

ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ, РАЗВЯЗКИ И ЭКРАНИРОВКИ АНАЛОГОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КЛЮЧЕЙ

В. И. Гаврилко, В. И. Калашников

Харьков

В настоящее время для коммутации аналоговых величин в АВМ получают широкое распространение ключевые схемы на полупроводниковых приборах, обладающие общезвестными преимуществами перед ламповыми: небольшие габариты и вес, малое потребление мощности, малое сопротивление в прямом направлении.

В литературе описан ряд схем полупроводниковых ключей, однако большинство работ посвящено лишь описанию принципиальных схем, их характеристик и переходных процессов, связанных с инерционностью полупроводников. Вопросы экранировки схем, как правило, не рассматриваются. Частичная экранировка, касающаяся только обмоток управляющего трансформатора, описывается для модуляторных ключей [1, 2]. Однако, как показали эксперименты, при использовании ключей для подключения токов, особенно на короткое время, такую экранировку нельзя считать удовлетворительной.

Коммутация тока получается включением ключевого элемента последовательно с нагрузкой. В качестве ключей можно использовать любую из известных схем [1, 3, 4, 5].

Ключ на транзисторах, имея достаточно высокое обратное сопротивление, как правило, неприменим для коммутации высоких напряжений, используемых в АВМ, ввиду малого допустимого обратного напряжения для транзисторов. Кроме этого, быстродействие такого ключа ограничивается временем выхода триодов из насыщения, особенно для малых токов.

Большее быстродействие при существенно больших коммутируемых напряжениях можно получить, используя диодно-мостиковые ключевые схемы (рис. 1, б; 1, в).

Схема рис. 1, в, обладая большой простотой, в то же время имеет низкий динамический диапазон изменения амплитуд, что исключает возможность применения ее для АВМ. Схема рис. 1, б, исключая перечисленные недостатки, является громоздкой и недостаточно быстродействующей. Громоздкость связана с необходимостью построения схемы, формирующей высоковольтные коммутирующие импульсы, питаемой от независимого источника, гальванически не связанного с общей точкой сигнала. Недостаточное быстродействие объясняется трудностью получения высоковольтных импульсов с крутыми фронтами. Если же обеспечиваются крутые фронты, имеем большой уровень помех из-за емкостей переходов и инерционности полупроводников. Отсюда естественно стремление перейти к идеальному токовому переключателю. Последний реализуется включением большого сопротивления последовательно с коммутируемым источником напряжения. Чтобы предотвратить появление высокого напряжения на ключе после его размыкания, перед ключом должен быть поставлен ограни-

читель напряжения или синхронно замыкающийся на «землю» в этот момент аналогичный ключ.

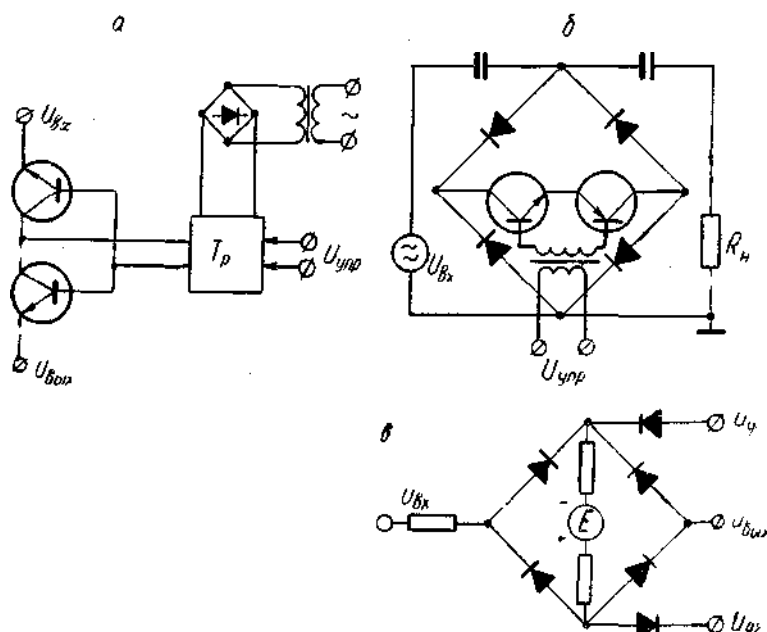


Рис. 1.

В этом случае для построения быстродействующего ключа следует отдавать предпочтение ключу диодно-мостикового типа, в котором имеется схема, вырабатывающая коммутующее напряжение незначительной амплитуды, питающейся от независимого источника.

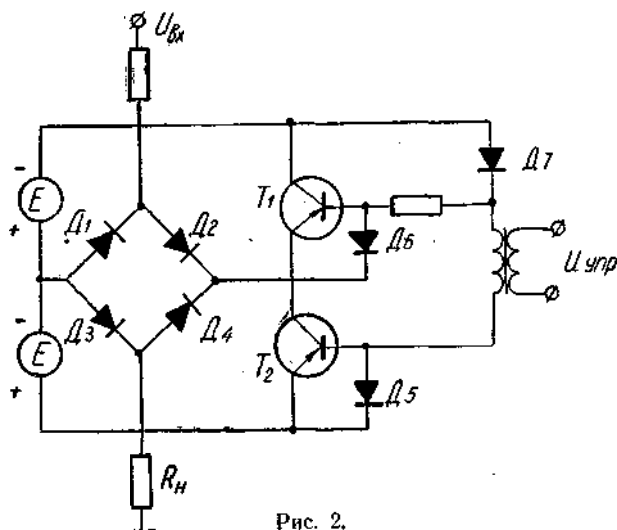


Рис. 2.

Используя такой путь, в Харьковском политехническом институте им. В. И. Ленина разработан ключевой элемент, предназначенный для подключения на короткое время напряжений в диапазоне ± 10 мв — 100 в ко входу усилителя. Схема ключа приведена на рис. 2.

Ключ состоит из диодного мостика, напряжение на диагонали которого коммутируется с помощью триодов T_1 и T_2 , питающихся от независимого источника E со средней точкой. В исходный момент триод T_1 закрыт, а T_2 — полностью открыт за счет обратных токов триода T_1 и диода D_7 . С приходом управляющего импульса триод T_1 открывается, а T_2 — закрывается, в результате чего управляющая диагональ смещается в прямом направлении. Мост при этом открывается и входное напряжение проходит в нагрузку R_n . Диод D_7 предотвращает насыщение транзистора T_1 и стабилизирует амплитуду тока через диодный мост, сохраняя положение рабочих точек диодов неизменным в течение действия коммутирующего импульса. Это обеспечивает постоянство прямого сопротивления ключа. Схема ключа требует ограничения напряжений на ключе на уровнях не выше $\pm 2,5$ в после выключения ключа ввиду выбора независимого источника питания ± 3 в. При работе на суммирующую точку усилителя этого вполне достаточно для надежного переключения.

Работа с данным ключом показала, что помимо всплесков, вызванных конечным временем включения и выключения диодов, на входную цепь ключа оказывают влияние коммутирующие импульсы. Это проявлялось в том, что на основной коммутируемый ток накладывался ток от коммутирующего импульса, изменяющийся в течение интервала прямой проводимости ключа (интервала включения). Приведенные выше схемы ключей также обладают указанным недостатком, хотя ни один из авторов не указывает на это, так как время переходных процессов в схемах настолько велико, что указанные импульсы теряются на их фоне. Для ключа с временем переходных процессов порядка $0,5$ мксек и переключением тока на время не более 10 мксек эта помеха оказывается существенной и уменьшает динамический диапазон изменения коммутируемых токов. При разработке таких быстродействующих ключей возникла необходимость сократить время включения диодного моста. Кроме применения диодов с малым временем жизни основных носителей τ_p , можно предложить открывать диодный мост не импульсом напряжения, а импульсом тока. Это позволяет, согласно работам [6, 7], включить диод с установлением тока до $0,01$ % за время порядка $6-8\tau_p$. Для обеспечения малого времени выключения диодный мост должен переключаться на источник напряжения, что и реализовано в приведенной схеме. В этом случае время выключения также не превышает $6-8\tau_p$.

При таких характеристиках стала очевидной необходимость исследования причин и путей появления коммутирующих импульсов на выходе ключа. Для этого каждый из элементов схемы был рассмотрен с точки зрения электростатической, электромагнитной и гальванической взаимосвязи с выходной диагональю моста. Главное внимание было уделено электростатической и электромагнитной развязке источника независимого питания и аналогичной развязке управляющего трансформатора. С этой целью была применена несколько усовершенствованная конструкция трансформатора, описанного в работе [8]. Существенным в трансформаторе является расположение первичной и вторичной обмоток на различных сердечниках, охваченных общим короткозамкнутым витком, выполненным в виде полого тора. Каждый сердечник вместе с намотанной на него обмоткой, в свою очередь, помещен в свой экран торoidalной формы с разрезом для предотвращения короткозамкнутого витка. Такая конструкция позволяет достаточно эффективно подавить электростатическую связь между обмотками, однако электромагнитная связь из-за емкостей между экранами сохраняется. Последняя может быть устранена специальной геометрией расположения щели и выводов обмоток. Этот момент весьма важен при трансформировании высоких частот, которые желательно при-

менять для резкого уменьшения размеров независимого источника питания с требуемой глубиной электростатической и электромагнитной развязок. При этом, правда, появляются паразитные емкости экранов на «землю».

Согласно работе [2], обмотка, помещенная в экран, соединяется с ним одним концом, а, следовательно, через паразитную емкость — с «землей». Если теперь ввести эти емкости в схему ключа и рассмотреть их влияние на коммутируемый ток, то, очевидно, мы сможем проследить

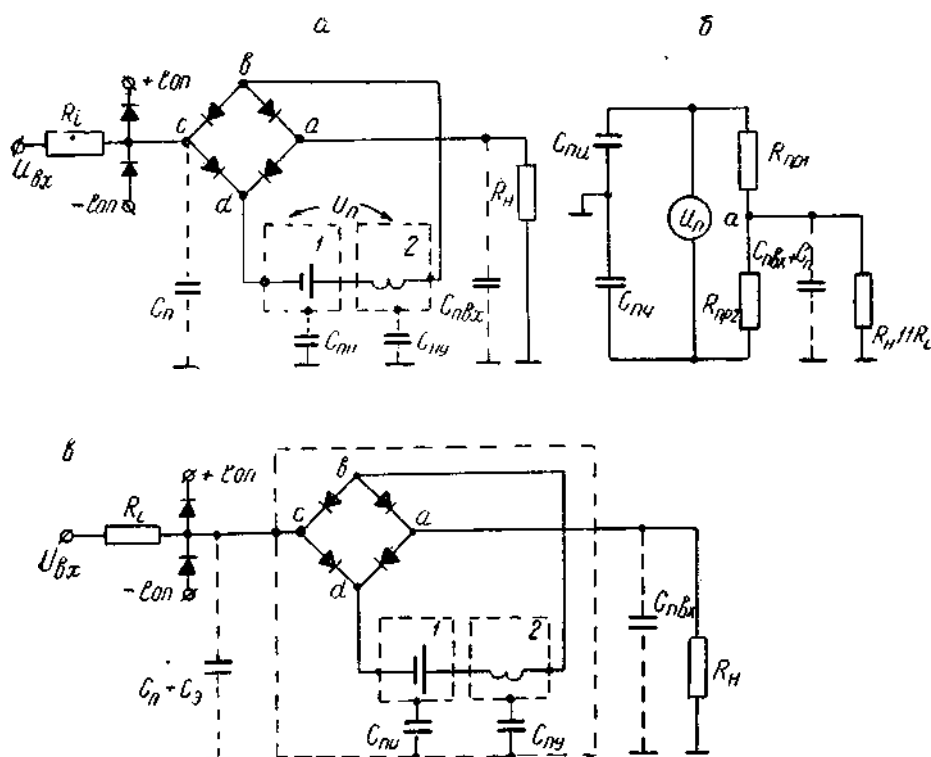


Рис. 3.

пути воздействия управляющего импульса на выход. На рис. 3, а приведена эквивалентная схема диодно-мостикового ключа с учетом всех явных паразитных емкостей и упрощенным представлением источника смещения и управления, не меняющим существа дела. Пунктиром показаны экраны, заключающие в себе соответствующие схемы. По условиям минимизации помех, эти экраны должны быть подключены к одному из полюсов каждой схемы. В результате в точках a и d оказываются подключенными паразитные емкости экранов на «землю». Соединение экранов с другими полюсами этих двух схем может ухудшить положение тем, что обе емкости C_{n1} и C_{n2} будут подключены к одной точке диагонали. При появлении открывающего диоды напряжения U_n можно считать диоды низкоомными сопротивлениями. В этом случае связь напряжения U_n , емкостей C_{n1} и C_{n2} с входным и выходным сопротивлением R_i и R_n может быть представлена эквивалентной схемой (рис. 3, б). Из этой схемы легко получить выражения, определяющие наложение сигнала помехи U_n

на сопротивление нагрузки. Несложные расчеты дают для $\Delta U_{\text{вых},п}$ следующее:

$$\Delta U_{\text{вых},п} = \frac{U_n}{2} \cdot \frac{C_{пу} - C_{пи}}{C_{пу} + C_{пи}},$$

где U_n — по величине равно падению на двух диодах (для кремниевых диодов $U_n = 1,6$ в).

Если $R_n = R = 100$ ком, емкости экранов $C_{пи}$ и $C_{пу}$ равны в среднем по 1000 пф, а разность их составляет 5 %, то $\Delta U_{\text{вых},п} = 20$ мв, что для суммирующей точки усилителя весьма нежелательно. Постоянная времени этой помехи после включения определяется суммарным значением всех емкостей, показанных на схеме рис. 3 а, и параллельно включенными сопротивлениями R_i и R_n . Оценка этой величины дает при вышеприведенных значениях R_i , R_n , $C_{пи}$, $C_{пу}$ 100 мксек.

Всплески и время их действия можно снизить, подогнав равенство $C_{пу}$ и $C_{пи}$ и уменьшив их общие величины. Однако в конструкциях эти емкости, как правило, получаются существенно различными хотя бы по той причине, что источник питания более громоздок, чем схема управления. Более того, часто указать границы схемы управления, а тем более охватить ее общим экраном не представляется возможным. К тому же эти емкости могут оказаться изменяемыми с переключением моста. Это заставляет искать пути устранения вообще емкостей точек *b* и *d* на «землю». Наиболее действенный путь — введение общего экрана, охватывающего две экранированные схемы (источник питания и схему управления) и диодно-мостиковый ключ, причем, этот экран должен быть подсоединен к точке *c*. В таком варианте емкости $C_{пи}$ и $C_{пу}$ оказываются подключенными параллельно плечам моста (соответственно плечу *bc* и *cd*). При этом общая емкость экрана на «землю» оказывается теперь подключенной к источнику коммутируемого тока. Выбором размеров экрана и его конструкции можно сделать эту емкость сравнимой с емкостью $C_{пи}$ и $C_{пу}$ или меньшей.

Теперь возникает вопрос о влиянии этих емкостей на работу ключа. Открытие ключа превращает диоды в малые активные сопротивления, которые шунтируют емкости $C_{пи}$ и $C_{пу}$. Таким образом, время установления напряжений на диодах фактически не увеличивается ввиду малого сопротивления и большого прямого тока, а помеха от управляющего напряжения полностью устраняется или, по крайней мере, заканчивается в пределах переходных процессов, связанных с инерционностью самих диодов. Существенное неравенство емкостей $C_{пи}$, $C_{пу}$ в данном случае можно убрать дополнительной емкостью, включенной в соответствующее плечо, причем такая подгонка не влияет на общую емкость ключа на «землю», что весьма важно для сохранения большой скорости установления коммутируемых токов. Общий экран можно было бы соединить и с точкой *a*, но тогда емкость экрана на «землю» включалась бы на выходе ключа, что нежелательно при большом числе аналогичных ключей, работающих на одну нагрузку, из-за общего снижения времени нарастания коммутируемого тока. Следует учитывать также, что решающие усилители рассчитываются на емкость в суммирующей точке не более 1000 пф.

Наличие емкостей, включенных параллельно плечам моста, улучшает поведение последнего также при выключении. В этот момент основную роль играют заряды переключения диодов и время жизни основных носителей. Данным вопросам посвящено достаточно много работ [6, 7] и в нашей статье они будут рассматриваться лишь в разрезе времени выключения диодного ключа. Важным обстоятельством здесь является сохранение низкого прямого сопротивления диода для обратного тока до тех пор, пока в области базы диода существуют носители заряда, что позволяет, используя источник напряжения, подключаемый с достаточно крутыми фронтами,

обеспечить очень большой ток в обратном направлении. При этом в рассматриваемой мостовой схеме возникает ситуация, когда один из диодов двух последовательно включенных плеч исчерпывает свои зарядные резервы раньше, чем другой. Тогда избыток заряда незакрывшегося диода служит источником переключательных помех на выходе ключа.

Включение емкости параллельно диоду как бы увеличивает фиктивную зарядную емкость диода с сохранением заряда прежней величины. Если внешняя емкость больше зарядной емкости, то для двух диодов с аналогичным шунтированием времени выключения сближаются. Зарядная емкость от диода к диоду может меняться на 50—100%, а в случае шунтирования различие может быть во много раз меньше. Следовательно, уменьшится и разброс времени выключения диодов. Однако такое шунтирование нельзя применять для выходных плеч ab и ad одновременно с другими плечами ввиду существенного увеличения проходной емкости ключа. Поэтому неравенство зарядов переключения диодов плеч ab и ad полностью порождает всплеск на нагрузке. Для этих целей желательно подбирать диоды этих плеч по времени восстановления обратного сопротивления и величине проходной емкости.

Общая проходная емкость ключа определяется суммой емкостей двух закрытых диодов. Нескомпенсированный заряд переключения после выключения всех диодов сохраняется на проходной емкости $C_{пр}$, стекая на «землю» через сопротивление нагрузки. Максимальную величину заряда можно рассчитать, исходя из максимального прямого напряжения, приложенного к диоду, при котором прямое сопротивление уже велико (для кремниевых диодов это напряжение составляет 0,3—0,4 в). Расчет времени рассасывания заряда при этом будет определяться из дифференциального уравнения первого порядка, записанного для параллельного соединения $C_{пр}$, $C_{п. вх}$, R_n , из которого легко получить постоянную времени установления напряжения на выходе после выключения ключа:

$$t_{уст} = R_n(C_{п. вх} + C_{пр}).$$

Отсюда видны пути уменьшения времени установления — это работа на низкоомный вход с малой входной емкостью.

Все изложенные положения были учтены при разработке диодно-мостикового ключа применительно к многоканальному аналого-цифровому преобразователю. Это потребовало в трансформаторы питания и передачи управляющего импульса внести еще один электростатический экран, охватывающий каждую обмотку, и соединить данный экран с экраном соответствующей схемы. Все соединенные между собой внешние экраны были подключены к источнику коммутируемого тока.

ВЫВОДЫ

1. Наиболее перспективными быстродействующими аналоговыми ключами для АВМ являются диодно-мостиковые ключи, включенные по схеме переключения тока. Открывать мост необходимо источником тока, а закрывать — источником напряжения.

2. В экранированных известным образом ключах появляются на нагрузке существенные всплески напряжений от коммутирующего источника с большой постоянной времени.

3. Для реализации быстродействия необходимо применить двойное экранирование с подсоединением внешнего экрана к коммутируемому источнику со стороны входа в ключ.

4. Получена возможность уменьшения и стабилизации общей емкости ключа на «землю» в открытом состоянии.

5. В результате шунтирования емкостями диодов получена возможность некоторого уменьшения всплесков в коммутируемом сигнале на переднем фронте.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Анисимов, А. П. Голубев. Транзисторные модуляторы. Изд-во «Энергия», М.—Л., 1964.
 2. Д. Е. Полонников. Электронные усилители автоматических компенсаторов. Физматгиз, 1960.
 3. Сб. «Аналоговая и аналого-цифровая вычислительная техника». Изд-во «Машиностроение», 1965.
 4. E. D. Gilles, H. Schichmann. Der Transistorhalter im analogen Rechenkreis. «Electron. Rechenanlag», 1966, 8, № 4, 186—191.
 5. В. Л. Быков. Быстродействующий диодный ключ. Авт. свид. № 163436, «Бюллетень изобретений», 1964, № 12.
 6. В. И. Калашников. Возможности токовых цифро-аналоговых преобразователей. Тезисы II ВК по АВТ, М., 1966.
 7. Ю. Р. Носов. Полупроводниковые импульсные диоды. Изд-во «Советское радио», 1965.
 8. Ю. М. Лебедев-Красин. Широкополосный радиочастотный трансформатор. Авт. свид. № 106770, «Бюллетень изобретений», 1957, № 5.
-