

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МАГНИТНОЙ ЗАПИСИ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

А. А. Вереник

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, г. Минск, Беларусь, fpm.verenik@bsu.by
Научный руководитель — Е. С. Чеб, кандидат физико-математических наук, доцент*

В данной работе исследуется моделирование процессов магнитной записи в режиме реального времени, в частности воссоздание эффектов, характерных для магнитной ленты. Для описания нелинейного процесса магнитного гистерезиса используется модель Джайлса-Атертона, которая позволяет учесть физические параметры магнитного материала.

Ключевые слова: магнитный гистерезис; магнитная запись сигналов; модель Джайлса-Атертона.

ВВЕДЕНИЕ

Магнитная запись сигналов была изобретена в начале прошлого века. Первые магнитные ленты были представлены в 1930-х годах. Они получили большую популярность среди музыкантов и звукозаписывающих студий. Звук аналоговой записи в те времена описывается теплотой и насыщенностью. Однако, запись сигналов на такой носитель имела свои недостатки, а именно: искажения, порождаемые процессом магнитного гистерезиса, и шум. Тем не менее данные искажения определяли уникальный характер записей того времени. Некоторые музыканты использовали порожденные искажения в творческих целях.

В настоящее время, когда цифровые технологии в значительной степени вытеснили аналоговую запись на магнитную ленту, характерное звучание ленты по-прежнему востребовано многими музыкантами. В данной работе будет построена модель, позволяющая воссоздать характерные магнитной ленте эффекты в режиме реального времени.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИРУЕМОГО УСТРОЙСТВА

Магнитофоны — это сложные радиотехнические устройства, включающие в себя аппараты магнитной записи, которые используются для записи и воспроизведения сигналов информации. Самыми важными структурными компонентами являются магнитные головки. В большинстве случаев запись и воспроизведение не разделяют на две магнитные головки.

Моделирование таких головок является очень трудоемкой и сложной задачей [7]. Поэтому были разработаны модели, в которых делаются некоторые допущения. Именно такая модель будет рассмотрена далее.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В ходе изучения литературных источников было получено, что модель Карлквишта позволяет получить аппроксимацию напряженности магнитного поля головки при записи сигналов:

$$H_x(x, y) = \frac{1}{\pi} H_0 \left(\operatorname{arctg} \frac{(g/2) + x}{y} + \operatorname{arctg} \frac{(g/2) - x}{y} \right),$$
$$H_y(x, y) = \frac{1}{2\pi} H_0 \ln \frac{((g/2) - x)^2 + y^2}{((g/2) + x)^2 + y^2},$$

где H_0 - напряженность поля в зазоре, а g - ширина зазора.

Для вычисления напряженности поля в зазоре предлагается следующая формула:

$$H_0 = \frac{NEI}{g},$$

где N - число витков обмотки, $E \approx 0.1$ - эффективность головки, а I - сила тока.

В данном случае делается допущение на идеальность головки. А именно, что полюсные наконечники имеют прямоугольную форму.

В процессе записи изменения сигналов по времени преобразуются в соответствующие изменения остаточной намагниченности. Данный процесс является нелинейным и неоднозначно зависит от начальных значений намагниченности и воздействующего поля.

Воспользуемся моделью Джайлса-Атертона [11]. Главным ее преимуществом является то, что данная модель позволяет осуществить связь с физическими параметрами магнитного материала. Следующее дифференциальное уравнение описывает намагниченность в некотором направлении как функцию, зависящую от напряженности магнитного поля в этом же направлении:

$$\frac{dM}{dH} = \frac{(1-c)\delta_M(M_{an} - M)}{(1-c)\delta_s k - \alpha(M_{an} - M)} + c \frac{dM_{an}}{dH}.$$

M_{an} определяет анизотропную намагниченность и может быть вычислена по следующей формуле:

$$M_{an} = M_s L\left(\frac{H + \alpha M}{a}\right),$$

где L - функция Ланжевена.

Перейдем к процессу воспроизведения. Малый уровень остаточного потока носителя при воспроизведении сигналаграммы позволяет считать процесс воспроизведения почти линейным. Следующая формула описывает выходное напряжение магнитной головки:

$$V(x) = NWEv\mu_0 \int_{-\infty}^{\infty} dx' \int_{-\delta/2}^{\delta/2} dy' h(x' + x, y') \cdot \frac{\dot{M}(x', y')}{dx},$$

где W - ширина головки, V - скорость ленты, δ - толщина ленты, а μ_0 - магнитная проницаемость вакуума.

Среди возможных потерь выделим следующие: обратимое саморазмагничивание, щелевые и частотные. Они являются самыми заметными. Объединим их и получим:

$$V(t) = V_0(t)[e^{-k\delta}] \left[\frac{1 - e^{-k\delta}}{k\delta} \right] \left[\frac{\sin(kg/2)}{kg/2} \right].$$

ДИСКРЕТНАЯ МОДЕЛЬ

Для реализации построенной модели в виде компьютерной программы необходимо провести дискретизацию. Так как вычисления будут происходить в режиме реального времени, то появляются дополнительные требования на трудоемкость процесса.

Для простоты моделирования процессов записи допустим, что $\dot{H}(x, y, t) = H(0, 0, t)$.

Тогда напряженность магнитного поля примет вид

$$\hat{H}(n) = \frac{NE\hat{I}(n)}{g}.$$

Путем математических преобразований получено следующее уравнение, которое описывает зависимость намагниченности магнитного поля от времени:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{\frac{(1-c)\delta_M(M_s L(Q) - M)}{(1-c)\delta_s k - \alpha(M_s L(Q) - M)} \dot{H} + c \frac{M_s}{a} \dot{H} L'(Q)}{1 - c\alpha \frac{M_s}{a} L'(Q)}.$$

Выражение выше является обыкновенным дифференциальным уравнением. В работе [15] было показано, что явный метод Рунге-Кутты 4-го порядка является одним из лучших для модели Джайлса-Атертона.

Вычисление функции Ланжевена является трудоемкой задачей для режима реального времени. Целесообразно оказывается аппроксимировать $\text{ctg}(x)$ с помощью цепных дробей Гаусса.

Используя сведения выше, для процесса воспроизведения получена следующая формула:

$$\hat{V}(n) = NWE\nu\mu_0g\hat{M}(n).$$

Эффекты потери оказываются удобным моделировать с помощью КИХ-фильтра. Однако, отметим, что данные эффекты зависят от скорости магнитной ленты. Следовательно, при изменении скорости необходим пересчет всех весов фильтра.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Реализованное приложение предоставило возможность интерактивного управления параметрами модели, что позволило исследовать влияние различных факторов на процесс магнитного гистерезиса.

При подаче на вход сигнала, состоящего из тишины, на выходе наблюдался шум, напоминающий характерный шум магнитной ленты. Это наблюдение служит косвенным подтверждением корректности построенной модели, поскольку оно согласуется с ожидаемым поведением магнитных материалов в отсутствие внешнего сигнала.

При подаче на вход музыкальной аудиозаписи на выходе воспроизводилась та же запись, но с наложением характерного для кассет шума и незначительным частотным насыщением. Эти эффекты также соответствуют ожидаемому поведению магнитных материалов при записи и воспроизведении звука.

Сравним результаты с продуктом Таре [6]. Таре предоставляет контроль над следующими параметрами: скорость ленты, вид эффекта, входное/выходное усиление, срез высоких частот и др. При тщательной настройке доступных параметров нам удалось добиться похожих результатов, что косвенно свидетельствует о корректности построенной модели. Однако, следует отметить преимущества и недостатки коммерческого продукта. Таре имеет несколько режимов работы, которые существенно отличаются между собой. Наша же программа-дополнение имеет один режим работы. Но, ввиду закрытого исходного кода, нельзя сделать вывод о физической корректности используемого ими алгоритма. Следует отметить, что наша программа-дополнение предоставляет более гибкую настройку параметров, чего нет в продукте Таре.

Библиографические ссылки

1. Вичес А.И. Моделирование канала магнитной записи на ЭВМ / А.И. Вичес. – Москва: Радио и связь, 1984.
2. Умняшкин, С.В. Основы теории цифровой обработки сигналов / С.В. Умняшкин. – Москва: Техносфера, 2018. – 527 с.
3. Хайпер Э., Нёрсетт С., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Нежесткие задачи / Хайпер Э. Нёрсетт С. Ваннер Г. – Springer, 1987.
4. JUCE [Электронный ресурс]. URL: <https://juce.com/learn/documentation>. (дата обращения 10.05.2024).
5. SPAN [Электронный ресурс]. URL: <https://www.voxengo.com/product/span> (дата обращения 10.05.2024).
6. Tape [Электронный ресурс]. URL: <https://www.softube.com/tape> (дата обращения 10.05.2024).
7. Bertram H.Neal. Theory of magnetic recording / H.Neal. Bertram. – Australia: Cambridge University Press, 1994.
8. Brezinski, C. Continued fractions and Pade approximants / C. Brezinski. – North-Holland, 1990.
9. G. Germain F. Design principles for lumped model discretisation using mobius " Transforms / F. G. Germain, K.J. Werner // Proceedings of the 18th International Conference on Digital Audio Effects. 2015.
10. Holters M. Circuit simulation with inductors and transformers based on the Jiles-Atherton model of magnetization / M. Holters, U. Zolzer // Proceedings of the 19th International Conference on Digital Audio Effects. 2016.
11. Jiles D.C. Theory of ferromagnetic hysteresis / D.C. Jiles, D.L. Atherton // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 1984. Vol. 55, № 6. P. 2115-2120. 46
12. Jile, D.C. Numerical Determination of Hysteresis Parameters the Modeling of Magnetic Properties Using the Theory of Ferromagnetic Hysteresis / D.C. Jiles, J.B. Thoeke, M.K. Devine // IEEE Transactions on Magnetics. 1992. Vol. 28, № 1. P. 27-35.
13. Jiles D.C. Introduction to Magnetism and Magnetic Materials / D.C. Jiles. – CRC Press, 2015.
14. Mayergoyz I.D. Mathematical Models of Hysteresis and their Applications: Second Edition (Electromagnetism) / I.D. Mayergoyz. 2003.
15. Szewczyk R. Computational Problems Connected with Jiles-Atherton Model of Magnetic Hysteresis / R. Szewczyk // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2014. Vol. 267. P. 275-283.
16. William B. Jones. Continued Fractions: Analytic Theory and Applications (Encyclopedia of Mathematics and its Applications (No. 11)) : Encyclopedia of Mathematics and its Applications (No. 11) / William B. Jones, W. J. Thron. – Cambridge University Press, 2009.