощью простейших пружинных устройств, электромагнитных толкателей [1] и т.д. По мере увеличения объема исследований, проводимых с помощью малых спутников, стали возникать задачи точного вывода на заданную орбиту с определенной начальной скоростью, сохранения ориентации микроспутника при его движении по траектории и т.д. Все это потребовало разработки новых, высокоэффективных устройств выведения нано- и микроспутников на заданные траектории.

Система запуска, например НС со средствами доставки, должна удовлетворять следующим основным требованиям:

- отделение аппарата с заданной скоростью в пределах 0,5—5 м/с,
- запуск аппарата в заданном зенитном и азимутальном направлении относительно ориентации и положения средства доставки или планеты,
- система запуска должна обеспечивать многократные запуски группировок спутников с заданной точностью,
- устройства такого рода должны иметь минимальные массогабаритные характеристики, поскольку по отношению к основным задачам средства доставки они, по сути, являются балластными (особенно это важно при межпланетных исследованиях).

Анализ систем отделения НС на траектории с заданными параметрами выведения [2] показывает, что удовлетворяют всем перечисленным требованиям магнитоиндукционные системы [3] с сильноточным разрядным контуром.

Автором разработана малогабаритная магнитоиндукционная система запуска для прецизионного вывода на орбиту серий микро- и наноспутников [4, 5], в которой управление параметрами выведения осуществляется с помощью микроконтроллера. На рис. 1 приведен эскиз данной системы запуска НС. Разработанное устройство состоит из трех основных узлов:

- сильноточного магнитоиндукционного эжектора, сообщаемого заданный импульс отделяемому аппарату,
- электромеханической системы, позволяющей ориентировать НС в заданном направлении [4] по отношению, например, к системе координат, связанной с Землей,
- микропроцессорного блока управления, который управляет разрядным током в магнитоиндукционном эжекторе и шаговыми двигателями в механизмах зенитной и азимутальной ориентации.

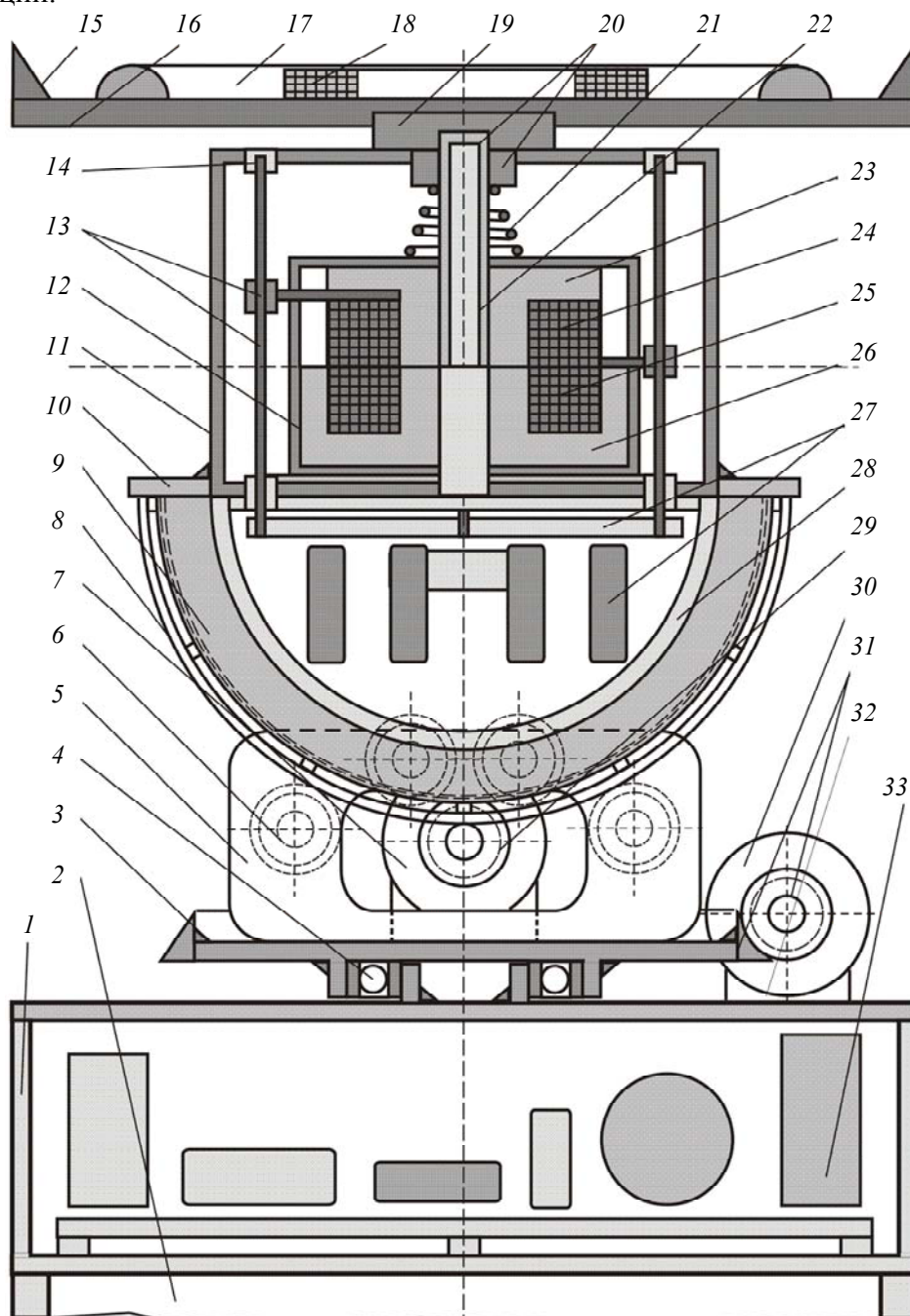


Рис. 1

Предлагаемая малогобаритная микропроцессорная система запуска НС состоит из корпуса основания 1, установленного на теплоизолированном отсеке для батареи электролитических конденсаторов 2. На крышке корпуса размещены поворотная плита 3 механизма азимутальной ориентации, жестко посаженная на подшипник 4. Поворотная плита имеет форму диска, на который напрессована ведомая шестерня механизма азимутального привода 31. На этой плите симметрично относительно главной оси установлен механизм зенитного привода. Он состоит из корпуса 5, системы подшипников 6, малогобаритного шагового двигателя 7, полукольцевой направляющей 8, ведомой полушестерни 9. Направляющая и полушестерня жестко закреплены на полусферическом корпусе 28, в котором размещены электронные ключи магнитоиндукционного эжектора. Ограничители 10, снабженные концевыми выключателями (на рисунке не показаны), служат для ограничения зенитного угла поворота в крайних положениях. Механизм зенитной ориентации приводится в движение с помощью ведущей шестерни 29, жестко посаженной на вал двигателя 7.

Магнитоиндукционный эжектор размещен в двух цилиндрических корпусах: во внешнем 11, в котором расположены токосъемные механизмы 13 скользящего типа, и во внутреннем 12. Направляющие токосъемных механизмов установлены в изоляторах 14 проходного и заглушенного типа. Магнитоиндукционный эжектор выполнен в виде двух сильноточных соленоидальных катушек 24, 25, жестко закрепленных в чашках ферритовых броневых сердечников 23, 26. Нижняя чашка 26 с катушкой 25 неподвижна относительно основания корпуса 11. Верхняя половинка сердечника 23 с неподвижно закрепленной катушкой 24 может перемещаться вдоль направляющей (штока) 22, которая запрессована в основание корпуса. В исходном положении чашки сердечника должны находиться в положении соприкосновения так, как это показано на рис. 1. Это условие обеспечивает пружина 21, которая при движении верхней половинки эжектора играет роль демпфера. Соосное движение подвижной части магнитоиндукционного эжектора обеспечивается неподвижной направляющей и подвижной (скользящей) направляющей трубчатого типа 20. Верхний конец направляющей 20 жестко связан с посадочным узлом 19, на который монтируется платформа запуска 16. На этой платформе расположены направляющие 15 для правильной установки НС роботом-манипулятором, демпфирующее кольцо 17, электромагнит фиксации НС на платформе (помимо того, на рисунке представлены: 18 — электромагнит фиксации НС, 27 — плата электронных ключей, 30 — шаговый двигатель, 32 — узел крепления шагового двигателя, 33 — плата микропроцессорного модуля управления).

Принцип работы магнитоиндукционного эжектора заключается в следующем. Через каждую катушку 24, 25 с помощью электронных ключей синхронно разряжаются предварительно заряженные до определенной величины электролитические конденсаторы (0,01 Ф, 100 В). Поскольку катушки имеют малую индуктивность (число витков 48/96) и малое активное сопротивление, то наблюдается аperiодический разряд малой длительности. Электронные ключи при этом пропускают только первую четверть периода длительностью порядка микросекунд. Таким образом, если выбрать направления разрядных токов в катушках сильноточных соленоидов противоположными друг другу, то созданные магнитные поля сообщат подвижному соленоиду соответствующий импульс, который и будет передан платформе запуска с установленным на ней НС.

Действительно, схемы разрядных контуров можно представить в виде последовательно соединенных RLC -контуров. Отметим, что в общем случае параметры $L(i)$, $R(i)$ являются переменными величинами, зависящими от разрядного тока $i(t)$, причем эти зависимости могут быть нелинейными. Нелинейность определяется электромагнитными процессами в разрядных устройствах и нагрузке.

При постоянных значениях параметров L, R можно записать дифференциальное уравнение в виде [6]:

$$U_C = \frac{dq}{dt} R + L \frac{d^2 q}{dt^2} + \left(\frac{1}{C} \right) \int \left(\frac{dq}{dt} \right)_C dt, \quad (1)$$

здесь ток в контуре разряда определяется как $i = \left(\frac{dq}{dt} \right)_C$.

Если начальные условия могут быть заданы в виде:

$$\left(\frac{dq}{dt} \right)_C = i(0) = 0,$$

$$U_C(0) = U_0,$$

$$R < 2\sqrt{\frac{L}{C}},$$

то общее решение уравнения (1) имеет вид:

$$i_C = \left(\frac{dq}{dt} \right)_C = \frac{U_0}{L} t e^{-\left(\frac{R}{2L} \right) t}. \quad (2)$$

При возбуждении в контуре квазипериодического процесса (что возможно лишь при определенных соотношениях между параметрами R, L, C) решение уравнения (1) принимает вид:

$$i_C(t) = \left(\frac{dq}{dt} \right)_C = \frac{U_0}{\omega_0 L} e^{-\left(\frac{R}{2L} \right) t} \sin(\omega_0 t + \pi). \quad (3)$$

В выражении (3) собственная частота может быть определена как:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}.$$

Коэффициент полезного действия разрядного контура определяется выражением вида:

$$\eta_C = \frac{R \int_0^{t_C} i_C^2(t) dt}{\frac{1}{2} C U_0^2}, \quad (4)$$

здесь $R \int_0^{t_C} i_C^2(t) dt$ — энергия, выделяемая в нагрузке за время разряда $(t_C - 0)$, $\frac{1}{2} C U_0^2$ — энергия, запасенная в конденсаторе, на момент времени $(t = 0)$.

Важно отметить, что выражение (4) позволяет оценить КПД только электрической схемы без учета потерь, связанных с нагревом активных элементов, эффектов взаимной индукции, потерь, определяемых нелинейными явлениями в сильноточном контуре и т.д. КПД магнитоиндукционного эжектора как электромеханической системы необходимо определять через отношение кинетической энергии наноспутника в момент отрыва от платформы к энергии импульса электромагнитного поля эжектора:

$$\eta_{em} \approx \frac{\frac{m}{2} v^2 |_{\sim t_1}}{R \int_0^{t_1} i^2(t) dt}, \tag{5}$$

здесь $\frac{m}{2} v^2 |_{\sim t_1}$ — кинетическая энергия, сообщаемая отделяемому аппарату в момент отрыва его от платформы запуска. Элементарный подсчет показывает, что в лучшем случае, пренебрегая потерями в RLC -контуре, можно получить $\eta_{em} \sim 0,02\%$, а это для задачи отделения наноспутника с заданной скоростью в заданном направлении является ничтожной и неприемлемой величиной.

Полученный результат объясняется достаточно просто. Рассмотрим катушку соленоидального типа вне бронированного сердечника с известным числом витков N , которые уложены в несколько слоев, в каждом слое n витков. Такая катушка-индуктор создает поле, напряженность которого можно оценить с помощью полуэмпирической формулы [7]:

$$H_x(t) = Ni(t) \frac{0,2\pi}{l} \left(\frac{v_1}{\sqrt{r^2 + v_1^2}} + \frac{v_2}{\sqrt{r^2 + v_2^2}} \right); \tag{6}$$

где l — длина провода соленоида,

$$\left. \begin{aligned} v_1 = x + l/2, \quad v_2 = x - l/2, \quad x > l/2; \\ v_1 = x - l/2, \quad v_2 = x + l/2, \quad x < l/2; \\ v_1 = l/2 - x, \quad v_2 = x + l/2, \quad -l/2 < x < l/2. \end{aligned} \right\}$$

„Свободный“ индуктор представляет собой цилиндрическую катушку, как правило, многослойную, длина которого существенно меньше диаметра. Поле симметрично оси, неравномерно и неоднородно. Вектор магнитной индукции имеет аксиальную B_x и радиальную B_r составляющие. Значение максимальной индукции B_{x0} в заданный момент времени на оси в центре катушки со средним радиусом r находится из эмпирического выражения:

$$H(r) \approx \frac{Ni(t)r^2}{\sqrt{2}(r^2 + x^2)^{3/2}}. \tag{7}$$

Основной интерес для нас представляет внутренняя полость рассматриваемого „свободного“ соленоида, ввиду того что вне его поле быстро затухает. Если через индуктор разрядить конденсатор так, чтобы ток в цепи определялся только первой четвертью периода, и при этом длительность разряда составляла несколько микросекунд, то такой индуктор сформирует переменное (импульсное) электромагнитное поле. Индукция магнитной составляющей этого поля будет быстро уменьшаться с расстоянием, поэтому магнитоиндукционные системы запуска, описанные в [1], малоэффективны.

Для того чтобы действительно повысить эффективность системы эжекции, необходимо разместить RLC -контур в полном (замкнутом) сердечнике бронированного типа (см. рис. 1). В этом случае практически вся энергия магнитного поля, связанная с магнитной компонентой, окажется замкнутой в магнитопроводе. Такое свойство используется при конструировании эффективных высокочастотных трансформаторов. Заметим, что вне объема такой системы магнитное поле практически отсутствует. Это весьма полезно, поскольку снимается вопрос о воздействии мощного электромеханического импульса на электронную аппаратуру спутника.

Рассчитаем электромеханическую систему магнитоиндукционной эжекции исходя из того, что величину силы, определяющей изменение импульса отделяемого объекта, можно найти из условия баланса — изменение энергии системы равно работе сил поля:

$$dW_{\Sigma} = Fdz = dW_C - dW_H, \quad (8)$$

здесь dW_{Σ} — изменение энергии системы, dz — приращение расстояния между составляющими эжектора, dW_C — изменение энергии конденсатора, dW_H — изменение энергии магнитного поля катушек. Изменениями энергии тепловых потерь в этом случае можно пренебречь. Энергия магнитного поля двух индуктивно связанных катушек:

$$W_H = \frac{L_1 i_1^2}{2} + \frac{L_2 i_2^2}{2} - \frac{M i_1 i_2}{2} - \frac{M i_2 i_1}{2}. \quad (9)$$

Значения индуктивности L_1 и L_2 не зависят от расстояния z между катушками, которое влияет лишь на величину взаимной индукции M . Следовательно, изменение энергии магнитного поля катушек при изменении расстояния между ними на величину dz можно оценить из соотношения:

$$dW_H = i^2 dM. \quad (10)$$

При этом конденсатор для каждой разрядной цепи должен выработать дополнительную энергию dW_C , чтобы создать дополнительное напряжение для компенсации ЭДС, возникающих в контурах при перемещении. Это дополнительное напряжение dU равно сумме производных по времени потокосцеплений взаимоиндукции обеих катушек:

$$dU = 2d(Mi)/dt = 2idM/dt, \quad i = \text{const},$$

$$dU = 2 \left(i(t) \frac{dM}{dt} + M(t) \frac{di}{dt} \right).$$

Уравнение энергетического баланса можно записать в виде:

$$Fdz = dW_C - dW_H \approx 2i^2 dM - i^2 dM \approx i^2 dM. \quad (11)$$

Таким образом, сила, действующая на отделяемый аппарат, в заданный момент времени может быть оценена из простого соотношения:

$$F(t) = i^2 dM/dz. \quad (12)$$

Для расчета „электромагнитной силы“ необходимо знать зависимость взаимной индуктивности катушек M от расстояния z между ними. Если принять, что катушки индукторов имеют одинаковое число витков N , то $M(z)$ можно оценить с помощью эмпирически получаемого соотношения:

$$M = \mu\mu_0 N^2 r_{\text{eff}} f(k), \quad (13)$$

здесь r_{eff} — эффективный радиус катушки эжектора $r_{\text{eff}} \approx r_1 + \frac{1}{2}(r_2 - r_1)$, методика определения вида $f(k)$ подробно изложена в [4].

Электромеханическая часть магнитоиндукционной системы запуска работает следующим образом. Робот-манипулятор устанавливает данный НС на платформу запуска 1б, после чего срабатывают установленные на ней концевые выключатели (на рис. 1 не показаны). По команде микропроцессорного блока управления включается электромагнит фиксации НС 1в, который жестко фиксирует НС на платформе (для этого на основании НС должна быть наклеена ферромагнитная накладка). Далее выполняется ориентация главной оси НС в зенитном и азимутальном направлениях с помощью соответствующих электромеханических систем. После этого микропроцессорная система управления включает катушки сильноточных

соленоидов последовательно, подавая на них импульсы токов одинакового направления в течение 0,01 мкс, а затем производится синхронный разряд конденсаторов. В результате взаимодействия импульсных магнитных полей подвижный элемент эжектора приобретает импульс силы, определяемой как:

$$F(t)|_0^{t_1} \approx \left[\int_0^{t_1} i(t) dt \right] B(r)l,$$

который с учетом механических потерь в системе передается отделяемому НС. Здесь $i(t)$ — результирующий ток через соленоид, напомним: $i(t) = i_C(t) - i_i(t)$, где $i_i(t)$ — индукционный ток в контуре, возникающий при движении соленоида, $B(r)$ — индукция магнитного поля создаваемого неподвижным соленоидом, l — длина провода соленоида, находящегося в рабочем зазоре, $l \approx \pi n d_2$, n — число витков, находящихся в рабочем зазоре, d_2 — внешний диаметр катушки подвижного соленоида, $\Delta t = t_1 - 0$ — задаваемая микропроцессором длительность разряда.

Структурная схема системы управления магнитоиндукционным эжектором и электро-механической системой ориентации НС приведена на рис. 2.

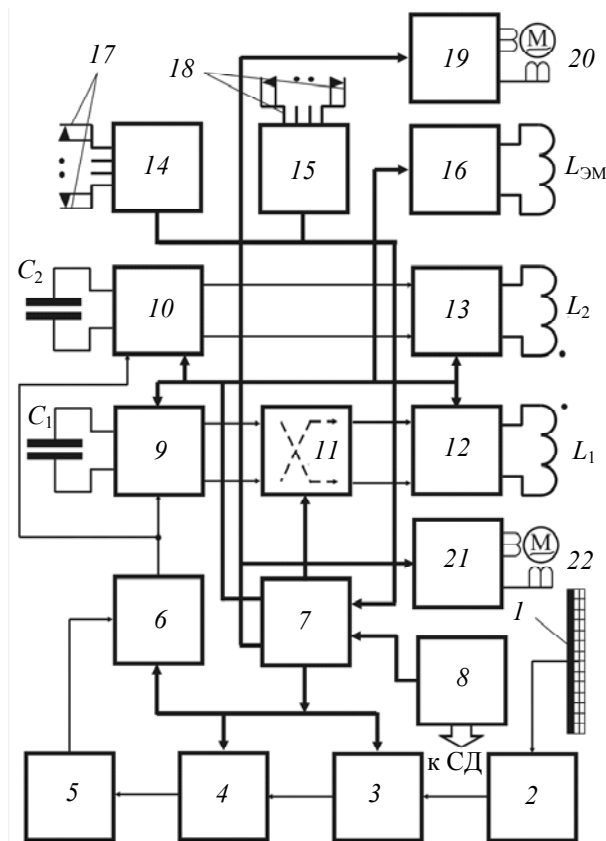


Рис. 2

Для автономной работы эта система отделения снабжена солнечной панелью 1, которая через коммутатор 2 подключена к аккумуляторному блоку 3. Для формирования напряжений питания электронных модулей, напряжений заряда конденсаторов и т.д. служит преобразователь напряжения 4, соединенный с соответствующими стабилизаторами 5. Блок управления зарядом конденсаторов 6 формирует зарядные токи в течение определенных интервалов времени, которые задаются микропроцессором 7. Ключевые устройства 9, 10 подключают конденсаторы C_1, C_2 к блоку управления зарядом в течение интервала времени их зарядки. Разряд конденсаторов C_1, C_2 осуществляется через силовые ключи 12, 13, которые открываются на интервалы времени, задаваемые микропроцессором. Для повышения эффективности

преобразования энергии импульсного магнитного поля, формируемого сильноточными соленоидными L_1, L_2 , как уже было отмечено выше, их обмотки в первоначальный момент времени должны быть включены последовательно, а затем встречно. Эту роль выполняет электронный переключатель выводов неподвижного соленоида 11. Концевые выключатели 17, 18, подключенные к формирователям импульсов 14, 15, сообщают микропроцессору, что отделяемый аппарат правильно установлен и зафиксирован на платформе запуска, и определяют крайние положения механизмов поворота в зенитном и азимутальном направлениях. Управление механизмами поворота для выбора заданного направления отделения НС осуществляется по командам микропроцессора, через соответствующие драйверы 19, 21 и шаговые двигатели 20, 22. Фиксация отделяемого НС на платформе запуска осуществляется с помощью электромагнита $L_{ЭМ}$, подключенного к формирователю тока 16, который управляется микропроцессором 7.

На рис. 3 приведен вариант принципиальной схемы макета модуля управления процессами заряда конденсаторов C_1, C_2 и их разряда через соленоиды L_1, L_2 .

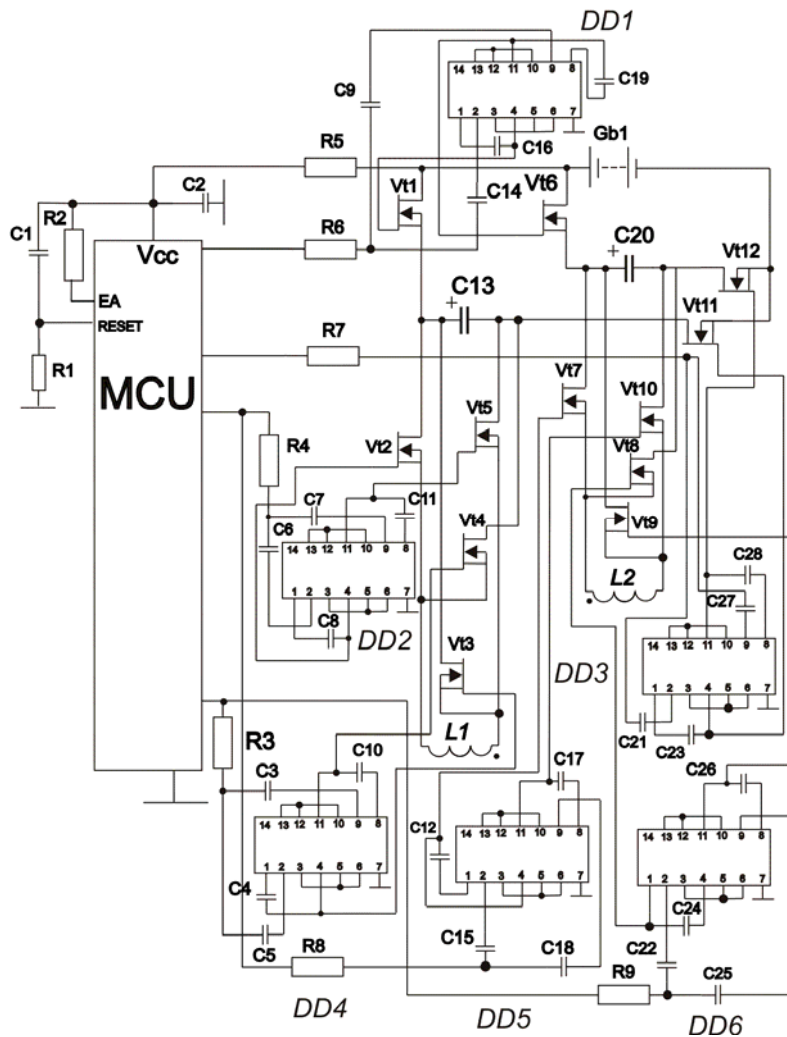


Рис. 3

Отметим, что в таком варианте схемы управления применены только полевые транзисторы типа Power MOS IV™. Это позволяет упростить конструкцию, повысить ее надежность и точность дозирования величины заряда и соответствующих разрядных токов, но несколько повышает ее стоимость по сравнению с тиристорным вариантом [8]. Выбор данного типа транзисторов для коммутации обусловлен тем, что они обеспечивают высокую скорость переключения — 11 нс, малое сопротивление канала в открытом состоянии — 0,06 Ом, высо-

кую выходную мощность — 250—500 ВА. Транзисторы обладают малой входной емкостью 40—500 пкФ, значительной устойчивостью к большим значениям dU/dt . Это позволяет им обеспечивать надежную работу систем при коммутации индуктивной нагрузки. Транзисторный ключ управляется — открывается на заданный интервал времени с помощью стандартного драйвера верхнего или нижнего плеча типа IR2117 (на приведенной схеме они не показаны). С помощью микросхем полевой серии DD1—DD6, на которых собраны одновибраторы, формируются нормализованные импульсы для открывания транзисторов ($Vt1, \dots, Vt10$) через соответствующие драйверы.

В заключение отметим, что описанная система отделения НС имеет размер порядка 1 дм^3 , массу $\approx 1,4 \text{ кг}$, энергии, запасаемой в конденсаторах и преобразованной в индукторах различных типов, хватает для сообщения спутнику скорости $1\text{—}3 \text{ м/с}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент РФ 2472679 С1. Способ запуска наноспутников в качестве попутной полезной нагрузки и устройство для его осуществления / В. А. Глуценков, Р. Ю. Юсупов, И. В. Белоконов, З. И. Гимранов. Приоритет от 05.05.2011.
2. Овчинников М. Ю., Шаргородский В. Д., Пеньков В. И., Мирер С. А., Герман А. Д., Немучинский Р. Б. Наноспутник REFLEC-TOR. Выбор параметров системы ориентации // Космические исследования. 2007. Т. 45, № 1. С. 67—84.
3. Патент РФ 2551408 С1. Устройство управляемого запуска наноспутников и микроспутников / О. В. Филонин, И. В. Белоконов, Ю. Б. Талызин. Приоритет от 24.06.2014.
4. Селиванов А. С., Урличич Ю. М., Попов Г. А., Лукьященко В. И. О создании экспериментального малого космического аппарата для отработки микротехнологий // Тр. семинара „Проблемы развития и использования микротехнологий в авиации и космонавтике“. СПб, 2002.
5. Биндель Д., Овчинников М. Ю., Тайль Ш., Хромов О. Е., Селиванов А. С. Наноспутник GREASAT. Общее описание. Препринт ИПМ РАН им. М.В. Келдыша. М., 2009. № 21. С. 34.
6. Кучинский Г. С., Шкурюпат П. И., Шнеерсон Г. А. Генераторы больших импульсных токов // Физика и техника мощных импульсных систем: Сб. статей / Под ред. Е. П. Велихова. М.: Энергоатомиздат, 1987. С. 127—164.
7. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей. Л., 1986. 456 с.
8. Филонин О. В. Магнитоиндукционные эжекторы для запуска микро- и наноспутников // 5th Intern. Sci. Conf. ORT Publishing “European Applied Sciences”. Stuttgart, Germany, 2013. P. 88—90.

Сведения об авторе

Олег Васильевич Филонин

— д-р техн. наук, профессор; СГАУ, межвузовская кафедра космических исследований; E-mail: phylonin@gmail.com

Рекомендована межвузовской
кафедрой космических исследований

Поступила в редакцию
14.11.2015 г.

Ссылка для цитирования: Филонин О. В. Малогабаритная автоматическая система для управляемого запуска наноспутников // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 6. С. 489—498.

**COMPACT AUTOMATIC SYSTEM FOR
MANAGED LAUNCH OF NANOSATELLITES****O. V. Filonin***Samara State Aerospace University, 448086, Samara, Russia,
E-mail: phylonin@gmail.com*

A compact microprocessor launching system for nanosatellites with defined separation parameters (initial velocity, zenithal and azimuthal angles) on a given trajectory is presented. The system includes magnetic induction ejector, the mechanisms for orientation of the discharge apparatus in the zenithal and azimuthal directions, and a microprocessor control module. The separation system may be mounted on any delivery vehicle or on the Russian segment of the ISS.

Keywords: nanosatellite, system of separated apparatus insertion, launching system, microprocessor control module

Data on author**Oleg V. Filonin**— Dr. Sci., Professor; SSAU, Department of Space Exploration;
E-mail: phylonin@gmail.com

For citation: *Filonin O. V. Compact automatic system for managed launch of nanosatellites // Izv. vuzov. Priborostroenie. 2016. Vol. 59, N 6. P. 489—498 (in Russian).*

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-6-489-498