

С.П. МАСЛОВ

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ МАГНИТНОЙ ЗАПИСИ ТРОИЧНОГО КОДА

Исследование возможностей записи троично-кодированной информации на магнитной поверхности представляет интерес, во-первых, как предпосылка к осуществлению троичных цифровых устройств и, во-вторых, как один из путей повышения эффективности использования запоминающей среды.

Участки магнитной поверхности могут находиться в одном из трех различных состояний: размагниченность и намагниченность до насыщения в двух направлениях. Это позволяет осуществлять троичные ЗУ, причем, подобно тому, как это делается в двоичных устройствах, возможно использование систем с возвращением и без возвращения к нулю [1]. Несмотря на существенное повышение эффективности использования запоминающей среды (в 1,6 раза), реализация устройств такого типа уместна в основном на магнитной ленте, поскольку для перезаписи требуется специальная подготовка (размагничивание) поверхности.

В данной работе будет рассмотрена модификация фазового метода магнитной записи таким образом, чтобы обеспечить возможность непосредственной (без перекодирования) записи информации, представленной в симметричном троичном коде, на магнитной поверхности. Идея фазового метода при записи двоично-кодированной информации заключается в том, что направление намагниченности поверхности претерпевает изменение в середине цифрового интервала. При этом изменение в одном направлении соответствует двоичной 1, а в противоположном – двоичному 0. Развитие этой идеи состоит в том, что к упомянутым ситуациям добавляется такая, при которой изменения направления намагниченности не происходит. Эту ситуацию уместно интерпретировать как троичный 0, а две предыдущие – как троичные 1 и -1 . Сказанное иллюстрируется рис. 1, а, на котором изображена эпюра тока $i_{зап}$, требуемого для записи некоторой последовательности троичных цифр фазовым методом. На рис. 1, б приведена эпюра э. д. с. считанных сигналов $исч$. Как было сказано, троичному 0 соответствует неизменное значение намагниченности на протяжении цифрового интервала. Чтобы достигнуть этого, при записи необходимо сохранять постоянным записывающий ток, пока под головкой проходит соответствующий участок магнитной поверхности. Поскольку для записи 0 требуется только постоянство записывающего тока, а сам ток может протекать в любом из двух направлений, хранение нуля может осуществляться двумя способами, отличающимися знаком намагниченности участка поверхности. Это обстоятельство отражено на рис. 1 наличием двух типов нулей, обозначаемых соответственно символами 0_+ и 0_- . Как следует из рисунка, при записи 0_+ ток записи имеет положительное значение, а при записи 0_- – отрицательное. Отметим, что в приведенной на рис. 1 последовательности троичных цифр имеет место чередование 0_+ и 0_- . Таким путем достигается практически полное отсутствие постоянной составляющей в спектре записывающего сигнала. Действительно, сигналы записи 1 и -1 не содержат постоянной составляющей даже на протяжении цифрового интервала, поскольку среднее значение тока за этот

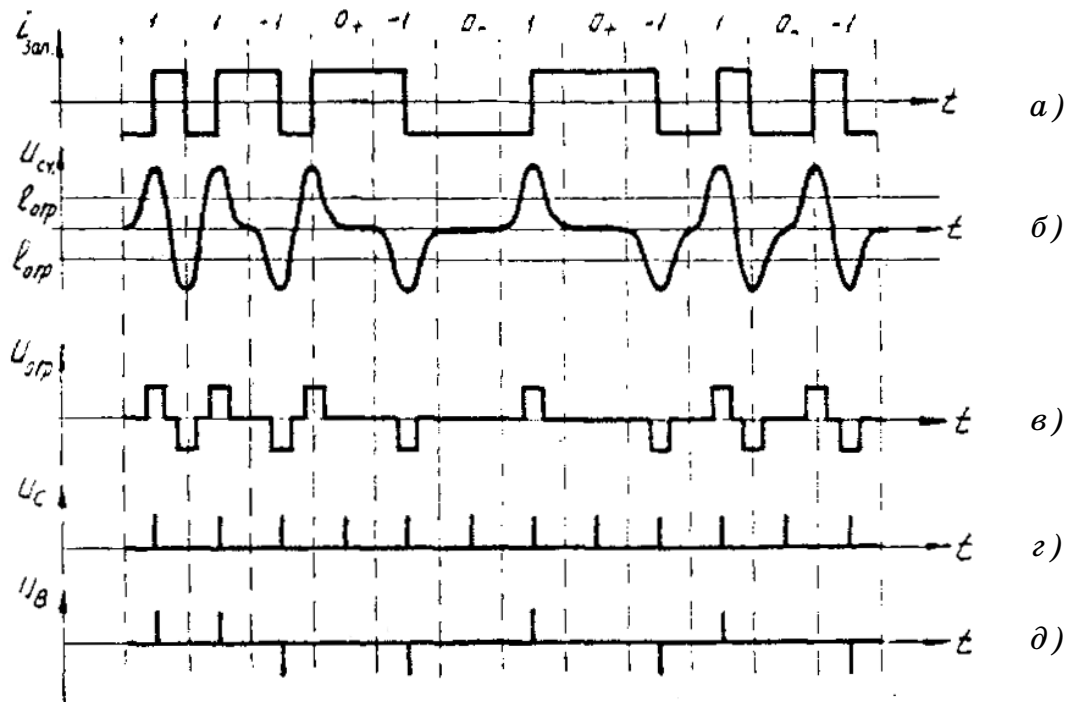


Рис. 1

период равно нулю. При чередующихся нулях такое положение имеет место при записи двух (и вообще четного числа) нулей. Таким образом, смещение нулевого уровня записываемого сигнала в результате частотных ограничений в тракте записи не может превышать величины тока записи усредненного на интервале прохождения записываемой последовательности. Отсутствие постоянной составляющей в сигнале записи является в некоторых случаях обязательным условием нормальной работы запоминающего устройства. Такое положение возникает, в частности, при использовании одновитковых магнитных головок с ферритовым сердечником, которые по существу представляют собой импульсный трансформатор и не могут пропускать постоянную составляющую. В других случаях отмеченная особенность существенно упрощает устройство тракта записи. Из эюры, изображенной на рис. 1, а, следует, что максимальный промежуток времени, разделяющий два соседних изменения тока, не превышает удвоенной продолжительности цифрового интервала. Такая ситуация имеет место, например, при записи кодовой последовательности $10_+ -1$. Поскольку при двоичной фазовой записи два соседних перепада могут отстоять друг от друга не более чем на один цифровой интервал, можно считать, что нижняя граница полосы пропускания тракта записи в троичном ЗУ должна соответствовать вдвое более низкому значению частоты по сравнению с двоичным ЗУ при одинаковых допустимых искажениях. Отметим, что если отказаться от требования чередовать нули (в тех случаях, где это в принципе осуществимо), то благодаря тому, что на каждом цифровом интервале можно записать либо 0_+ , либо 0_- , создаются условия для хранения четверично-кодированной информации. При этом два качественно различающихся состояния элемента магнитной поверхности характеризуются тем, что происходит изменение знака намагниченности в середине цифрового интервала, а два других — тем, что изменения знака не происходит.

Распознавание хранимой информации в запоминающем устройстве, где реализована троичная фазовая запись, может производиться различными путями. При малой плотности, когда конфигурация считанного сигнала, соответствующего перепаду намагниченности, не зависит от того, имеются ли поблизости другие перепады, распознавание можно осуществлять, стробируя считанный сигнал в моменты времени, когда под головкой проходит центральная часть цифрового интервала. При этом положительный сигнал указывает на то, что в данной позиции хранится 1, отсутствие сигнала воспринимается как 0, а сигнал отрицательной полярности соответствует -1 . На рис. 1, *в*, *г*, *д* представлены соответственно сигнал $u_{огр}$, полученный в результате усиления и ограничения сигнала $u_{сч}$, превышающего (по абсолютной величине) уровень $e_{огр}$, серия стробирующих импульсов u_c и сигнал u_b на выходе схемы, осуществляющей распознавание. Возможны и другие методы распознавания, сходные с теми, которые применяются при двоичной фазовой записи. Так, например, метод пикового детектирования [2], позволяющий определять наличие перепада намагниченности в условиях сильного взаимовлияния соседних перепадов, пригоден для использования в троичном ЗУ.

Важной особенностью разового метода записи двоично-кодированной информации является то, что количество вариантов расположения перепадов намагниченности, соседствующих с перепадом, наличие которого требуется выяснить в процессе распознавания, ограничено по сравнению с другими методами записи. Это в свою очередь обуславливает меньшее число вариантов конфигурации считанного сигнала сравнительно с тем, которое определяется существующей степенью взаимовлияния [2]. При троичной фазовой записи эта особенность выражена менее четко, поскольку наблюдается большее разнообразие вариантов расположения перепадов намагниченности. Действительно, в двоичном случае ближайший перепад может находиться либо на расстоянии половины цифрового интервала от данного, либо отстоять от него на целый интервал (справа и слева). В троичном случае промежуток между двумя перепадами может достигать до двух цифровых интервалов. Таким образом, можно предположить, что предельное значение плотности записи, достигаемое в троичных запоминающих устройствах, окажется меньшим по сравнению с тем, которое удастся реализовать в сопоставимых двоичных ЗУ. Вместе с тем, поскольку троичный разряд содержательнее двоичного, суммарный эффект должен определяться с учетом этого обстоятельства. Естественно, что количественная оценка эффективности использования магнитной поверхности при реализации троичного ЗУ зависит от применяемого метода распознавания.

В данной работе производится определение предельного значения плотности, которая может быть достигнута при записи троично-кодированной информации фазовым методом. Полученные результаты сравниваются с аналогичными показателями двоичного запоминающего устройства, достигаемыми при использовании той же системы «магнитная головка – зазор – покрытие». В обоих случаях распознавание выполняется так называемым разностным способом [3]. Выбор такого способа основывается на том, что он допускает работу при сильном взаимовлиянии соседних перепадов, т. е. именно в тех случаях, которые наиболее интересны для анализа, поскольку при малых

плотностях, когда взаимовлияние невелико, преимущества троичной фазовой записи в смысле более эффективного использования запоминающей среды не вызывают сомнений.

Идея разностного способа распознавания заключается в том, что для определения положения перепада намагниченности служит сигнал, представляющий собой разность между собственно считанным сигналом и этим же сигналом, задержанным на половину цифрового интервала:

$$\delta(t) = u_{сч}(t) - u_{сч}(t - \frac{T}{2}) \quad (1)$$

где T – продолжительность цифрового интервала. Исследуем вид $\delta(t)$ для случая, когда под магнитной головкой проходит уединенный перепад намагниченности. Реакция головки на такой перепад 1 выражается в том, что на ее обмотке возникает импульс э. д. с. колоколообразной формы. Известно [3], что хорошая аппроксимация импульса э. д. с. (при допущениях, которые в большинстве случаев выполняются) может быть достигнута, если использовать соотношение

$$u_{сч}(t) = Ue^{-\beta^2 t^2} \quad (2)$$

где U – амплитуда импульса э. д. с.,

β – параметр, характеризующий систему «головка – зазор – покрытие». Подставляя (2) в (1), получим, что для уединенного перепада, расположенного в точке $t = 0$, функция $\delta(t)$ имеет вид

$$\delta(t) = U(e^{-\beta^2 t^2} - e^{-\beta^2 (t - \frac{T}{2})^2}) \quad (3)$$

Функция $\delta(t)$ обращается в нуль в точке $T/4$, а ее значения в точках $t = 0$ и $t = T/2$ равны по абсолютной величине и противоположны по знаку:

$$\delta(0) = -\delta(\frac{T}{2}) = U(1 - e^{-\frac{\beta^2 T^2}{4}}) \quad (4)$$

Таким образом, признаком наличия перепада намагниченности в данном цифровом интервале при использовании разностного способа распознавания будет являться переход через нуль функции $\delta(t)$ во второй половине интервала. Это утверждение, как будет показано далее, справедливо не только для уединенного перепада, но и для случая, когда имеет место сильное взаимовлияние соседних перепадов. Конфигурация считанного сигнала в условиях сильного взаимовлияния может быть представлена как суперпозиция реакции головки на каждый отдельный перепад. Это утверждение, основывается на том, что процесс воспроизведения является линейным, и справедливо до тех пор, пока промежутки между соседними перепадами намагниченности носителя превышают протяженность самих перепадов. В дальнейших рассуждениях это условие предполагается выполненным. Поскольку из соотношения (2), характеризующего реакцию головки на уединенный перепад, следует, что

Под уединенным перепадом здесь понимается перепад, находящийся на таком расстоянии от соседних перепадов, что конфигурации считанного сигнала (в пределах цифрового интервала) не зависят от них.

неравенство $u_{сч}(t) > 0$ справедливо на интервале $(-\infty, +\infty)$, для определения текущего значения считанного сигнала необходимо учитывать, вообще говоря, все предшествующие и последующие перепады. Мы ограничимся учетом реакций на перепады, находящиеся слева и справа от данного на расстоянии, равном половине длительности цифрового интервала. Правомерность такого ограничения обосновывается следующей оценкой. Пусть соседние перепады отстоят друг от друга на промежуток времени t_{\min} такой, что выполняется условие

$$e^{-\beta^2 t_{\min}^2} = 0,5 \quad (5)$$

В этом случае учет взаимовлияния только соседних перепадов приведет к тому, что значение суммарного сигнала в середине цифрового интервала для достаточно длинной последовательности 1 (или -1) окажется равным нулю. С другой стороны, влияние перепада, отстоящего на величину цифрового интервала от данного, как это следует из соотношения

$$e^{-\beta^2 (2t_{\min})^2} = 0,6 \quad (6)$$

не превышает 6% от амплитуды. Для значений $t > t_{\min}$ влияние последующих перепадов оказывается еще меньшим. Аппроксимация, даваемая формулой (2), обеспечивает совпадение с реальным сигналом с точностью такого же порядка. Это в особенности справедливо для тех участков импульса, где значение $u_{сч}(t)$ близко к нулю, так как реальный сигнал приходит к нулю быстрее аппроксимирующей функции. Таким образом, учет реакции только ближайших соседних перепадов (если они есть), существенно упрощая анализ, оказывается достаточным для получения необходимых оценок, во всяком случае, для значений плотности записи

$$\rho < \frac{1}{2t_{\min}} \quad (7)$$

Как уже отмечалось, при использовании разностного способа распознавания признаком того, что в середине данного цифрового интервала имеется перепад намагниченности, служит переход через нуль функции $\delta(t)$, определяемой выражением (1), во второй половине этого интервала. Можно показать, что если перепад имеет симметричное окружение, то, как и в случае уединенного перепада, будут выполняться условия:

$$\delta\left(\frac{T}{4}\right) = 0 \quad \text{и} \quad \delta(0) = -\delta\left(\frac{T}{2}\right)$$

Если же конфигурация перепадов, расположенных по обе стороны от данного, неодинаковы, то переход через нуль функции $\delta(t)$ будет происходить ближе к середине (или к концу) интервала, а значения $\delta(0)$ и $\delta\left(\frac{T}{2}\right)$ окажутся различными (по абсолютной величине).

В реальных ЗУ, в которых используется магнитная поверхность, считанный сигнал, перед тем как поступить на схему распознавания, подвергается амплитудной селекции. Степень селекции определяется такими факторами, как уровень шумов в тракте воспроизведения, наличие дефектов магнитного слоя, влияние соседних дорожек и т. д. В этом отношении не представляет исключения и

разностный способ распознавания, с той только разницей, что амплитудной селекцией подвергается не сам считанный сигнал, а сигнал $\delta(t)$. При этом если значение разности в моменты опроса оказывается меньше уровня селекции, распознавание информации, записанной с данной плотностью, становится невозможным. Анализ зависимости и минимальной разности на краю интервала, внутри которого функция $\delta(t)$ проходит через нуль, от степени взаимовлияния соседних разрядов позволит получить ответ на вопрос о том, при каком предельном значении плотности сохраняется возможность устанавливать местоположение перепадов намагниченности и, таким образом, заключать о записанном коде ¹.

Любой кодовой последовательности можно поставить в соответствие другую, симметричную первой относительно оси, проходящей через центр цифрового интервала или его края. Такая же симметрия будет наблюдаться, очевидно, и в $u_{сч}(t)$ и соответственно в разностном сигнале $\delta(t)$. Поэтому при воспроизведении целесообразно осуществлять стробирование разностного сигнала именно в этих точках, чтобы обеспечить наиболее уверенное распознавание. При этом признаком того, что в данной точке имеется перепад намагниченности, является то, что значения $\delta(t)$ в этой точке и спустя половину цифрового интервала различны по знаку. Если же эти значения имеют одинаковый знак, то это указывает на отсутствие перепада.

Оценить предельное значение плотности, достижимое при использовании заданной системы «головка – зазор – покрытие», можно, приравняв минимальное значение $\delta(t)$ к уровню селекции на входе распознающего устройства.

Таким образом, для последующего анализа необходимо знать, какая конфигурация соседних перепадов соответствует случаю, наихудшему для распознавания. Так как оценка взаимовлияния ограничивается учетом перепадов, отстоящих от рассматриваемой точки не более чем на половину цифрового интервала, общее количество конфигураций оказывается небольшим, и уместно просмотреть все возможные значения $\delta(t)$. Это целесообразно сделать еще и потому, что не очевидно, будет ли одна и та же конфигурация соответствовать наихудшему случаю при разных степенях наложения. Будем исследовать разностный сигнал в крайней правой точке цифрового интервала, в середине которого имеется перепад намагниченности.

Условимся, что рассматриваемый интервал расположен симметрично относительно начала координат. Поскольку интересующая нас величина разности $\delta(\frac{T}{2})$ определяется значениями считанного сигнала в точках 0 и $T/2$, а эти значения в свою очередь зависят от наличия соседних перепадов намагниченности в точках $-T/2$, $T/2$ и T , необходимо рассмотреть конфигурации сигнала $u_{сч}(T)$, образующиеся в результате суперпозиции реакций на перепады намагниченности в этих точках. На рис. 2 показаны все конфигурации, возможные на интервале $(-T/2, T)$. При этом существование перепада намагниченности в точке 0 является обязательным; перепады в точках $-T/2$, $T/2$ и T могут отсутствовать. Обязательным условием является лишь то, чтобы в каждом последующем перепаде знак изменения намагниченности был проти-

1) При считывании двоично-кодированной информации, записанной фазовым методом, вообще говоря, нет необходимости устанавливать положение всех имеющихся перепадов. Это обстоятельство будет учтено позднее, при сопоставлении двоичных и троичных запоминающих устройств.

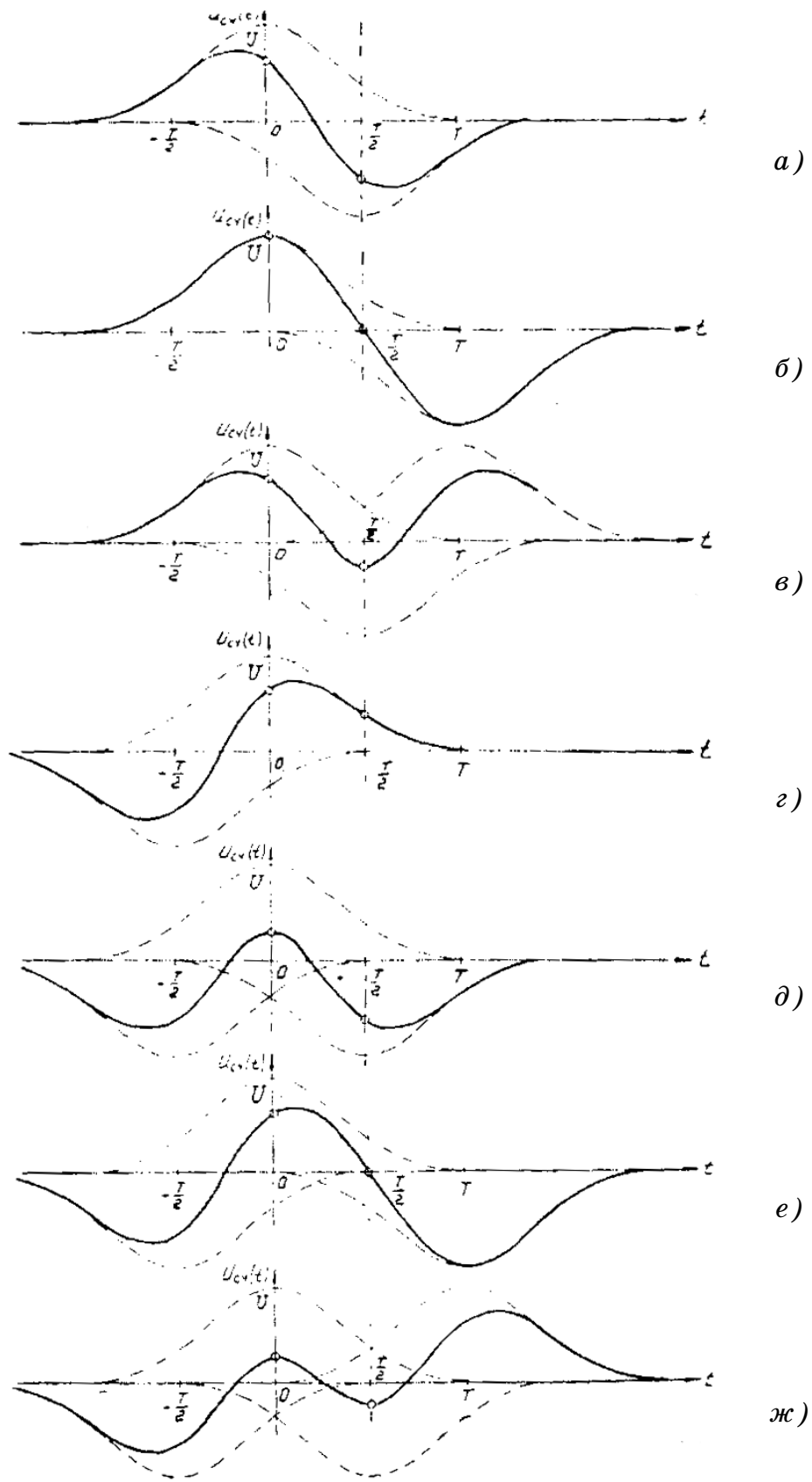


Рис. 2

воположен знаку предыдущего изменения. Это условие вытекает из сущности фазовой записи. Пунктирные линии представляют собой реакции на отдельные перепады (в соответствии с выражением (2)), сплошной линией показан сигнал, образующийся в результате суперпозиции этих реакций. Значения суммарного сигнала в точках 0 и T/2, необходимые для вычисления $\delta(\frac{T}{2})$, отмечены кружками. В таблице приведены значения $u_{сч}(0)$, $u_{сч}(T/2)$ и значения $\delta(\frac{T}{2})$ для перечисленных вариантов. С целью упрощения выкладок введено обозначение

$$a = e^{-\beta^2(\frac{T}{2})^2} \quad (8)$$

Среди полученных значений $\delta(\frac{T}{2})$ имеется одно тривиальное (2, б) и два совпадающих (2, в и 2, д). Таким образом, для дальнейшего анализа остаются пять значений:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= 2(1-a) \\ \Delta_2 &= 2-3a \\ \Delta_3 &= 1-2a \\ \Delta_4 &= 1-a \\ \Delta_5 &= 2(1-2a) \end{aligned} \quad (\Delta = |\frac{\delta(\frac{T}{2})}{U}|) \quad (9)$$

Номер рисунка	$u_{сч}(0)$	$u_{сч}(T/2)$	$\delta(\frac{T}{2})$
2, а	$U(1-a)$	$-U(1-a)$	$-2U(1-a)$
2, б	U	0	$-U$
2, в	$U(1-a)$	$-U(1-2a)$	$-U(2-3a)$
2, г	$U(1-a)$	Ua	$-U(1-a)$
2, д	$U(1-2a)$	$-U(1-a)$	$-U(2-3a)$
2, е	$U(1-a)$	0	$-U(1-a)$
2, ж	$U(1-2a)$	$-U(1-2a)$	$-2U(1-2a)$

Для большей наглядности полученного результата введем понятие относительной плотности

$$P = \rho/\rho_0 \quad (10)$$

где ρ – предельная плотность, которая может быть достигнута при данном β и выбранном уровне амплитудной селекции;
 ρ_0 – некоторая заданная плотность.

Здесь в качестве ρ_0 будет использовано такое значение плотности, при котором величина считанного сигнала в середине цифрового интервала еще не зависит от наличия соседних перепадов намагниченности. Для определенности условимся считать, что

$$\rho_0 = 1/4t_{\min} \quad (11)$$

где t_{\min} задано соотношением (5).

Работа при плотностях, меньших, чем ρ_0 , допускает распознавание записанной информации непосредственно по значению считанного сигнала в центре интервала, поэтому наибольший интерес будет представлять область, где $P > 1$. Подставим (11) в (8), выразив предварительно t_{\min} через β . Учтя, что $\rho = 1/T$, получим

$$a = e^{\frac{4 \ln 0,5}{\rho^2}} \quad (12)$$

На рис. 3 показаны зависимости значений разностного сигнала Δ от P , построенные на основе соотношений (9) с учетом (12). Сопоставляя представленные кривые, можно заметить, что определяющей является зависимость Δ_3 , поскольку именно ей соответствуют наименьшие значения Δ (при данной плотности), а значит и уровня амплитудной селекции. В предельном случае может быть достигнута плотность троичной записи, характеризуемая значением $P = 2$.

Если сравнить ситуации, приведенные на рис. 2, а-ж, то окажется, что все они, за исключением той, которая изображена на рис. 2, г, могут возникнуть и в случае двоичной фазовой записи. Конфигурация, представленная на рис. 2, г, характерна только для троичного случая; в сходной двоичной картине обязательно должен происходить перепад в точке Т, как это имеет место на рис. 2, е, поскольку максимальный промежуток, разделяющий соседние перепады в двоичном ЗУ, равен Т. Таким образом, предельное значение плотности, которая может быть достигнута в сопоставимом двоичном запоминаю-

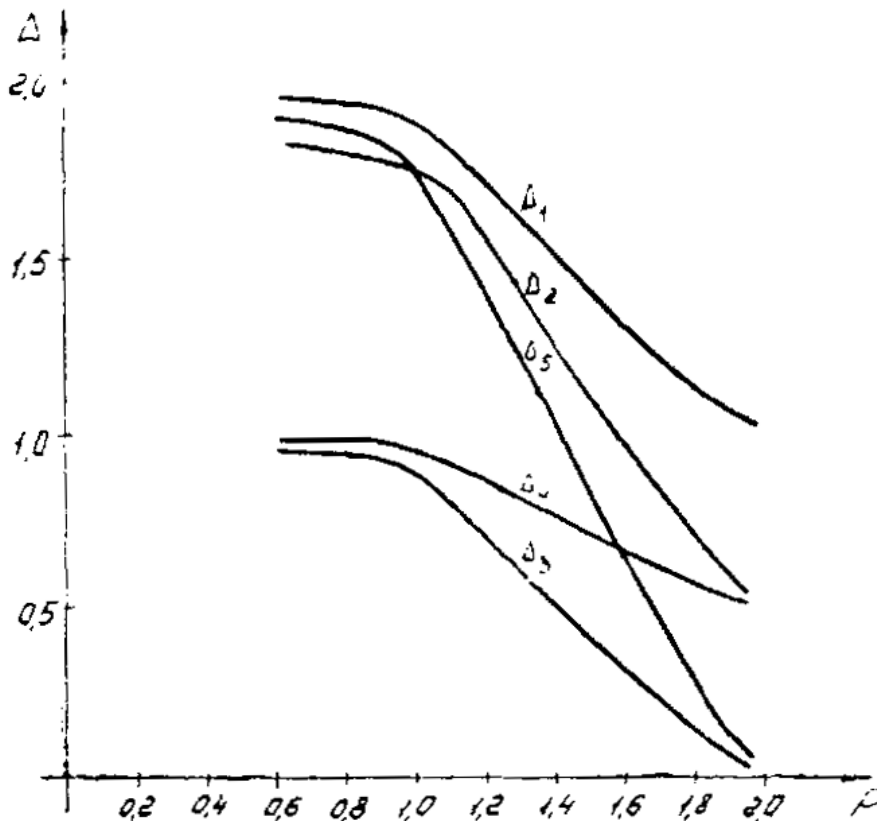


Рис. 3

щем устройстве, будет отличаться от значения, определяемого кривой Δ_3 . Строго говоря, максимально допустимая двоичная плотность определяется кривой Δ_4 , а правее точки ее пересечения с кривой Δ_5 – этой последней. Вместе с тем в двоичном случае, вообще говоря, необязательно восстанавливать все записанные перепады. Достаточно выявить точки перехода, например, от 1 к 0 (и от 0 к 1). Это позволяет исключить из рассмотрения кривую Δ_5 на рис. 3 и определять плотность по кривой Δ_4 . Помимо повышения предельного значения плотности за счет более пологого хода кривой Δ_4 (по сравнению с Δ_5) появляется возможность работать при $P > 2$. Не вдаваясь в детали достаточно сложной картины, на основе которой можно было бы проанализировать ход кривых $\Delta(P)$ в этой области, следует заметить, что при $P > 2$ определяющую роль приобретает кривая Δ_2 . Наклон этой кривой при $P < 2$ приблизительно вдвое превышает наклон кривой Δ_1 . Можно показать, что эта тенденция сохранится и в области, где $P > 2$. Таким образом, работа при $P > 2$ невозможна и в двоичном случае.

Как уже отмечалось, при сравнении двоичных и троичных ЗУ по эффективности использования запоминающей среды необходимо учитывать большую содержательность троичных разрядов. В связи с этим даже тогда, когда в двоичном варианте запоминающего устройства удастся реализовать большую плотность по сравнению с троичным вариантом, выигрыша в использовании магнитной поверхности может и не быть. Для оценки суммарного эффекта удобно использовать коэффициент K , определяемый выражением

$$K = 1,59 P_{\text{тр}} / P_{\text{дв}} \quad (13)$$

где $P_{\text{тр}}$ и $P_{\text{дв}}$ – предельная плотность соответственно троичной и двоичной записи (при одинаковом значении Δ), $1,59 = \log_2 3$ – коэффициент, характеризующий большую содержательность троичного разряда сравнительно с двоичным. Каждому значению Δ соответствуют, вообще говоря, неодинаковые значения $P_{\text{тр}}$ и $P_{\text{дв}}$. При этом должно соблюдаться равенство

$$\Delta_3 = \Delta_4 \quad (14)$$

которое с учетом (9) и (12) приобретает следующий вид:

$$1 - e^{-\frac{4 \ln 0,5}{P^2}} = 1 - 2e^{-\frac{4 \ln 0,5}{P^2}} \quad (15)$$

Из (15) и (13) можно найти, что

$$K = 1,59 \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{P^2}{4}}} \quad (16)$$

Из (16) вытекает, что при $P_{\text{дв}} = 2$ значение $K = 1,12$. Это говорит о том, что даже при записи с плотностью, близкой к предельной, троичный вариант по крайней мере не уступает двоичному.

Проведенное рассмотрение свидетельствует о возможности достаточно простой реализации запоминающих устройств для троично-кодированной информации. Основные показатели таких устройств сравнимы, а при некоторых условиях превосходят показатели сопоставимых двоичных устройств.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Маслов С. П. Вопросы построения запоминающих устройств для троично-кодированной информации. В сб.: «Вычислительная техника и вопросы кибернетики», вып. 7. Изд-во МГУ, 1970.
2. Хогленд А. Цифровая магнитная запись. Пер. с англ. под ред. О.П. Васильева. М., «Советское радио», 1967.
3. Макурочкин В. Г. Магнитная запись в вычислительной технике. М., «Советское радио», 1968.