

УДК 681.327.6

В.Ф. Быченков

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАКТА ЦИФРОВОЙ МАГНИТНОЙ ЗАПИСИ

Рассмотрено представление переходной характеристики тракта цифровой магнитной записи в виде линейной комбинации гауссовой кривой и Лоренциана. Задача аппроксимации экспериментальной характеристики рассматривается как сепарабельная нелинейная задача метода наименьших квадратов. Предложены преобразования параметров модели переходной характеристики, позволяющие обеспечить унимодальность критерия аппроксимации. Методом вычислительного эксперимента исследована структура критерия аппроксимации в зависимости от отношения сигнал/шум тракта для модельной переходной характеристики. Приведены результаты идентификации параметров экспериментальных переходных характеристик.

Введение

Важнейшей характеристикой системы цифровой магнитной записи (ЦМЗ) является переходная характеристика тракта ЦМЗ, т. е. реакция системы «магнитная головка – носитель записи» на одиночный перепад тока записи. Знание этой характеристики на ранних этапах проектирования аппаратуры ЦМЗ позволяет определить требования к структуре канала ЦМЗ и его основные характеристики, что существенно снижает неопределенность результатов проектирования. Однако на начальных этапах проектирования аппаратуры ЦМЗ приходится ограничиваться использованием отдельных параметров типовой переходной характеристики или производными от нее параметрами, известными или прогнозируемыми по результатам ранее выполненных разработок. В качестве таких параметров широкое распространение получили нормированная к тактовому интервалу T длительность переходной характеристики на уровне 50 % амплитуды T_{50}/T и разрешающая способность системы «магнитная головка – носитель записи» R , определяемая как отношение размаха (или амплитуды) сигналов воспроизведения для периодических последовательностей переходов потока намагниченности носителя для двух плотностей записи, характерных для исследуемого тракта ЦМЗ.

В теоретических исследованиях процессов ЦМЗ и процессов обработки сигналов воспроизведения, для получения предварительных оценок характеристик тракта ЦМЗ при проектировании в качестве типовых моделей переходной характеристики используют гауссову кривую в случае контактной ЦМЗ или кривую, получившую в литературе по ЦМЗ название Лоренциан (Lorentzian), в случае бесконтактной ЦМЗ, которые для соответствующих условий записи обеспечивают сравнимость полученных теоретических результатов. Однако при детальном проектировании элементов канала ЦМЗ требуется знание реальной переходной характеристики тракта ЦМЗ (точнее, ее аппроксимации), которая формируется в условиях влияния определенной величины неконтакта между магнитной головкой и носителем записи, наличия продольной и перпендикулярной составляющих намагниченности носителя записи и более точно может быть представлена линейной комбинацией указанных кривых [1–3].

Методика идентификации переходной характеристики должна учитывать наличие шума в экспериментальных данных и может быть основана на минимизации среднеквадратического отклонения. В данной работе путем вычислительного эксперимента выполнены исследование структуры критерия минимума среднеквадратического отклонения (МСКО) и оценка погрешности определения параметров модели переходной характеристики, а также рассмотрено преобразование переменных модели для понижения ее размерности с целью обеспечения унимодальности критерия МСКО.

1. Математическая модель тракта ЦМЗ

1.1. Модель переходной характеристики тракта ЦМЗ

Переходная характеристика тракта ЦМЗ $h_0(t)$ является реакцией тракта на одиночный перепад тока записи, и в литературе по ЦМЗ ее часто называют одиночным сигналом воспроизведения. В общем случае $h_0(t)$ не обладает четной или нечетной симметрией, в частности, из-за наличия продольной и перпендикулярной составляющих намагниченности носителя записи. В силу известной связи между этими составляющими [4] $h_0(t)$ может быть записана в виде

$$h_0(t) = \gamma_1 h(t) + \gamma_0 H[h(t)], \quad (1)$$

где $h(t)$ – четная составляющая переходной характеристики тракта ЦМЗ;

$H[h(t)]$ – интегральное преобразование Гильберта от $h(t)$;

γ_1, γ_0 – весовые множители слагаемых переходной характеристики тракта ЦМЗ.

Четную составляющую переходной характеристики $h(t)$ представим в виде взвешенной суммы гауссовой кривой и Лоренциана:

$$h(t) = \alpha_1 \frac{ab}{\sqrt{2\pi}} \exp(-b^2 t^2 / 2) + \alpha_2 \frac{2V}{\pi T_{50} \left[1 + (2t/T_{50})^2 \right]}, \quad (2)$$

где α_1, α_2 – весовые множители.

Спектр $h(t)$ описывается выражением

$$S(\omega) = \alpha_1 a \exp(-\omega^2 / 2b^2) + \alpha_2 V \exp(-|\omega| T_{50} / 2). \quad (3)$$

Представление переходной характеристики в виде (1), (2) является достаточно общим и пригодно как для продольной, так и перпендикулярной магнитной записи. При продольной записи обычно принимают $\gamma_1 = 1$, тогда $\gamma_0 < 1$. При перпендикулярной записи путем сдвига фаз сигнала воспроизведения на 90° с помощью дифференциатора или преобразователя Гильберта можно привести переходную характеристику к виду, аналогичному переходной характеристике для продольной записи [5]. Ниже рассматривается именно этот случай.

1.2. Модель шума

В качестве источников шума в канале ЦМЗ обычно рассматривают межсимвольную интерференцию, коррелированный с полезным сигналом шум носителя, шум электронных схем воспроизведения, шум стертого постоянным полем носителя, шум нелинейности передаточной функции системы «магнитная головка – носитель записи», шум временной синхронизации и перекрестную помеху с соседних дорожек [6].

При построении модели переходной характеристики тракта ЦМЗ часть источников шума может не рассматриваться. Так, некоторые источники не участвуют в ее формировании, например шум временной синхронизации, другие являются следствием свойств переходной характеристики, в частности межсимвольная интерференция. Нелинейность передаточной функции обычно устраняется путем выбора соответствующего режима смещения магниторезистивной головки воспроизведения при ее проектировании [7].

При моделировании переходной характеристики тракта ЦМЗ будем учитывать аддитивный шум электронных схем воспроизведения, шум стертого постоянным полем носителя записи и коррелированный с сигналом шум носителя записи. Первые две составляющие принято объединять и рассматривать в виде аддитивного белого шума с нормальным распределени-

ем [8, 9]. Последняя составляющая шума приводит к случайному сдвигу временного положения переходной характеристики и случайному изменению ее длительности и также может рассматриваться как нормально распределенный шум [9, 10]. Обе составляющие шума обычно рассматриваются как статистически независимые [11, 12], имеют нулевое среднее значение и дисперсии σ_a^2 и σ_m^2 соответственно.

1.3. Модель тракта ЦМЗ

Проведенное выше рассмотрение с учетом наличия фильтра на выходе тракта ЦМЗ позволяет записать выходной сигнал $y(t)$ тракта ЦМЗ в виде следующего выражения [6, 12]:

$$y(t) = \left[\sum_i a_k h_0(t + j_k - iT, w + w_k) + n(t) \right] * F(t), \quad (4)$$

где $n(t)$ – аддитивный шум с нормальным распределением;

j_k, w_k – случайные составляющие временного положения (фазовое дрожание) и длительности переходной характеристики соответственно;

w – детерминированная составляющая длительности переходной характеристики;

$F(t)$ – импульсная характеристика фильтра;

$*$ – операция свертки;

$a_k = (b_k - b_{k-1}) / 2$ – последовательность перепадов записываемого на носитель сигнала. Здесь $b_k \in \{\pm 1\}$ обозначают записываемые на носитель биты данных.

Случайные изменения длительности переходной характеристики приводят к коррелированным изменениям ее амплитуды с сохранением площади под ней [6], т. е. весовые множители α_1, α_2 в выражениях (2), (3) также должны рассматриваться как случайные величины.

2. Идентификация переходной характеристики

2.1. Алгоритм идентификации

На соответствующих этапах проектирования тракта ЦМЗ его переходная характеристика может рассматриваться как детерминированная функция с последующим определением при необходимости случайных составляющих. Так, при использовании в канале ЦМЗ адаптивных корректоров амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) необходимо определение границ регулирования АЧХ для компенсации случайных составляющих. При выборе степени детальности описания переходной характеристики следует учитывать относительное влияние на нее отдельных факторов, которое выявляется в процессе исследовательских испытаний этой системы. По существу, необходима идентификация переходной характеристики тракта ЦМЗ в процессе проведения предпроектных исследовательских испытаний тракта создаваемой аппаратуры ЦМЗ.

Идентификация переходной характеристики может быть выполнена следующей последовательностью шагов.

Шаг 1. Выполняется воспроизведение предварительно записанных периодических последовательностей переходов потока намагниченности с интервалом, значительно превышающим тактовый интервал T , для исключения наложения смежных откликов. В процессе воспроизведения с использованием цифрового запоминающего осциллографа, на вход которого подается сигнал (4), формируется ансамбль реализаций одиночного сигнала воспроизведения в форме матриц-столбцов отсчетов значений Y_n размерностью $N \times 1$ для каждого одиночного сигнала воспроизведения.

Шаг 2. Для каждой реализации выполняются вычисления четной Y_{en} и нечетной Y_{on} составляющих матрицы-столбца Y_n относительно максимального значения $Y_{n \max}$.

Шаг 3. Для каждой реализации выполняется аппроксимация по методу МСКО четной составляющей Y_{en} функцией (2).

Шаг 4. Для каждой реализации выполняется проверка получения МСКО для четной составляющей Y_{en} путем варьирования начала отсчета времени аппроксимирующей функции (2) и повторного выполнения шага 3. Определяются параметры $\alpha_1, \alpha_2, a, b, V, T_{50}$ функции (2) для начала отсчета, обеспечивающего получение МСКО.

Шаг 5. Выполняются вычисления преобразований Гильберта полученных на шаге 4 четных составляющих для аппроксимации Y_{on} по методу МСКО и вычисления значений γ_0 .

Шаг 6. При необходимости выполняются вычисления средних по ансамблю значений параметров функций (1) и (2).

Шаг 7. При необходимости выполняются вычисления характеристик случайных составляющих параметров функций (1), (2).

Данный алгоритм не позволяет определять фазовое дрожание j_k переходной характеристики. Для определения этого параметра необходимо обеспечить формирование ансамбля реализаций сигналов воспроизведения, включающих их последовательность, с фиксацией физического начала каждой реализации и относительного положения пикового значения каждого сигнала воспроизведения [13].

Далее рассмотрим выполнение шагов 3–5 алгоритма как наименее изученных применительно к выбранному классу моделей переходной характеристики.

2.2. Аппроксимация четной составляющей переходной характеристики

Задача аппроксимации четной составляющей сигнала воспроизведения Y_{en} функцией (2) относится к сепарабельным нелинейным задачам метода наименьших квадратов [14], причем нелинейными являются параметры b^2 и T_{50} , определяющие временной масштаб функций-слагаемых в выражении (2).

Пусть P – матрица-столбец отсчетов функций-слагаемых в выражении (2) размерностью $N \times 2$. Тогда можно попытаться найти нелинейные параметры b^2 и T_{50} путем минимизации по ним среднеквадратического отклонения (СКО), задаваемого выражением [14]:

$$\text{СКО} = (Y_{en} - QY_{en})^T (Y_{en} - QY_{en}), \quad (5)$$

где $Q = P(P^T P)^{-1} P^T$ – матричная функция только от нелинейных параметров b^2 и T_{50} ;

$(\cdot)^T$ – знак транспонирования.

Весовые множители α_1, α_2 в выражениях (2), (3) находятся из решения уравнения [14]:

$$\alpha_{1,2} = (P^T P)^{-1} P^T Y_{en}. \quad (6)$$

На практике решение рассматриваемой задачи аппроксимации осложняется тем, что критерий (5) не является унимодальным для функции (2) при минимизации по указанным выше нелинейным параметрам (рис. 1).

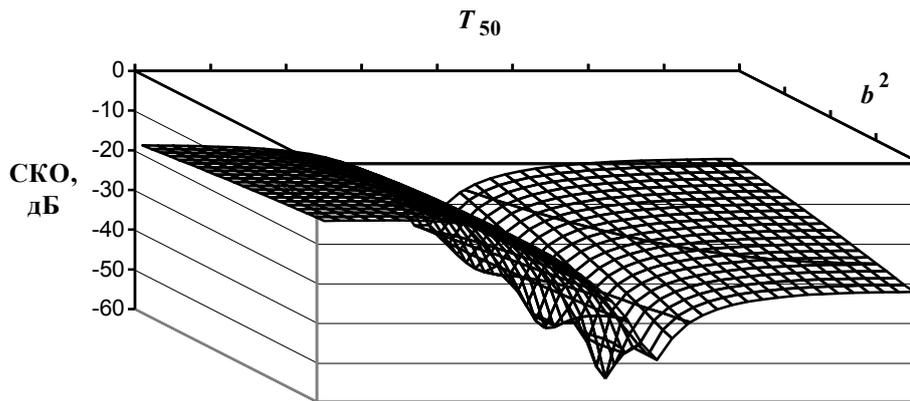


Рис. 1. Зависимость среднеквадратичной ошибки аппроксимации от параметров b^2 и T_{50}

2.3. Обеспечение унимодальности критерия МСКО

В технике ЦМЗ физические процессы формирования переходной характеристики системы «магнитная головка – носитель записи» определяют и длительность ее слагаемых, следовательно, параметры b^2 и T_{50} могут быть функционально связаны. В качестве условия такой связи выберем равенство амплитуд U_m знакопеременяющихся последовательностей сигналов (2) и каждого из слагаемых в выражении (2) для двух интервалов между смежными сигналами. В качестве таких интервалов естественно выбрать тактовый интервал T и кратное ему значение mT , где m – целое число. Введем параметр $R < 1$:

$$R = U_m(T) / U_m(mT). \quad (7)$$

При определенном выборе значения m параметр (7) трактуется как разрешающая способность системы «магнитная головка – носитель записи» и используется на практике для оценки и контроля свойств данной системы. Значение m обычно выбирают равным двум или трем в зависимости от используемого канального кода, для определенности далее рассмотрим случай $m = 3$.

Выразим через R параметры a, b, V, T_{50} функции (2). Для этого воспользуемся формулой суммирования Пуассона:

$$U_m(T) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-1)^n h(nT) = \frac{2}{T} \sum_{k=0}^{\infty} S \left[\frac{\pi(2k+1)}{T} \right], \quad (8)$$

где $S[\cdot]$ – спектр (3).

Поочередно полагая равными нулю весовые множители в выражениях (2), (3) и подставляя спектр (3) в выражение (8) и соответствующие ряды в выражение (7), после преобразований получим следующие соотношения:

$$T_{50} = \frac{3T}{\pi} \ln \left[\frac{3-R}{2R} + \sqrt{\left(\frac{3-R}{2R} \right)^2 - 1} \right] \approx \frac{3T}{\pi} \ln \left(\frac{3-R}{R} \right); \quad (9)$$

$$b^2 = \frac{4\pi^2}{9T^2 \ln \left[\frac{3A-R}{2R} + \sqrt{\left(\frac{3A-R}{2R}\right)^2 - B} \right]} \approx \frac{4\pi^2}{9T^2 \ln \left(\frac{3-R}{R} \right)}, \quad (10)$$

где

$$A = \exp \left(\frac{\pi^2}{2b^2 T^2} \right) \sum_{k=1}^L \exp \left[-\frac{\pi^2 (2k+1)^2}{2b^2 T^2} \right];$$

$$B = \exp \left(\frac{17\pi^2}{18b^2 T^2} \right) \sum_{k=2}^M \left[-\frac{\pi^2 (2k+1)^2}{18b^2 T^2} \right].$$

Выражение (10) позволяет найти b^2 методом итераций. Начальное значение для b^2 получается из выражения (10) при $A = 1, B = 0$.

Параметры a, V определим из условия нормировки, чтобы числитель выражения (7) равнялся единице соответственно при $\alpha_1=1, \alpha_2=0$, а также при $\alpha_1=0, \alpha_2=1$:

$$a = (T/2) \left[\sum_{k=0}^L \exp \left(\frac{\pi^2 (2k+1)^2}{2b^2 T^2} \right) \right]^{-1} \approx (T/2) \exp \left(\frac{\pi^2}{2b^2 T^2} \right), \quad (11)$$

$$V = T \operatorname{Sh} \left(\frac{\pi T 50}{2T} \right) \approx (T/2) \exp \left(\frac{\pi T 50}{2T} \right). \quad (12)$$

Выражения (10), (11) при $L, M \rightarrow \infty$ являются точными, однако на практике обычно бывает достаточно приближенных выражений, поскольку в современных трактах ЦМЗ разрешающая способность $R \leq 0,4$, что приводит к быстрому спаду спектра (3) в высокочастотной области. Приближенные выражения (9)–(12) получены при условии, что верхняя граничная частота фильтра $F(t)$ в выражении (4) не превышает $1,5/2T$. На практике это является весьма реалистичным предположением.

Ниже будет показано, что при минимизации критерия (5) по параметру R вместо входящих в выражение (2) нелинейных параметров b^2 и T_{50} обеспечивается унимодальность критерия МСКО.

2.4. Аппроксимация нечетной составляющей переходной характеристики

На шаге 5 алгоритма полученное выражение четной составляющей $h(t)$ переходной характеристики преобразуют посредством интегрального преобразования Гильберта и используют для аппроксимации по критерию МСКО нечетной составляющей переходной характеристики, т. е. отсчетов Y_{on} . Аппроксимация сводится к определению весового множителя γ_0 путем решения уравнения, по структуре аналогичного уравнению (6):

$$\gamma_0 = (G^T G)^{-1} G^T Y_{on},$$

где G – матрица-столбец отсчетов $\mathbb{H}[h(t)]$ размерностью $N \times 1$.

3. Проверка адекватности модели и обсуждение результатов

3.1. Модельный эксперимент

Для исследования структуры критерия (5) при его минимизации по параметру R и оценки погрешности определения параметров функции (2) был выполнен модельный эксперимент. Экспериментальные данные моделировались путем сложения равноотстоящих отсчетов функции (2) с отсчетами шума, имеющего нормальное распределение. Для выявления возможного изменения структуры критерия (5) при изменении уровня аддитивного шума в процессе моделирования изменялось отношение сигнал/шум. В качестве определения отношения сигнал/шум было выбрано выраженное в децибелах отношение среднеквадратического значения числителя выражения (7) к среднеквадратическому значению аддитивного шума σ_a . При сделанных предположениях в отношении параметра R , полосы пропускания фильтра $F(t)$ и нормировки выражений (11) и (12) числитель выражения (7) близок к синусоиде единичной амплитуды, поэтому его среднеквадратическое значение принималось равным $\sqrt{2}/2$. Критерий СКО (5) оценивался по отношению к сумме квадратов отсчетов четной составляющей переходной характеристики.

Примеры результатов моделирования в предположении отсутствия ошибки совмещения начал отсчета времени функции (2) и модельной переходной характеристики показаны на рис. 2, 3. Моделирование выполнялось для отношений сигнал/шум от 12 до 60 дБ и значений параметра R от 0,15 до 0,5. В процессе моделирования интервал дискретизации изменялся в пределах от 0,1 до 0,67 T . Аппроксимация четной составляющей модельной переходной характеристики выполнялась на одностороннем интервале для обеспечения сопоставимости результатов при аппроксимации экспериментальных данных, так как при разделении отсчетов на четную и нечетную составляющие каждый отсчет четной составляющей равен полусумме равноотстоящих отсчетов относительно максимального отсчета реализации $Y_{n \max}$.

Критерий (5) имел выраженный минимум и его структура для семейства функций (2) оставалась унимодальной при минимизации по параметру R (рис. 2). Относительная погрешность определения параметра R зависела от отношения сигнал/шум и при значениях более 30 дБ не превышала нескольких процентов. При отношениях сигнал/шум более 42 дБ имело место практически точное совпадение параметров модельной и аппроксимирующей характеристик. Погрешность определения нелинейных параметров T_{50} и b^2 была примерно в полтора раза меньше погрешности определения параметра R . Для показанной на рис. 3 модельной переходной характеристики интервал дискретизации равнялся 0,2 T , погрешность определения параметра R составила 13 %. Таким образом, результаты модельного эксперимента позволяют утверждать, что при минимизации критерия СКО по параметру R значения параметров аппроксимирующей переходной характеристики вида (2) стремятся к значениям параметров модельной переходной характеристики по мере увеличения отношения сигнал/шум, тогда как при уменьшении этого отношения ниже примерно 12 дБ имеет место отмеченное в работе [15] смещение значений параметров.

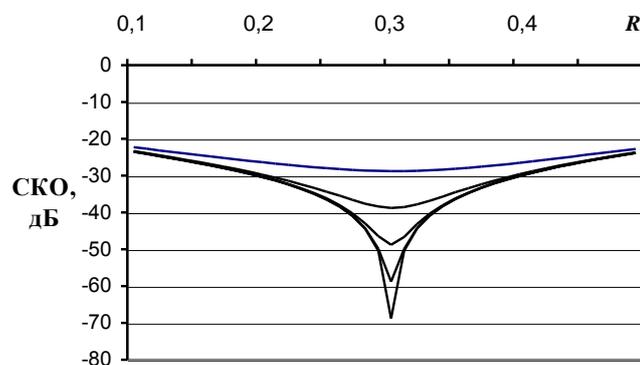


Рис. 2. Зависимость критерия СКО от параметра R для модельной переходной характеристики с $R = 0,3$ и отношением сигнал/шум от 20 дБ (верхняя кривая) до 60 дБ (нижняя кривая)

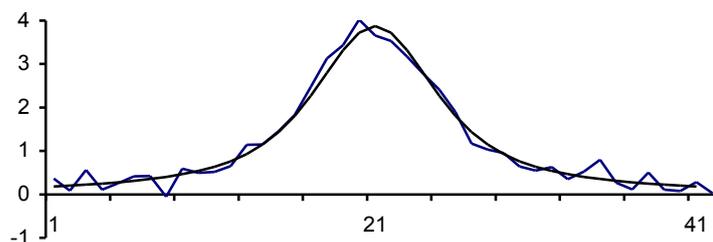


Рис. 3. Пример реализации модельной переходной характеристики и ее аппроксимация для $R = 0,3$ и отношения сигнал/шум 12 дБ

Ошибка совмещения начал отсчета времени функции (2) и модельной переходной характеристики приводит к дополнительной ошибке определения параметра R , при этом заметно увеличивается значение среднеквадратической ошибки аппроксимации. Варьирование начала отсчета аппроксимирующей функции позволяет значительно уменьшить ошибку аппроксимации при выполнении шага 4 алгоритма идентификации. Пределы варьирования зависят от интервала дискретизации, который при практическом использовании рассматриваемой методики может быть примерно на порядок меньше тактового интервала T [16, с. 332], который является характерной постоянной времени тракта ЦМЗ.

Использование в вычислительном эксперименте модели шума с нормальным распределением является обычной практикой для метода наименьших квадратов и оправдано применительно к учитываемым в модели тракта ЦМЗ источникам шума. В то же время необходимо отметить, что на практике при решении нелинейных сепарабельных задач метод наименьших квадратов применяется и к результатам измерений, распределения ошибок которых не являются нормальными [14].

3.2. Проверка адекватности модели

Полученные низкие значения погрешностей определения параметров модельной переходной характеристики еще не гарантируют адекватности модели и могут служить ориентирами при практическом использовании модели только в случае предварительного получения низких значений критерия СКО для экспериментально полученных переходных характеристик. Такие экспериментальные данные были получены в процессе исследования трактов ЦМЗ для проектировавшихся кассетных накопителей на магнитной ленте, предназначенных для эксплуатации в жестких климатических условиях.

Эксперименты выполнялись на макете накопителя, тракт ЦМЗ которого был рассчитан на физическую плотность записи 400 переходов потока на миллиметр. В макете тракта ЦМЗ использовался фильтр нижних частот третьего порядка с характеристикой Баттерворта и верхней граничной частотой $1,5/2 T$. Полученные значения разрешающей способности R составили 0,31 при величине СКО для четной составляющей переходной характеристики не хуже -36 дБ, что соответствует отношению сигнал/шум около 30 дБ. Такое же значение R было получено и экспериментально путем измерения размаха сигналов воспроизведения переходов потока намагниченности, записанных с интервалами T и $3 T$ в соответствии с выражением (7). Для аппроксимации нечетной составляющей переходной характеристики интегральное преобразование Гильберта вычислялось с использованием выражения (3) и значений параметров $\alpha_1, \alpha_2, a, b, V, T_{50}$, полученных при аппроксимации четной составляющей переходной характеристики. Полученный уровень нечетной составляющей переходной характеристики $\gamma_0 \approx 0,25$ при значении СКО ≈ -24 дБ.

В процессе экспериментов выполнялась также коррекция переходной характеристики тракта ЦМЗ при записи с дополнительным перепадом тока записи противоположного направления [2, с. 209] для уменьшения уровня нечетной составляющей. Коррекция позволила увели-

чить разрешающую способность тракта до 0,38, при этом уровень нечетной составляющей был уменьшен примерно в полтора раза. Величина СКО для четной составляющей незначительно улучшилась, тогда как величина СКО для нечетной составляющей ухудшилась до значения примерно –15 дБ. Последнее можно объяснить уменьшением энергии нечетной составляющей и более сложной структурой откликов тракта ЦМЗ от основного и корректирующего перепадов тока записи, чем предусмотрено в модели переходной характеристики (1). Однако ввиду незначительного относительного уровня нечетной составляющей увеличение погрешности аппроксимации не требует усложнения модели (1) для ее практического применения.

Эксперименты показали отсутствие необходимости выполнения шагов 6 и 7 алгоритма идентификации для исследованного макета тракта ЦМЗ, поскольку для различных реализаций переходной характеристики были получены близкие результаты, достаточные для выполнения последующих проектных работ.

Построение модели переходной характеристики тракта ЦМЗ потребовало решения типичного набора задач идентификации динамических систем [16]. Результаты идентификации переходных характеристик макетов различных вариантов трактов ЦМЗ по рассмотренной в работе методике позволяют утверждать, что разработанная модель адекватна исследованным трактам, методика обеспечивает определение параметров модели переходной характеристики с относительной погрешностью от нескольких единиц до долей процента в зависимости от отношения сигнал/шум. Это позволило использовать ее при проектировании трактов ЦМЗ каскадных накопителей на магнитной ленте, предназначенных для эксплуатации в жестких климатических условиях.

Заключение

Проектирование накопителей на подвижных магнитных носителях представляет собой сложный итерационный процесс. Каждая новая разработка в данной области техники связывается с технологическими достижениями, позволяющими внести заметные усовершенствования в подсистемы накопителя. К числу ключевых подсистем, определяющих основные характеристики подобных устройств, относится канал цифровой магнитной записи и наиболее тесно связанная с физикой магнитной записи его часть – тракт ЦМЗ от входа усилителя записи до выхода линейного усилителя сигналов воспроизведения. Независимо от того, является ли подвижный носитель магнитной лентой или диском, создание тракта ЦМЗ требует знания его переходной характеристики для выбора канального кода, проектирования корректоров АЧХ, решающих устройств, декодера и системы синхронизации. Предложенная в работе методика идентификации переходной характеристики на основе семейства функций (1), (2) и решения сепарабельной нелинейной задачи метода наименьших квадратов обеспечивает получение значений параметров характеристики с такой погрешностью, которая приемлема для целей проектирования современных устройств ЦМЗ.

Список литературы

1. Михайлов В.И. Метод аппроксимации характеристических импульсов // Проблемы записи и воспроизведения кодовых сигналов в накопителях с подвижным магнитным носителем: Труды МИРЭА. – 1972. – Вып. 65. – С. 81–92.
2. Коваленков Л.Л. Цифровая магнитная запись в информационно-измерительной технике. – М.: Машиностроение, 1989. – 264 с.
3. Быченков В.Ф. Аппроксимация одиночного сигнала воспроизведения взвешенной суммой сигналов // Вопросы радиоэлектроники. Серия ЭВТ. – 1991. – Вып. 15. – С. 88–93.
4. Минухин В.Б. О фазовых искажениях сигналов в аппаратуре магнитной записи // Радиотехника. – 1975. – Т. 30. – № 1. – С. 77–84.
5. Hilbert filter for double-layer perpendicular recording media / H. Muraoka, M. Hassner, Y. Sonobe et al. // IEEE Transactions on Magnetics. – 2002. – V. 38. – № 5. – P. 2337–2339.

6. Chen J., Moon J., Bazargan K. Reconfigurable readback-signal generator based on a field-programmable gate array // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2004. – V. 40. – № 3. – P. 1744–1750.
7. Xing X., Bertram H.N. Error rate analysis of partial response channels in the presence of texture noise // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 1999. – V. 35. – № 3. – P. 2070–2079.
8. Cideciyan R.D., Eleftheriou E., Mittelholzer T. Perpendicular and longitudinal recording: A signal-processing and coding perspective // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2002. – V. 38. – № 4. – P. 1698–1704.
9. Arnold D., Eleftheriou E. On the information-theoretic capacity of magnetic recording systems in the presence of medium noise // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2002. – V. 38. – № 5. – P. 2319–2321.
10. Experimental study of the off-track dependence of medium noise using a mode projection method / Z. Jin, K. Zhang, G.H. Lin et al. // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2000. – V. 36. – № 5. – P. 2154–2156.
11. Pozidis H. Decomposition of noise sources in recording applications using symbol-rate readback samples // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2004. – V. 40. – № 4. – P. 2320–2322.
12. Oenning T.R., Moon J. Modeling the Lorentzian magnetic recording channel with transition noise. – Department of Electrical and Computer Engineering, University of Minnesota, 2000. http://www-cdslab.ece.umn.edu/cdslab/research/tmag_01.pdf.
13. Jitter measurements in magnetic recording / V. Nandakumar, A. Companieh, A. Gallian et al. // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2004. – V. 40. – № 4. – P. 2314–2316.
14. Ван ден Бос А. Последние достижения в подгонке моделей по методу наименьших квадратов // *Подводная акустика и обработка сигналов: пер. с англ. / под ред. Л. Бьерне*. – М.: Мир, 1985. – С. 377–389.
15. Mahata K., Soderstrom T. Large sample properties of separable nonlinear least squares estimators // *IEEE Transactions on Signal Processing*. – 2004. – V. 52. – № 6. – P. 1650–1658.
16. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя: пер. с англ. / под ред. Я.З. Цыпкина. – М.: Наука, 1991. – 432 с.

Поступила 10.03.05

УП «НИИЭВМ»,
Минск, Богдановича, 155
e-mail: vlad2@niiev.m.by

V.F. Bachenkov

MODELING THE TRANSFER FUNCTION OF DIGITAL MAGNETIC RECORDING PATH

The transfer function model of digital magnetic recording path as a linear combination of Gauss curve and Lorentzian is discussed. Approximation of experimental transfer function is treated as separable nonlinear task of least squares method. The transformations of transfer function model parameters are suggested to provide the unimodal structure of approximation criterion. The structure of approximation criterion was investigated with computing experiment depending on SNR in the path. The results of experimental transfer function parameters identification are given.