

Сивоконь Д. Н. (DiMoon Electronics)

Теоретическое описание и исследование системы ЭМОС с обратной связью по ускорению

27.08.2021 (rev. 1)

Введение

ЭМОС (электромеханическая обратная связь) – один из технических приемов улучшить характеристики акустической системы, основанный на введении обратной связи по одному из физических параметров подвижной системы динамической головки. По факту, данный прием является внедрением ПИД-регулятора в акустическую систему.

Обратная связь может быть реализована по перемещению, скорости, либо ускорению диффузора динамика. В данной статье основное внимание будет уделено обратной связи по ускорению. Для введения такой обратной связи динамическая головка должна быть подвергнута модернизации, а именно установки датчика ускорения на звуковую катушку, подобно тому, как это описано в [1-3]. Такое расположение датчика связано с тем, что точку изменения ускорения необходимо разместить как можно ближе к моторной части динамической головки для уменьшения влияния запаздывания распространения сигнала по материалу диффузора и уменьшению сдвига фазы между ускорением звуковой катушки и измеренным сигналом ускорения $a(t)$.

Уравнение движения диффузора

В первом приближении представим динамическую головку как пружинный маятник, уравнение движения которого имеет следующий вид:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + 2\beta m \frac{dx}{dt} + kx = F_{imp} \quad (1)$$

Зная, что первая производная координаты по времени есть скорость, а вторая – ускорение, перепишем данное уравнение в таком виде:

$$F_{imp} = ma + 2\beta mv + kx \quad (2)$$

где:

m – масса подвижной системы динамика

β – коэффициент затухания собственных колебаний диффузора

k – жесткость подвеса диффузора

F_{imp} – сила, которую прикладывает звуковая катушка к диффузору, при протекании через нее электрического тока

Выражение (2) не учитывает такие параметры системы, как акустическое оформление, паразитные резонансы, зависимости β , k от величины отклонения x , электрическое демпфирование звукового усилителя, и т. д., однако, для начальных этапов исследования ЭМОС этого достаточно.

Обратная связь

Звуковое давление (SPL) создает ускоренное движение диффузора динамика, поэтому, логично выбрать обратную связь именно по ускорению, как это и сделано в [1-3], однако, это совсем не обязательно, так как перемещение, скорость и ускорение являются зависимыми величинами, и обратную связь можно реализовать по любой из перечисленных величин.

Дальнейшие математические выкладки будут повторять работу [6], с тем отличием, что в нашем случае обратная связь будет выполнена по ускорению, а не по скорости.

Ошибка регулирования будет описываться следующим выражением:

$$e(t) = A(t) - a(t) \quad (3)$$

$A(t)$ – заданный закон изменения ускорения (звуковой сигнал)

$a(t)$ – фактический закон изменения ускорения (сигнал с датчика ускорения)

и ПИД-регулятор будет иметь следующий вид:

$$u(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de}{dt} \quad (4)$$

Воспользовавшись выражением (2) и (4) «подключим» наш ПИД-регулятор к динамической головке таким образом:

$$F_{imp} = u$$

и в результате:

$$ma + 2\beta mv + kx = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de}{dt} \quad (5)$$

В итоге мы получаем дифференциальное уравнение, которое описывает поведение динамической головки при использовании ЭМОС по ускорению. Дальнейшим этапом работы будет исследование системы (5) на предмет влияния каждой из компонент ПИД-регулятора на работу системы ЭМОС.

Пропорциональная компонента

Перепишем выражение (5), оставив в правой части только Р-компоненту, и воспользуемся выражением (3):

$$ma + 2\beta mv + kx = K_p e(t) = K_p (A(t) - a(t))$$

Раскрыв скобки и приведя подобные получаем следующее:

$$(m + K_p)a + 2\beta mv + kx = K_p A(t) \quad (6)$$

Обратим внимание на $(m + K_p)$. При отрицательной обратной связи по ускорению наличие пропорциональной компоненты увеличивает эффективную массу подвижной части динамической головки, что влечет за собой уменьшение резонансной частоты динамика. В принципе, подобный эффект можно как-то использовать при конструировании акустики, но в нашем случае это не несет никакого полезного эффекта.

Дифференциальная компонента

Прделаем все вышеописанные операции для дифференциальной компоненты ПИД-регулятора:

$$ma + 2\beta mv + kx = K_d \frac{de}{dt} = K_d \frac{d(A(t) - a(t))}{dt} = K_d(j(t) - j(t)) \quad (7)$$

В данном случае в ходе дифференцирования ускорения по времени мы получаем такую интересную вещь, как функцию рывка [7]. Лично я не могу дать физическое обоснование данной функции, в первой итерации изучения системы ЭМОС я опущу дифференциальную компоненту без какого-либо обоснования.

Интегральная компонента

По аналогии рассмотрим интегральную компоненту ПИД-регулятора:

$$\begin{aligned} ma + 2\beta mv + kx &= K_i \int_0^t e(\tau) d\tau = K_i \int_0^t (A(\tau) - a(\tau)) d\tau = \\ &= K_i \int_0^t A(\tau) d\tau - K_i \int_0^t a(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (8)$$

С интегралами будет посложнее. Для начала рассмотрим первый интеграл отдельно:

$$K_i \int_0^t A(\tau) d\tau = K_i[V(t) - V(0) + C_1]$$

A – в нашем случае это сигнал с выхода звуковой карты, который описывает форму изменения ускорения диффузора динамика. При операции интегрирования мы получаем функцию изменения скорости. В результате этого мы получаем две константы: первая это константа интегрирования C_1 , а другая это значение скорости в начальный момент времени $V(0)$. С этими константами мы разберемся позже.

Аналогичным способом высчитываем второй интеграл:

$$K_i \int_0^t a(\tau) d\tau = K_i[v(t) - v(0) + C_2]$$

Подставляем полученные значения в уравнение (8):

$$\begin{aligned} ma + 2\beta mv + kx &= K_i[(V(t) - V(0) + C_1) - (v(t) - v(0) + C_2)] = \\ &= K_i[V(t) - V(0) - v(t) + v(0) + C] = \\ &= -K_iv(t) + K_i[V(t) - V(0) + v(0) + C] \end{aligned} \quad (9)$$

Раскрываем скобки и приводим подобные:

$$ma + (2\beta m + K_i)v + kx = K_i[V(t) - V(0) + v(0) + C] \quad (10)$$

Давайте разберемся, что мы получили в итоге. Коэффициент K_i дает добавку к $2\beta m$, что по факту является увеличением коэффициента затухания собственных колебаний подвижной системы динамика. Следовательно, наличие интегральной составляющей увеличивает коэффициент демпфирования динамической головки. Для того, чтобы двигаться дальше, давайте разберемся с $V(0)$, $v(0)$ и C .

$V(0)$ – значение заданного закона изменения скорости (интеграл от звукового сигнала) в начальный момент времени, $v(0)$ – скорость диффузора в начальный момент времени. Интегратор, который лежит в основе интегральной части ПИД-регулятора, имеет свойство «запоминать» всю свою предысторию (так как у нас диапазон интегрирования от 0 до t). Нам это не нужно, так как эти значения будут создавать постоянную составляющую на звуковой катушке динамика. Поэтому, в аппаратной реализации нам надо будет принять меры, которые будут нейтрализовать накопление постоянной составляющей в интеграторе. Таким образом, в выражении (10) мы можем $V(0)$, $v(0)$ и C приравнять к нулю. В результате получаем выражение для ЭМОС с интегральным звеном в окончательном виде:

$$ma + (2\beta m + K_i)v + kx = K_iV(t) \quad (11)$$

Давайте рассмотрим, как будет вести себя И-регулятор в случае, если диффузор точно повторяет заданный звуковой сигнал:

$$a(t) \equiv A(t)$$

В этом случае сигнал ошибки (3) будет обращаться в ноль ($e(t) = 0$), и выражение (8) будет иметь вид:

$$ma + 2\beta mv + kx = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau = 0$$

Таким образом, судя по нулевому значению в правой части выражения и отсутствию какой-либо добавки к коэффициенту затухания $2\beta m$, приходим к выводу, что если закон изменения ускорения диффузора точно повторяет звуковой сигнал, то И-регулятор не будет оказывать какого-либо влияния на звуковую катушку динамика.

Выводы

В результате вышестоящих умозаключений приходим к выводу, что в системе ЭМОС с обратной связью по ускорению оптимальным решением будет применение интегральной компоненты ПИД-

регулятора, так как наличие этой компоненты увеличивает коэффициент затухания собственных колебаний подвижной системы динамика, тем самым уменьшает величину паразитных резонансов акустической системы в целом. Причем величина демпфирования динамика является динамической по величине, и чем больше мгновенное значение невязки (3), тем выше значение коэффициента демпфирования.

Вывод о необходимости применения интегратора полностью совпадает с мнением автора цикла статей про ЭМОС [1-3], причем один и тот же результат получен разными методами анализа системы ЭМОС.

Обратная связь по координате

В [8, 9] представлен пример НЧ колонки с положительной обратной связью по давлению внутри закрытого ящика. Как показано в [9], при данной обратной связи эффективная жесткость подвеса динамической головки уменьшается. Давайте попробуем построить математическую модель данной системы управления, выполним ее анализ, и сверим полученный результат с поведением системы, представленным в [8, 9].

В первом приближении примем давление внутри закрытого ящика как линейную функцию перемещения диффузора динамика. Это будет справедливо с достаточной точностью для низкочастотного диапазона звуковых колебаний. В этом случае ошибка регулирования будет иметь следующий вид:

$$e(t) = X(t) + x(t) \quad (12)$$

где:

$X(t)$ – звуковой сигнал

$x(t)$ – перемещение диффузора динамика

По аналогии с выражением (5), запишем уравнение движения диффузора динамической головки с положительной обратной связью, описанной формулой (12):

$$ma + 2\beta mv + kx = K_p e(t) = K_p (X(t) + x(t))$$

Раскроем скобки и приведем подобные:

$$ma + 2\beta mv + (k - K_p)x = K_p X(t) \quad (13)$$

В результате, согласно (13) получаем, что наличие подобной обратной связи приводит к уменьшению эффективного коэффициента жесткости подвеса подвижной системы динамика, что и было продемонстрировано в материале [9]. Этот результат является косвенным доказательством правильности подхода к описанию поведения системы ЭМОС и верным выводам, полученным в конце данной статьи. Однако, для продолжения исследований в данном направлении требуется аппаратная реализация описанной системы ЭМОС и последующее ее изучение.

Литература

1. ЭМОС: коротко обо всем [Электронный ресурс] // Мухамедзянов Н. (aka Nota Bene). [2012] URL: http://reanimator-h.narod.ru/faq_emos.htm
2. Вниз по лестнице, ведущей вверх... или ЭМОС в низкочастотном звене АС. [Электронный ресурс] // Мухамедзянов Н. (aka Nota Bene). URL: <http://reanimator-h.narod.ru/emos.html>
3. ЭМОС в сабвуфере - generation next [Электронный ресурс] // Мухамедзянов Н. (aka Nota Bene). [2009-2010] URL: http://reanimator-h.narod.ru/emos_gn.htm
4. ПИД-регулятор [Электронный ресурс] // Википедия. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%98%D0%94-%D1%80%D0%B5%D0%B3%D1%83%D0%BB%D1%8F%D1%82%D0%BE%D1%80>
5. Оптимизация электронной схемы модулятора Мессбауэровского спектрометра // Петин Г. П.
6. Новая система доплеровской модуляции мессбауэровского спектрометра [Выпускная квалификационная работа] // Сивоконь Д. Н. [2017] URL: http://dimoon.ru/wp-content/uploads/2021/08/diplom_final.pdf
7. Рывок (кинематика) [Электронный ресурс] // Википедия. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D1%8B%D0%B2%D0%BE%D0%BA_\(%D0%BA%D0%B8%D0%BD%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D1%8B%D0%B2%D0%BE%D0%BA_(%D0%BA%D0%B8%D0%BD%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0))
8. Feedbass! (microphone in loudspeaker) [Электронный ресурс] // DeepSOIC (Victor Titov) [2018] URL: <https://hackaday.io/project/68980-feedbass-microphone-in-loudspeaker>
9. Как настраивать ЭМОС типа feedbass [Видеоролик] // DeepSOIC (Victor Titov) [2018] URL: <https://youtu.be/bgoJ-FIFCl4>