

ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ СТУПЕНЕЙ МАЛЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Ю. В. Гридин

Киевский институт автоматики

В существующих в настоящее время устройствах для бесконтактного переключения напряжения нашли применение электронные ключи, в которых использованы вакуумные или полупроводниковые приборы.

В процессе коммутации на эти устройства, кроме переключаемого напряжения, действуют как напряжение, осуществляющее функцию коммутации, так и другие вспомогательные напряжения. Переходные проводимости цепей, где действуют эти напряжения, зависят от внешних воздействий и времени. Поэтому применяемые в настоящее время бесконтактные элементы обладают нестабильностью нулевой точки. В тех случаях, когда переключаемые напряжения достаточно велики, величиной дрейфа нуля в схеме переключателя можно пренебречь.

С уменьшением величины переключаемого напряжения точность переключения напряжения становится ниже ввиду того, что дрейф соизмерим с переключаемым напряжением. От нестабильности переключателя можно избавиться, если во время коммутации на устройство переключения не будут действовать никакие другие напряжения, кроме коммутируемого. В этом случае элемент должен обладать управляемой электрически пассивной памятью. Такому требованию удовлетворяют элементы, изготовленные на основе материалов с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ).

В настоящей работе рассматривается магнитный ключ, в котором использован материал ППГ. Принцип действия предлагаемого магнитного ключа состоит в следующем. В сердечнике из материала ППГ имеется два отверстия (рис. 1). Остаточные магнитные потоки в сердечнике направлены так, как показано на рис. 1, *а* стрелками. Если приложить к обмотке w_k переключаемое напряжение E_L , то под действием ампервитков $i_L w_L$ материал сердечника начнет перемагничиваться. Направление приложенной магнитодвижущей силы м.д.с. таково, что перемагничивание материала ППГ происходит по пути 1 через перемычку 2. Перемычка 3 не будет перемагничиваться под действием приложенной м.д.с., так как она уже находится в состоянии насыщения. Если положить, что остаточные магнитные потоки в сердечнике направлены так, как изображено на рис. 1, *б* стрелками, то материал под действием той же м.д.с. будет перемагничиваться по пути 4 через перемычку 3. Перемычка 2 теперь уже не будет перемагничиваться. В первом случае напряжение, индуцируемое в обмотке w_k , равно $u_{\text{вых}} = 0$. Во втором случае $u_{\text{вых}} = E_L \frac{w_k}{w_L}$. Расположение остаточных магнитных потоков, изображенное на рис. 1, *а*, легко может быть превращено в расположение, изображенное на рис. 1, *б*. Для этого необходимо приложить м.д.с. к управля-

шему отверстию 5 в направлении перемagnetивания материала ППГ вокруг этого отверстия. Величина м.д.с. должна быть недостаточна для перемagnetивания материала сердечника вокруг большого отверстия.

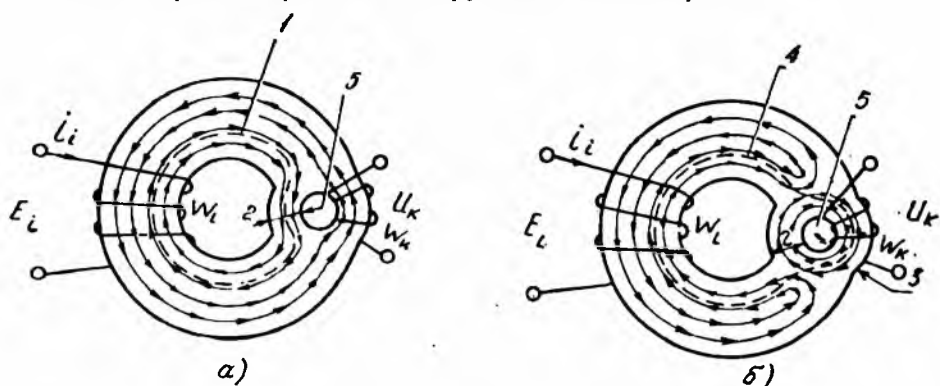


Рис. 1. Принцип действия магнитного ключа.

Располагая в сердечнике ряд управляющих отверстий и связанных с ними выходных катушек, можно получить устройство переключения напряжения по различным цепям (рис. 2, а). Здесь пунктирными линиями схематически показаны линии поля, по которым материал ППГ перемagnetивается под действием переключаемого напряжения E_L . Путь этих линий может изменяться под действием м.д.с., прикладываемых вокруг управляющих отверстий 1—9.

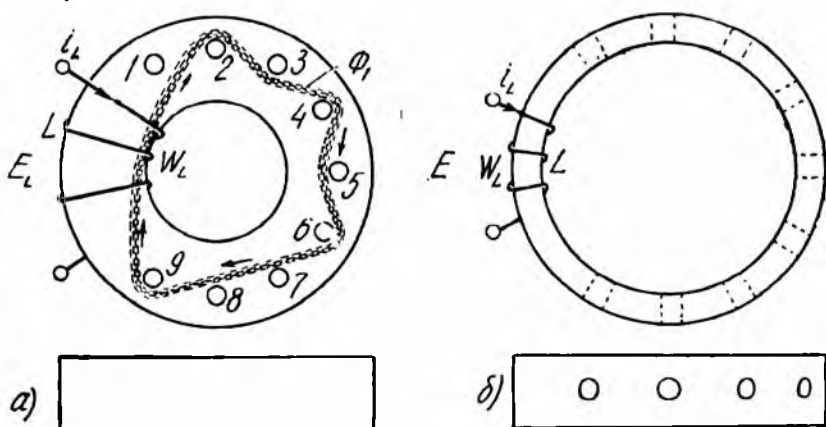


Рис. 2. Идеализированная и реальная петля гистерезиса материала с ППГ.

При формировании малых напряжений скорость изменения потока в сердечнике (рис. 2, а) мала. Если принять, что петля гистерезиса является идеальным прямоугольником (рис. 3, а), то перемagnetивание материала должно происходить при $H = H_c$. При определенной магнитодвижущей силе это условие выполняется для очень тонкого замкнутого слоя ферромагнитного материала, имеющего минимальную длину и направление намагниченности, противоположное приложенной магнитодвижущей силе. Перемagnetивание происходит путем движения границы раздела между линиями потока, направленными в противоположные стороны. При движении этой

границы перемещенная кривая раздела между линиями потока, направленными в противоположные стороны, образуется путем передвижения по нормальям каждой точки исходной кривой на одну и ту же величину $d\delta$.

Если взять на исходной кривой две нормали к точкам, расположенным на некотором расстоянии, то

$$dS_2 - dS_1 = d\delta d\varphi,$$

где dS_2 и dS_1 — длины дуг между нормальями и $d\varphi$ — угол между ними.

Так как $dS_2 - dS_1 = dl$, где dl — разница в длине между двумя кривыми, то

$$dl = 2\pi d\delta. \quad (1)$$

Мы видим, что длина зависит от движения границы раздела между линиями потока, направленными в противоположные стороны, и не зависит от формы перемещающейся кривой.

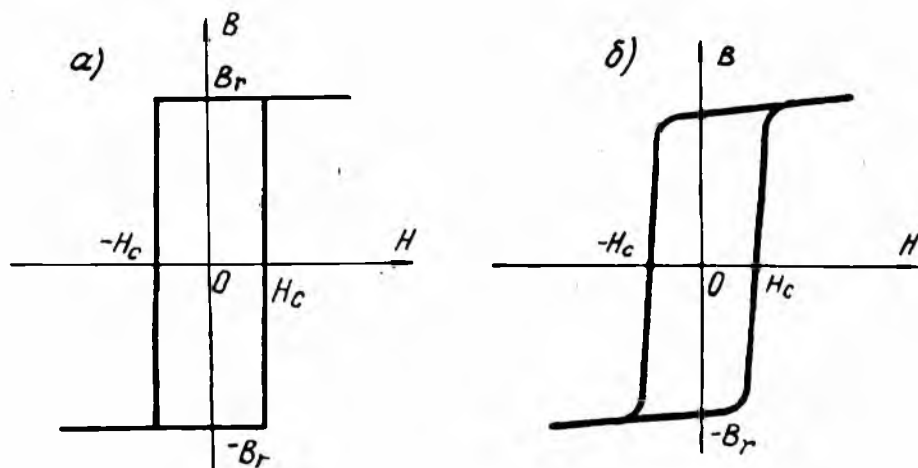


Рис. 3. Варианты конструкции магнитного ключа.

Предположим, что форма петли гистерезиса имеет вид, изображенный на рис. 3, а. Тогда для магнитного потока Φ_1 (рис. 2) в сердечнике имеем

$$\frac{d\Phi_1}{dt} = \frac{E_L}{\omega_L}$$

и, следовательно, чтобы стабилизировать скорость изменения магнитного потока в соответствии с переключаемым напряжением, достаточно к зажимам обмотки ω_L (рис. 1) на время перемагничивания сердечника приложить переключаемое напряжение. В обмотках, связанных с отверстиями 1 ÷ 9, будут индуцироваться напряжения: $u_{\text{выкл}} = 0$, либо $u_{\text{вкл}} = E_2 \frac{\omega_K}{\omega_L}$, где $u_{\text{выкл}}$ и $u_{\text{вкл}}$ — напряжения катушки, связанной с управляющим отверстием.

Производная тока при перемагничивании сердечника будет:

$$\frac{di}{dt} = \frac{H_c}{0,4\pi\omega_c} \cdot \frac{dl}{dt}.$$

Учитывая, что

$$\frac{d\Phi}{dt} = 2B_r h \frac{d\delta}{dt},$$

получим

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{2.5H_c}{B_r h w_L}. \quad (2)$$

Здесь H_c — коэрцитивная сила, B_r — индукция насыщения сердечника и h — толщина сердечника.

В реальном материале ППГ благодаря наклону характеристики $B = f(I)$ в области насыщения при изменении напряженности поля, вызванной увеличением тока перематгничивания сердечника в обмотках управляющих отверстий 1÷9, не пронизанных потоком Φ_1 (рис. 3), возникает остаточное напряжение:

$$u_{\text{выкл}} = w_k \left(\frac{d\Phi}{dt} \right)_{\text{выкл}} = w_k.$$

Здесь μ — магнитная проницаемость сердечника.

Выражение (2) в случае реальной, а не идеальной прямоугольной петли гистерезиса является приближенным.

Учитывая, что $\frac{dH}{dI_L} < \frac{0.4w_L}{D}$ и $u_{\text{вкл}} = w_k \frac{d\Phi}{dt}$, где D — средний диаметр сердечника (рис. 3), получим:

$$\frac{u_{\text{вкл}}}{u_{\text{выкл}}} > \frac{B_r}{\mu H_c} \cdot \frac{D}{\delta}. \quad (3)$$

Сердечники, у которых управляющие отверстия сделаны не в торцевой поверхности кольца, как это показано на рис. 2, а, а в боковой (рис. 2, б), будет иметь лучшее отношение $\frac{u_{\text{вкл}}}{u_{\text{выкл}}}$, ибо в этом случае величину δ можно сделать достаточно малой и тем самым получить отношение $\frac{D}{\delta}$ достаточно большим.

Уменьшение δ при технических применениях устройства ограничивается временем, на которое необходимо включить напряжение в какую-либо цепь, а также величиной переключаемого напряжения. Действительно, для напряжения, индуцируемого в выходной обмотке, имеем:

$$\int_0^t u dt \leq 2B_r \delta h w_k \cdot 10^{-8},$$

откуда

$$\delta \geq \frac{u_{\text{уд}}}{B_r h} \cdot 10^{-8}, \quad (4)$$

где h — высота боковой поверхности сердечника и $u_{\text{уд}} = \frac{u_k}{w_k}$. Подставляя (4) в (3), получим:

$$\frac{u_{\text{вкл}}}{u_{\text{выкл}}} \leq k \frac{Dh}{u_{\text{уд}} t} \cdot 10^{-8}, \quad (5)$$

где $k = \frac{B_r}{\mu H_c}$ — константа материала с прямоугольной петлей гистерезиса.

Основные параметры некоторых применяемых в настоящее время материалов ППГ и вычисленная константа материала приведены в табл. 1.

Величина μ в нашем случае должна определяться при напряженностях выше коэрцитивной силы материала. Эту величину мы приняли равной

$$\mu = \frac{B_m - B_r}{H_m}.$$

Для ферритов величина B_m в табл. 1 определялась при $H_m = 5H_c$ и спечсплавов при $H_m = 60_s$.

Т а б л и ц а 1

Марка материала	B_r	B_m	H_c	D	μ	K
Ферриты ВТ-1	2300	2500	1,25	0,92	30	$1,31 \cdot 10^5$
ВТ-2	2550	2700	0,8	0,94	37,6	$2,17 \cdot 10^5$
ВТ-4	2500	2700	2,0	0,93	20	$1,55 \cdot 10^5$
ВТ-5	2700	2900	0,15	0,93	267	$1,81 \cdot 10^5$
K28	2600	2800	1,5	0,93	27	$1,66 \cdot 10^5$
K65	2100	2400	0,43	0,87	140	$0,74 \cdot 10^5$
K132	1800	2100	0,15÷0,2	0,86	300	$0,54 \cdot 10^5$
K210	2700	2800	1,25	0,96	16	$3,6 \cdot 10^5$
K211	200	2060	0,1	0,97	120	$3,3 \cdot 10^5$
пермаллой Н50П	12 000	15 000	0,3	0,8÷0,85	50	$96 \cdot 10^5$
пермаллой Н65П	11 000	12 800	0,15	0,87	30	$260 \cdot 10^5$
перминвар	14 000	15 000	0,4	0,9÷0,92	16,7	$290 \cdot 10^5$

Здесь α — коэффициент прямоугольности материала ППГ.

Применяя магнитный ключ, необходимо учитывать следующие его особенности:

1. Из выражения (5) видно, что качество переключения будет тем лучше, чем меньшую величину напряжения мы включаем. С этой точки зрения магнитное включение ступеней малых напряжений имеет несомненное преимущество перед другими бесконтактными ключами, например полупроводниковыми, где при малых включаемых напряжениях появляется дрейф нуля, с которым трудно бороться.

2. В процессе работы магнитный поток ключа должен изменяться с постоянной скоростью в одном направлении, поэтому работать ключ может только в течение некоторого конечного интервала времени с периодической установкой в исходное состояние. Как видно из (5), качество переключения будет тем лучше, чем меньше рабочее время ключа.

3. Поскольку изменяющийся магнитный поток проходит в материале ППГ, то коммутационные элементы магнитного ключа обладают памятью. Это аналогично включению контакта реле с самоблокировкой. В ламповых или полупроводниковых устройствах для этих целей необходимо обычно использовать для каждого коммутационного элемента триггер.

4. Коммутационные элементы магнитного ключа могут не иметь земной точки, что часто вызывает затруднения при других видах бесконтактной коммутации.

5. От одного источника переключаемого напряжения легко можно получить целый ряд вторичных напряжений, гальванически не связанных между собой. Коэффициент передачи напряжения

$$p = \frac{W_k}{W_L}.$$

6. В момент переключения в выходной обмотке возникают нежелательные выбросы напряжения. При этом напряжение в выходной обмотке не определяется входным напряжением ключа. Необходимо учитывать влияние этих выбросов при использовании магнитного ключа.

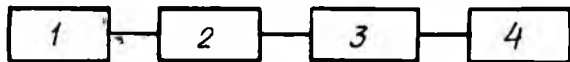


Рис. 4. Блок-схема электронного ключа:

1 — триггер; 2 — управляемый высокочастотный генератор;
3 — выпрямитель; 4 — коммутационный элемент.

7. Для работы ключа требуется относительно высокая мощность переключаемого напряжения.

Свойства магнитного ключа достаточно хорошо удовлетворяют требованиям, предъявленным к устройствам ступенчатой компенсации в аналого-дискретных преобразователях.

Существующие аналого-дискретные преобразователи, работающие по методу ступенчатой компенсации напряжения, имея большое быстродействие и большую разрешающую способность, достаточно сложны. Значительная часть аппаратуры и прецизионных элементов таких преобразователей приходится на схемы формирования и включения эталонных напряжений. Схемы эти осуществляются обычно при помощи омических делительных цепочек, в которые входят прецизионные сопротивления, включаемые и выключаемые в процессе преобразования. Электронные коммутирующие переключающие устройства должны обладать памятью и быть изолированы от земли. Так, преобразователь, описанный в [1], имеет блок-схему коммутирующего устройства (рис. 4), где управление коммутационным элементом осуществляется выпрямленным напряжением изолированной от земли обмотки высокочастотного генератора, управляемого триггером. Количество коммутирующих устройств должно быть не меньше количества разрядов преобразованного напряжения.

Формирование и переключение эталонных напряжений в схеме аналого-дискретного преобразователя можно упростить, используя описанный выше магнитный ключ с количеством управляющих отверстий, равным количеству коммутирующих устройств, применяемых обычно в схеме преобразователя. При конструировании магнитного ключа $u_{уд}$ можно определить как эталонное напряжение компенсации младшего разряда при аналого-дискретном преобразовании методом ступенчатой компенсации. При этом катушка младшего разряда будет иметь один виток. Время t преобразования также обычно задано. Таким образом, задаваясь величинами D и h кольца из материала ППГ, исходя из приемлемых габаритных размеров магнитного ключа, мы можем определить δ и $\frac{u_{вкл}}{u_{выкл}}$ из (4) и (5).

В заключение для ориентирования в порядке величин в табл. 2 приведены электрические и конструктивные параметры магнитного ключа с использованием различных материалов ППГ. Для материалов ППГ из сплавов время переключения взято значительно больше, чем для ферритов, так как эти материалы обладают сравнительно малой скоростью переключения и благодаря этому необходимо больше времени на переключение потока вокруг управляющих отверстий магнитного ключа.

Таблица 2

Марка материала	K	t , сек	$u_{уд}$, в	D , см	h , см	$\frac{u_{вкл}}{u_{выкл}}$	δ , мм
Ферриты							
ВТ-1	$1,31 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^{-3}$	$0,1 \cdot 10^{-3}$	5	2	$1,31 \cdot 10^5$	0,0216
ВТ-2	$2,17 \cdot 10^5$	»	»	5	2	$2,17 \cdot 10^5$	0,0196
ВТ-4	$1,55 \cdot 10^5$	»	»	5	2	$1,55 \cdot 10^5$	0,02
ВТ-5	$1,81 \cdot 10^5$	»	»	5	2	$1,81 \cdot 10^5$	0,0185
К-28	$1,66 \cdot 10^5$	»	»	5	2	$1,66 \cdot 10^5$	0,0192
К-65	$0,74 \cdot 10^5$	»	»	5	2	$0,74 \cdot 10^5$	0,024
К-132	$0,54 \cdot 10^5$	»	»	5	2	$0,54 \cdot 10^5$	0,028
К-210	$3,6 \cdot 10^5$	»	»	5	2	$3,6 \cdot 10^5$	0,0185
К-211	$3,3 \cdot 10^5$	»	»	5	2	$3,3 \cdot 10^5$	0,025
Пермаллой Н50П	$26 \cdot 10^5$	$100 \cdot 10^{-3}$	»	5	2	$0,96 \cdot 10^5$	0,41
Пермаллой Н65П	$260 \cdot 10^5$	»	»	5	2	$2,6 \cdot 10^5$	0,45
Перминвар	$290 \cdot 10^5$	»	»	5	2	$2,9 \cdot 10^5$	0,36

ЛИТЕРАТУРА

1. Gilbert R. L. An analogue — digital converter with long life. J. Brit. Inst. Radio Engin, 1960, 20, № 7.