

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



СЗ42 В

К-523

4935 / 2-76

Н.Г.Клюкин, С.И.Орманджиев

13/11-76

13 - 10082

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ПРИВОДОВ МЕССБАУЭРОВСКИХ СПЕКТРОМЕТРОВ

1976

13 - 10082

Н.Г.Клюкин, С.И.Орманджиев

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ПРИВОДОВ МЕССБАУЭРОВСКИХ СПЕКТРОМЕТРОВ



Широкое применение в физике и технике эффекта Мессбауэра привело к разработке большого количества установок, содержащих (кроме стандартного гамма-спектрометра и регистрирующего устройства) специфическую для спектрометров этого типа систему, обеспечивающую движение радиоактивного источника (или поглотителя) как с постоянной, так и с переменной скоростью^{/1-3/}. При этом наибольшее распространение получили системы с электромеханическими вибраторами и электронными усилителями, охваченными цепями глубокой отрицательной обратной связи по скорости^{/1-22/}. В настоящей работе проводится анализ основных характеристик этих систем, дается оценка известных методов частотной коррекции, а также предлагается новая модификация привода, имеющая определенные преимущества перед существующими.

Как видно из рис. 1, на котором показана принципиальная схема спектрометра, его система движения (привод) содержит два контура обратной связи: первый стабилизирует скорость движения, второй - положение подвижной части вибратора. Электромеханический вибратор представляет собой две катушки - двигательную и датчиковую, связанные общей жесткой осью (например трубой) и колеблющиеся в магнитном поле постоянного магнита. Минимальная длина трубы, соединяющей катушки, определяется размерами магнита или условиями допустимой паразитной связи между катушками. Осевое направление движения всей подвижной части задается пружинами.

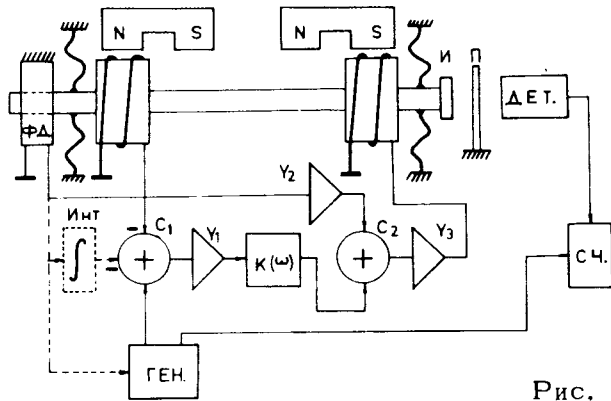


Рис. 1.

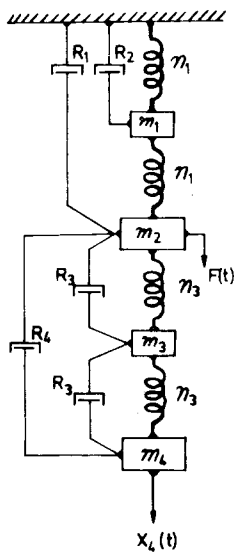


Рис. 2.

$B^{/4/}$ пружины заменены системой из направляющих, по которым "катается" соединяющая труба с катушками. $B^{/4-7/}$ датчиковая и двигательная катушки находятся в общем магнитопроводе, что приводит к паразитной связи между ними.

Для вывода общего уравнения движения механической системы вибратора воспользуемся понятием "действующая постоянная механической цепи" ^{/23/} и будем рассматривать эту систему как сосредоточенную, т.е. две пружины заменим одной, с удвоенными массой m_1 , жесткостью n_1 и сопротивлением потерь R_1 . Схема, эквивалентная схеме выбранной нами модели ненагруженного вибратора, показана на рис. 2.

Выражение для силы $F(t)$, создаваемой в двигательной катушке, имеет вид

$$F(t) = \Psi_g \cdot I(t) \text{ [Н]},$$

где Ψ_g - коэффициент, отражающий конструктивные параметры узла движения; $I(t)$ - ток через катушку. Сила $F(t)$, в принципе, может быть увеличена за счет увеличения диаметра катушки, однако здесь имеется ограничение, связанное с одновременным увеличением сопротивления и массы катушки, а также диаметра используемого магнита.

Напряжение $U_c(t)$ на выходе датчика скорости определяется выражением

$$U_c(t) = \Psi_c \cdot V_x \text{ [В]},$$

где Ψ_c - коэффициент, отражающий конструктивные параметры датчика скорости; V_x - скорость перемещения подвижной части вибратора.

При использовании в схеме привода оконечного каскада с токовым выходом и коэффициентом усиления $I_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}} = K_{i0} \text{ [Ом}^{-1}\text{]}$, передаточная функция системы на рис. 2, с учетом датчика скорости, имеет вид

$$K_{i1} = \frac{p \cdot X(p)}{I(p)} = \frac{p \cdot K_{i0} \cdot \Psi_g \cdot \Psi_c \cdot D_{a4}(p)}{D_a(p)}, \quad (1)$$

где

$$D_{a4}(p) = a_{11}(a_{23}^2 - a_{24} \cdot a_{33}), \quad (2)$$

$$D_a(p) = a_{11}(a_{22}a_{33}a_{44} + 2a_{23}^2a_{24} - a_{22}a_{23}^2 - a_{23}^2a_{44} - a_{24}^2a_{33}) - a_{12}^2(a_{33}a_{44} - a_{23}^2),$$

$$a_{11} = m_1 p^2 + R_1 p + 2n_1,$$

$$a_{22} = m_2 p^2 + (R_2 + R_3 + R_4)p + n_1 + n_3,$$

$$a_{33} = m_3 p^2 + 2R_3 p + 2n_3,$$

$$a_{44} = m_4 p^2 + (R_3 + R_4)p + n_3,$$

$$a_{12} = -n_1,$$

$$a_{23} = -(R_3 p + n_3),$$

$$a_{24} = -R_4 \cdot p,$$

m - масса [кг], R - сопротивление потерь [кг/с],
 n - жесткость [Н/м].

В случае применения оконечного каскада с низкоомным выходом передаточная функция разомкнутой системы имеет вид

$$K_{U1} = p \cdot \frac{X(p)}{U_{BX}(p)} = p \cdot \frac{I(p)}{U_{BX}(p)} \cdot K_{i0} \cdot \Psi_g \cdot \Psi_c \cdot \frac{D_{a4}(p)}{D_a(p)}. \quad (4)$$

Ток через катушку выражается формулой

$$I(p) = \frac{U_{BX}(p) - e_g(p)}{Z_0} = U_{BX}(p) \frac{D_a(p)}{Z_a \cdot D_a(p) + \Psi_1^2 \cdot p \cdot D_{a2}(p)}. \quad (5)$$

Здесь Z_0 - полное (активное и реактивное) сопротивление застопоренной катушки датчика, равное $R_0 + p \cdot L_0 \approx R_0$;

$$e_g(p) = -\Psi_g \cdot p \cdot y(p) = -p \cdot \Psi_g^2 \cdot I(p) \cdot \frac{D_{a2}(p)}{D_a(p)}.$$

После подстановки (5) в (4), если для коэффициента по напряжению положим $K_{U0} = K_{i0} \cdot R_0$, получим

$$K_{U1} = K_{U0} \cdot p \cdot \Psi_g \cdot \Psi_c \cdot \frac{D_{a4}(p)}{R_0 [R_0 \cdot D_a(p) + \Psi_g^2 \cdot p \cdot D_{a2}(p)]}, \quad (6)$$

где

$$D_{a2}(p) = a_{11}(a_{33} \cdot a_{44} - a_{23}^2). \quad (7)$$

Нормированные амплитудно-частотные характеристики систем (1) и (6) с электромеханическими вибраторами, имеющими параметры, подобные приведенным в [8], показаны на рис. 3. Сосредоточенные элементы имеют значения $m_1 = 5 \cdot 10^{-3}$; $m_2 = m_4 = 45 \cdot 10^{-3}$; $m_3 = 10 \cdot 10^{-3}$; $n_1 = 3800$; $n_3 = 1,5 \cdot 10^7$; $R_1 = 15 \cdot 10^{-3}$; $R_2 = 2,2$; $R_3 = 1$; $R_4 = 75$.

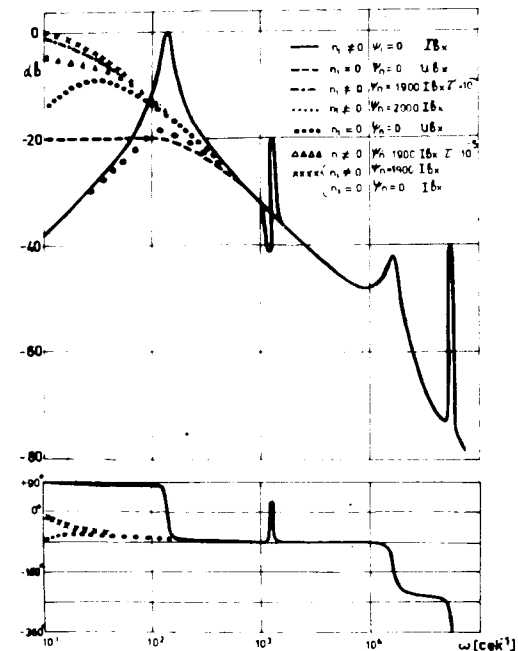


Рис. 3.

Частоты, соответствующие резонансам, при $n_1 \ll n_3$ и $m_3 \ll m_2, m_4$ определяются выражениями

$$\omega_1 \approx \left\{ \frac{n_1}{2(m_2 + m_3 + m_4)} \left[1 - \frac{(R_2 + R_4)^2}{2n_1(m_2 + m_3 + m_4)} \right] \right\}^{1/2};$$

$$\omega_2 \approx \left[\frac{2n_1}{m_1} \left(1 - \frac{R_1^2}{8n_1 \cdot m_1} \right) \right]^{1/2};$$

$$\omega_3 \approx \left\{ \frac{n_3(m_2 + m_4)}{2m_2 \cdot m_4} \left[1 - \frac{R_2^2 \cdot R_4^2 (m_2 + m_4)}{2(R_2 + R_4)^2 \cdot n_3 \cdot m_2 \cdot m_4} \right] \right\}^{1/2};$$

$$\omega_4 \approx \left[\frac{2n_3}{m_3} \left(1 - \frac{R_3^2}{2n_3 \cdot m_3} \right) \right]^{1/2}.$$

Одна из возможностей устранения первых двух резонансов состоит в замене направляющих пружин подшипниками, катающимися по направляющим /4/, что соответствует $m_1 = 0$, $n_1 = 0$ и $R_1 = 0$. Тогда для передаточных функций системы получим следующие выражения:

$$K_{i2} = p \cdot \frac{X(p)}{I(p)} = p \cdot K_{i0} \cdot \Psi_g \cdot \Psi_c \cdot \frac{D_{b4}(p)}{D_b(p)}, \quad (8)$$

$$K_{U2} = p \cdot \frac{X(p)}{U_{вх}(p)} = p \cdot K_{U0} \cdot \Psi_g \cdot \Psi_c \cdot \frac{D_{b4}(p)}{R_0 [R_0 \cdot D_b(p) + \Psi_g^2 \cdot p \cdot D_{b2}(p)]},$$

где $D_{b2}(p)$ и $D_{b4}(p)$ имеют вид, аналогичный (2) и (3), но $a_{11} = 1$; $a_{12} = 0$;

$$a_{22} = m_2 p^2 + (R_2 + R_3 + R_5)p + n_3.$$

Устранение первого резонанса возможно также за счет компенсации реакции пружины путем введения положительной обратной связи по положению. Для устранения фазового сдвига вследствие импеданса двигательной катушки необходимо применить усилитель с токовым выходом. Если инерционность цепи положительной обратной связи моделировать интегрирующим звеном с постоянной времени τ , то передаточная функция примет вид

$$K_{i3} = \frac{p \cdot K_{i0} \cdot \Psi_g \cdot \Psi_c \cdot D'_{a4}(p)}{D'_a(p)}, \quad \text{где} \quad (10)$$

$$D'_{a4}(p) = b \cdot D_{a4}(p), \quad (11)$$

$$b = 1 + p \cdot \tau,$$

$$D'_a(p) = a_{11}(a'_{22} a_{33} a_{44} + 2 \cdot b \cdot a_{23}^2 a_{24} - a'_{22} a_{23}^2 - b \cdot a_{23}^2 a_{44} - b \cdot a_{24}^2 a_{33}) - a_{12}^2 \cdot b \cdot (a_{33} a_{44} + a_{23}^2), \quad (12)$$

$$a'_{22} = b \cdot [m_2 p^2 + (R_2 + R_3 + R_4)p + n_1 + n_3] - \Psi_n,$$

Ψ_n - коэффициент.

Условию компенсации первого резонанса соответствует $\Psi_n = n_1/2$. Нормированные амплитудно- и фазочастотные характеристики при разных значениях τ и Ψ_n показаны на рис. 3.

Добавление внешнего груза и длинной трубы для вывода движения приводит к снижению частоты первого и третьего резонансов и появлению дополнительного резонанса. Более подходящим конструктивным решением является подсоединение к двигательной катушке внешнего груза с помощью очень короткой легкой жесткой трубы.

Устранение высокочастотных максимумов в передаточной функции возможно и за счет использования фильтров-пробок^{/25/}. Однако подавление с первого по третий резонансов этим способом в ряде случаев может оказаться не эффективным, поскольку частоты этих резонансов меняются при изменении веса внешнего груза.

В системе с отрицательной обратной связью по скорости для увеличения устойчивости вводят частотно-зависимые корректирующие цепи. В большинстве работ применено интегрирование с большой постоянной времени^{/8-13,15,20-22/}, иногда сочетаемое с компенсацией или смещением полюса усилительного каскада^{/8,10,15/}. В работах^{/11,14,22/} применены компенсирующие звенья второго порядка. Передаточные функции корректирующих цепей показаны на рис. 4.

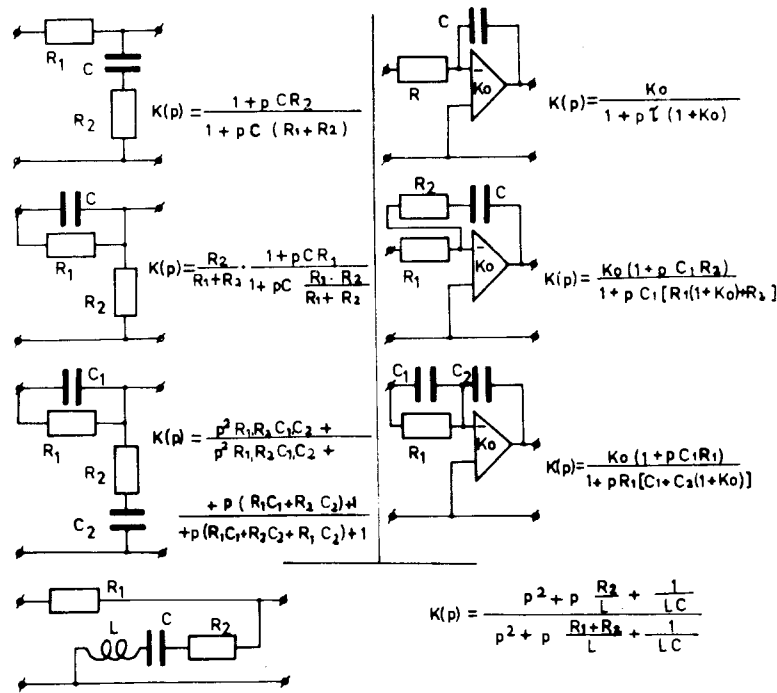


Рис. 4.

Медленный дрейф положения механической системы уменьшают в основном тремя способами: либо разделением по постоянному току последнего усилительного каскада^{/8-11,17/}, либо использованием обратной связи по постоянному току с выхода оконечного каскада усилителя^{/18,22/}, либо привязкой момента переключения направления движения к размерной точке на оси вибратора с помощью фотодатчика^{/13,20/}.

Для сравнительной оценки работы отдельных модификаций вибраторов задавались разные коэффициенты усиления в канале прямой передачи при сохранении величины коэффициента обратной связи. Исследовалась реакция устройства на единичный скачок напряжения с частотной коррекцией и без нее. Выражения для передаточных функций замкнутых систем в этом случае имеют вид:

$$K_{i\beta} = p \cdot \frac{K_{i0} \cdot K_0 \cdot \Psi_g \cdot d_1 \cdot D_4(p)}{d_2 \cdot D(p) + K_0 \cdot K_{i0} \cdot \Psi_g \cdot \Psi_c \cdot p \cdot d_1 \cdot D_4(p)}, \quad (13)$$

$$K_{U\beta} = p \cdot \frac{K_{U0} \cdot K_0 \cdot \Psi_g \cdot d_1 \cdot D_4(p)}{d_2 \cdot R_0 [R_0 \cdot D(p) + \Psi_g^2 \cdot p \cdot D_2(p)] + d_1 \cdot \Psi_g \cdot \Psi_c \cdot K_{U0} \cdot K_0 \cdot p \cdot D_4(p)},$$

где значения $D(p)$, $D_2(p)$ и $D_4(p)$ равны соответствующим выражениям (2,3,7,11,12); d_1 определяет полюс передаточной функции каскада частотной коррекции и равно $1 + pr_1$; d_2 определяет ноль передаточной функции каскада частотной коррекции и равно $1 + pr_2$.

Реакции систем на единичный скачок напряжения (члены выражений, связанные с высокочастотными резонансами, не включены в формулы) имеют вид

$$U_{\text{вых}1}(t) = A \cdot e^{-a_a t} \left[1 - \frac{B}{A} e^{-a'_b t} \sin(\beta_b t + \phi_b) \right] + C \cdot e^{-a_c t} \sin(\beta_c t + \phi_c); \quad (15)$$

$$U_{\text{ВЫХ } 2}(t) = A \left[1 - \frac{B}{A} e^{-\alpha'_b t} \sin(\beta_b t + \phi_b) \right]; \quad (16)$$

$$U_{\text{ВЫХ } 3}(t) = A \left[1 - \frac{B}{A} e^{-\alpha'_b t} \sin(\beta_b t + \phi_b) + C \cdot e^{-\alpha_c t} \sin(\beta_c t + \phi_c) \right]. \quad (17)$$

Величины коэффициентов выражения показаны на рис. 5,6,7.

Наличие направляющих пружин не дает возможности точно воспроизвести единичный скачок напряжения, так как реакция системы помимо колебательной составляющей имеет еще и максимум (см. формулу 15). Устранение пружин дает возможность получить достаточно постоянную скорость (формула 16), а система с компенсацией реакции пружин отличается от случая (16) только наличием затухающих колебаний небольшой амплитуды (17). Дальнейшее уменьшение влияния этой составляющей возможно только за счет уменьшения массы и жесткости пружин. При выборе коэффициента усиления необходимо обратить внимание на наличие максимума коэффициента C .

Использование оконечного усилителя с низкоомным выходом дает определенное сокращение длительности нарастания скорости (рис. 8,9), что, в свою очередь, позволяет сократить время всего переходного процесса.

Устойчивость системы определяется наличием высокочастотных резонансов. Амплитуды и частоты высокочастотных колебаний (рис. 10) зависят от выбранной частотной коррекции и имеют вид:

$$U_{br}(t) = -D e^{-\alpha_d t} \sin(\beta_d t + \phi_d) + E e^{-\alpha_e t} \sin(\beta_e t + \phi_e). \quad (18)$$

Введение интегрирования с большой постоянной времени повышает максимально допустимую величину усиления в цепи обратной связи, но увеличивает длительность переходного процесса (рис. 5,9). Введение

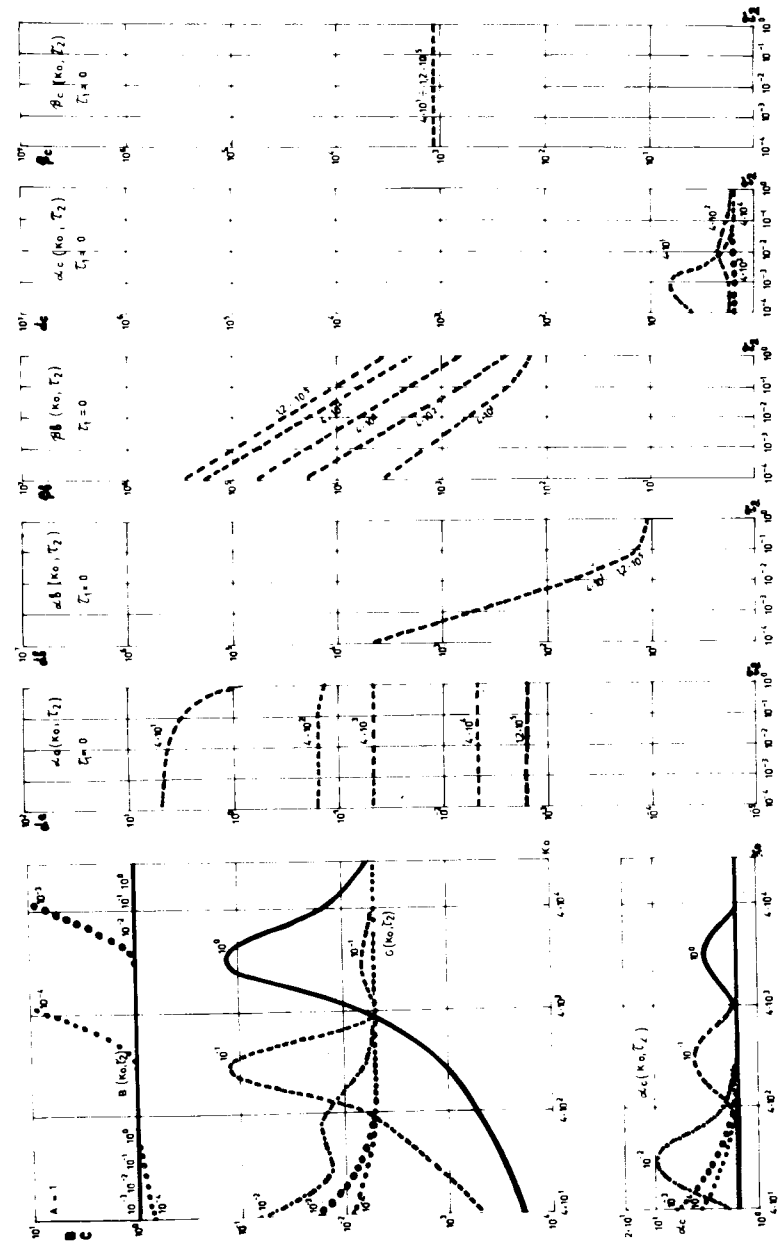


Рис. 5.

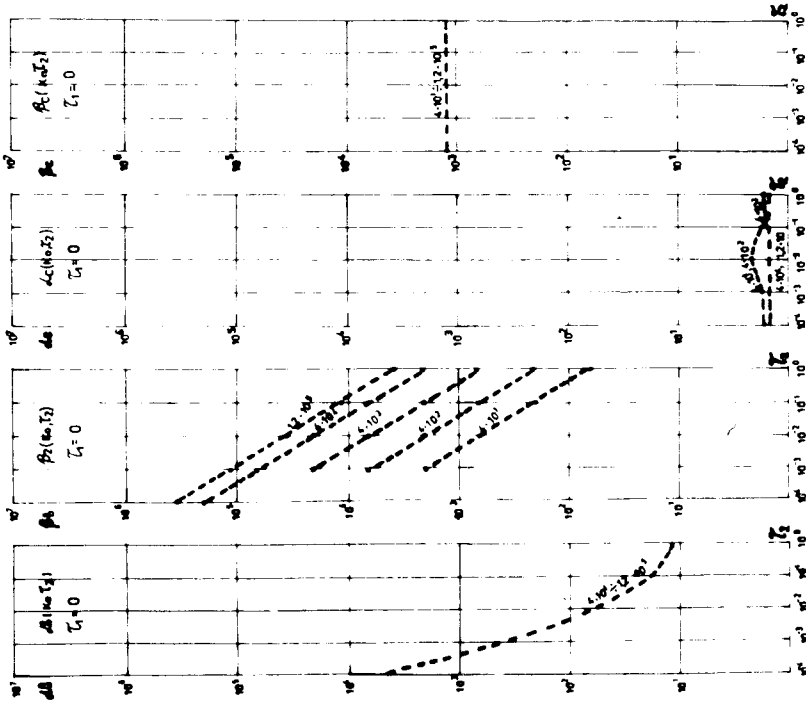


Рис. 6.

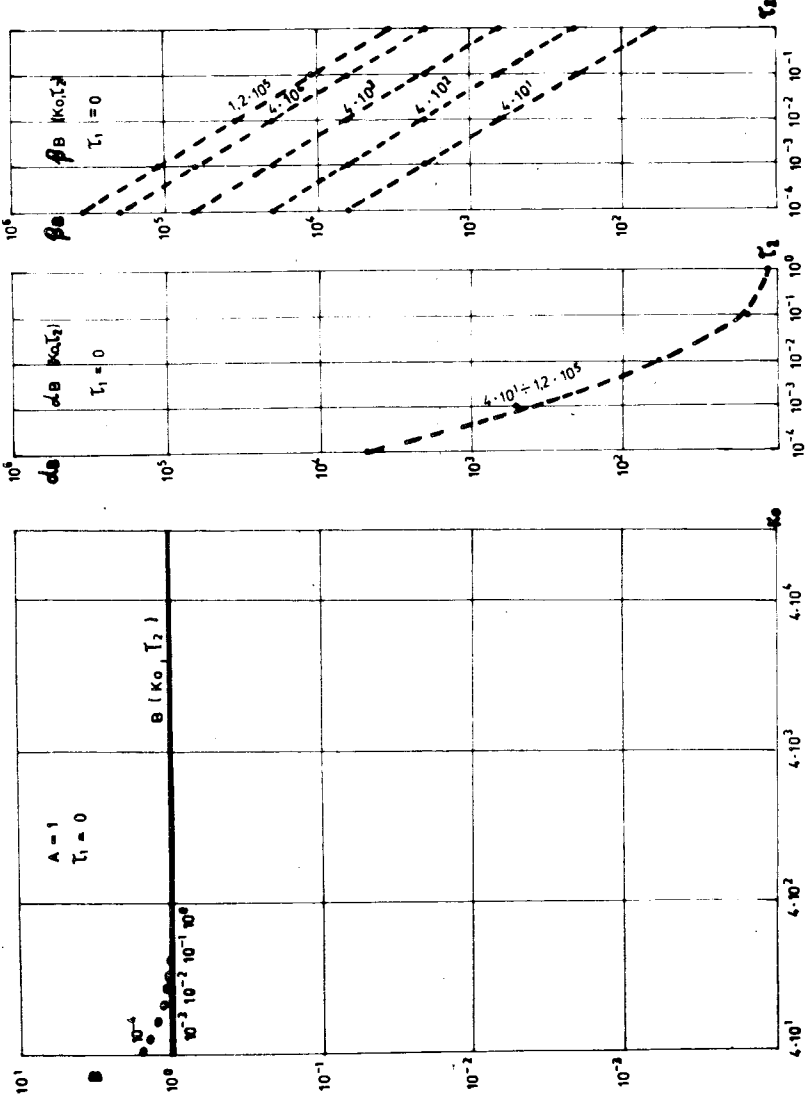
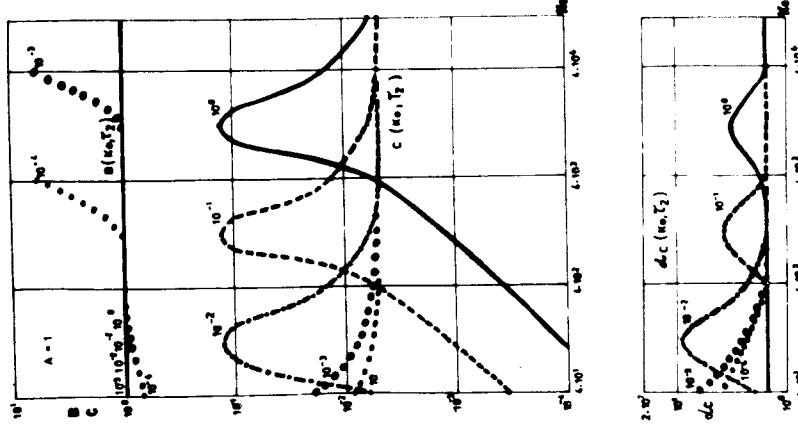


Рис. 7.

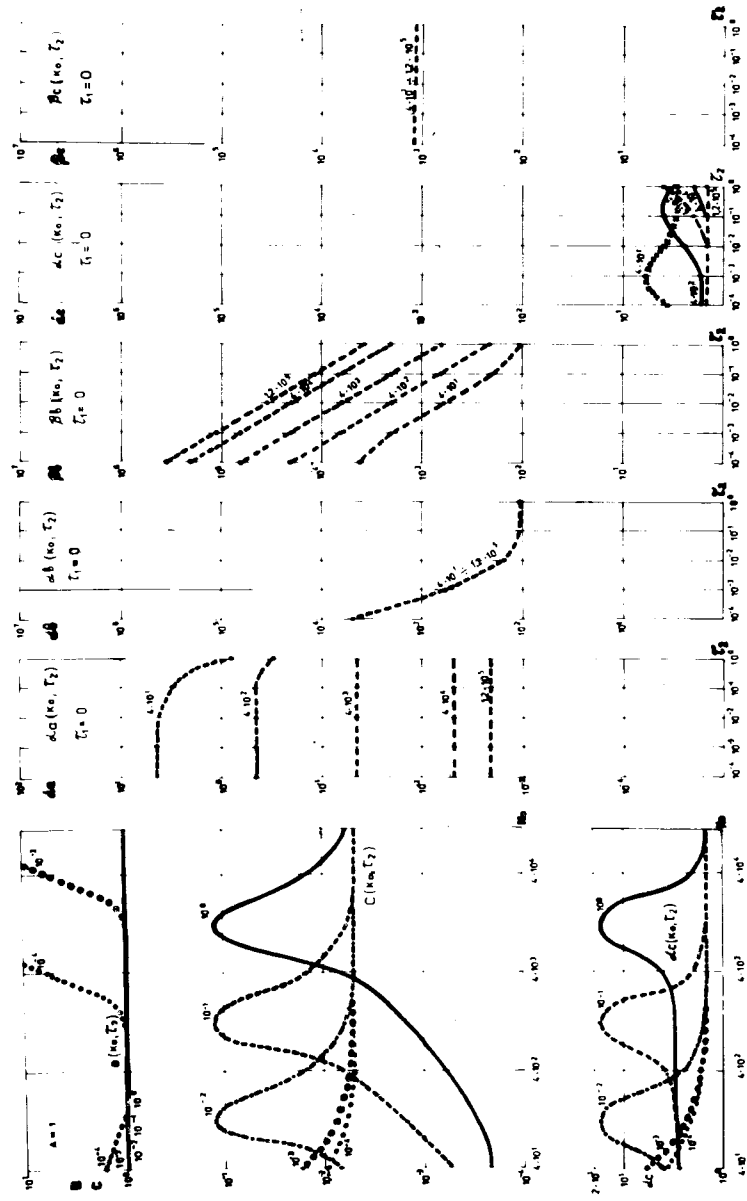


Рис. 8.

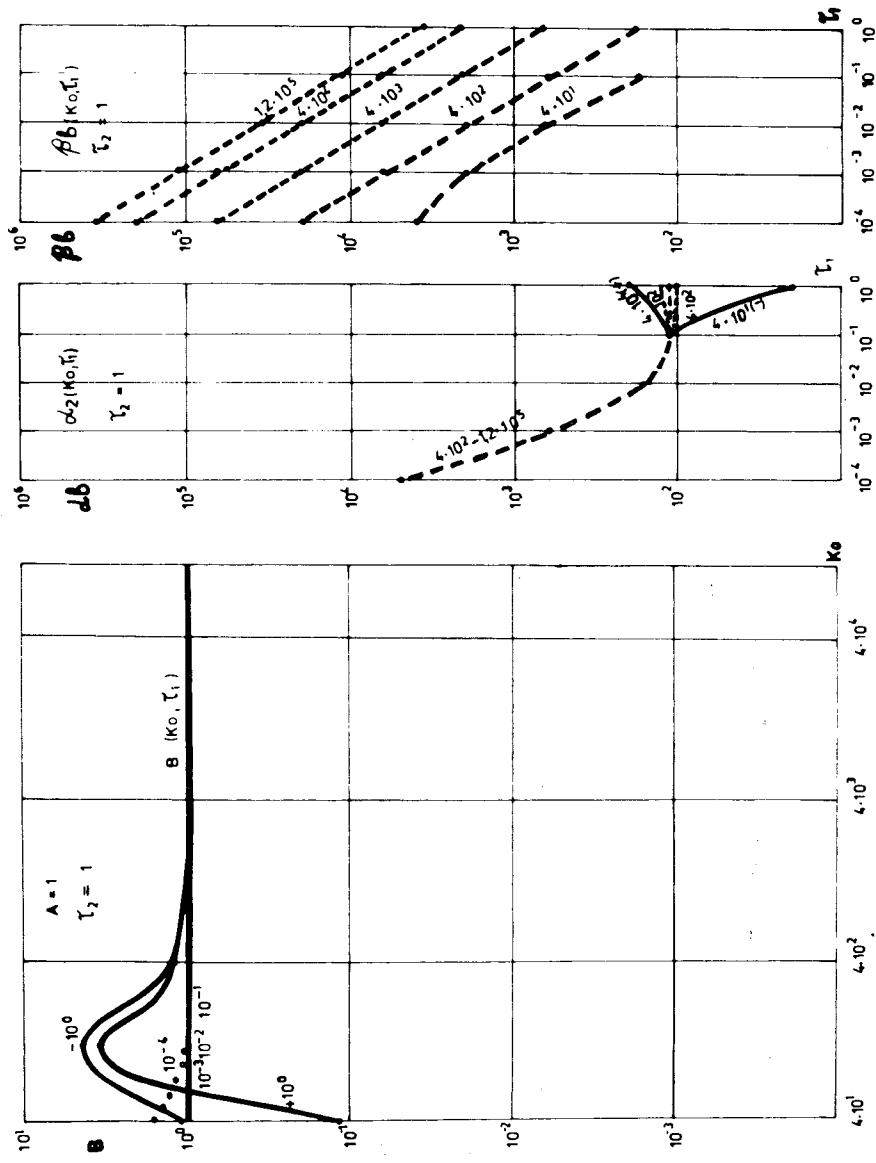


Рис. 9.

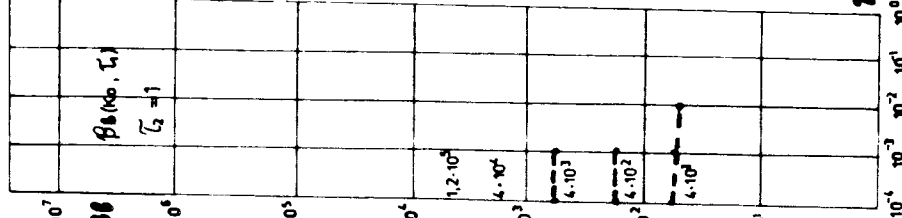
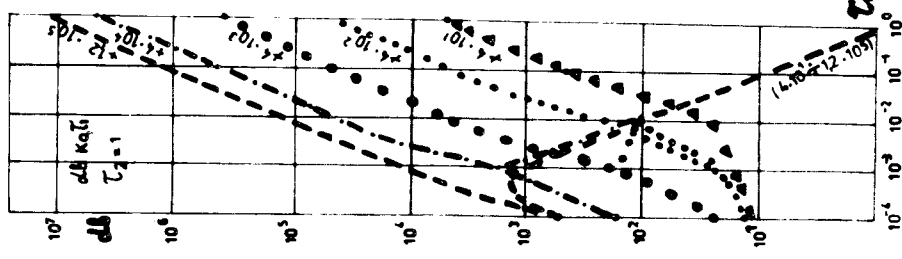
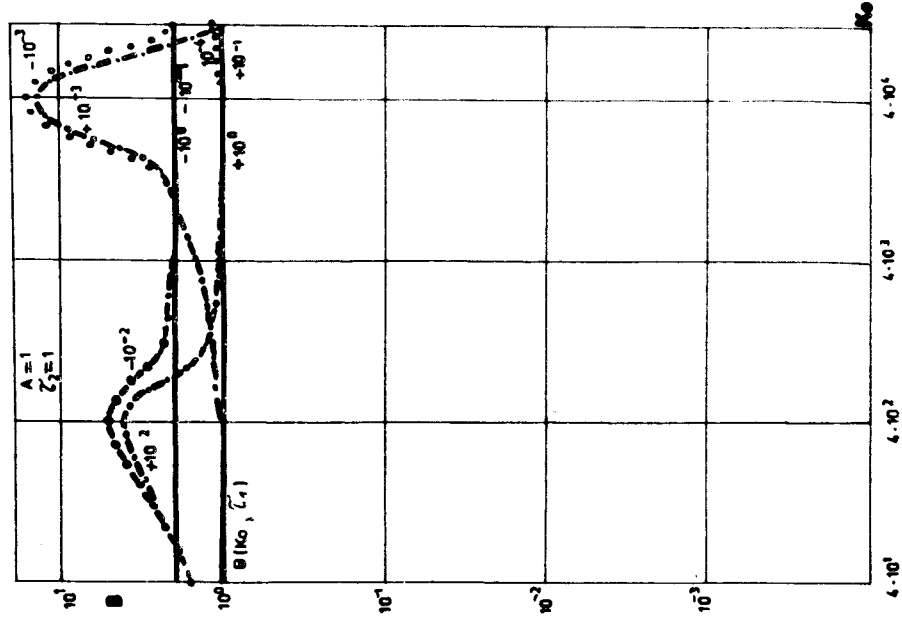


Рис. 10.

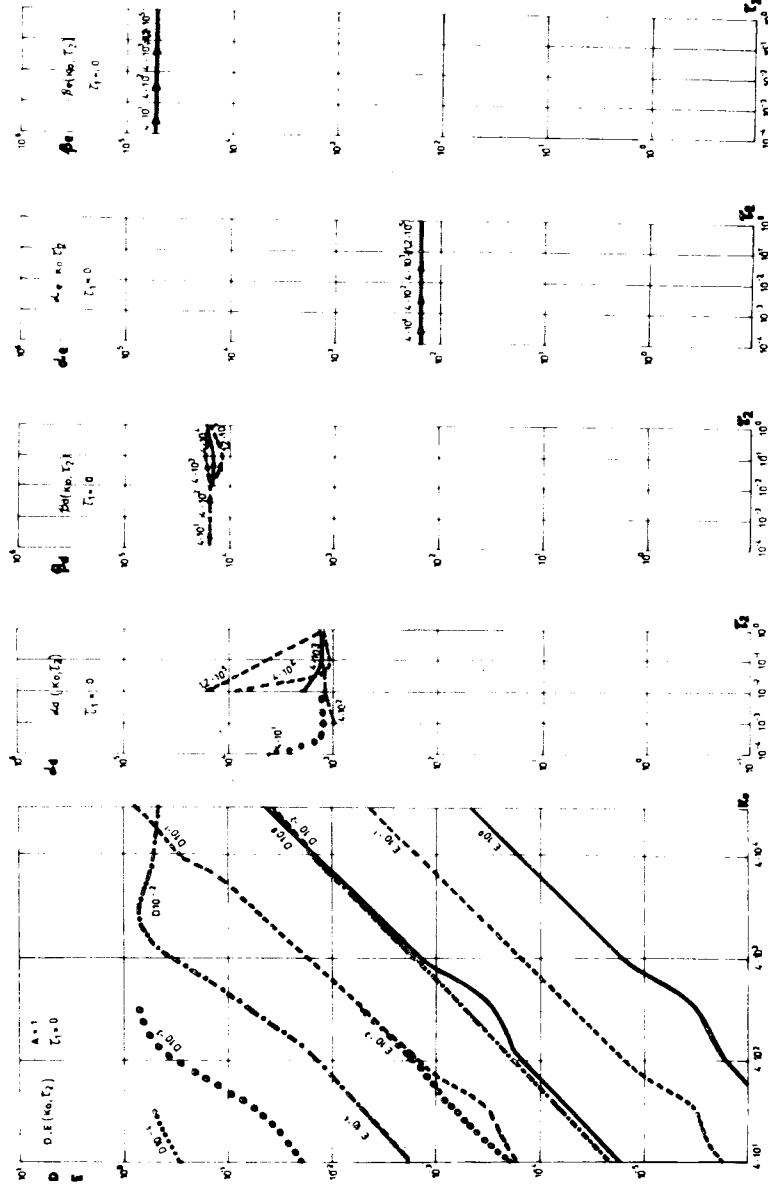


Рис. 11.

дополнительного полюса в передаточной функции не приводит к повышению устойчивости (рис. 10,11).

Применение фильтров-пробок (рис. 4) для подавления высокочастотных резонансов позволяет повысить максимальную величину коэффициента усиления замкнутой цепи обратной связи.

При расчетах передаточные функции и реакции систем представлялись полиномами n -го порядка, и вычисление проводилось на ЭВМ.

ВЫВОДЫ

Преимуществом системы с компенсацией реакции пружины является сохранение простоты конструкции электромеханического вибратора при пониженных требованиях к оконечному усилителю в случае работы вибратора в вертикальном положении.

Выбором подходящей системы частотной коррекции можно получить очень глубокую отрицательную обратную связь, что позволяет уменьшить ошибку воспроизведения скорости до 10^{-3} .

Предложенная модель вибратора достаточно точно воспроизводит параметры реальной системы и может быть использована при разработке других конкретных конструкций мессбауэровских спектрометров.

Литература

1. С.М.Иркаев, Р.Н.Кузьмин, А.А.Опаленко. Ядерный гамма-резонанс. Изд-во Московского университета, 1970.
2. D.P. Bunbury. J.Sci.Instr., 43,11, 783, 1966.
3. A.A.Forster et al. Messtechnik, 12, 347, 1972.
4. С.И.Зварич и др. Заводская лаборатория, т. 34,4, 502, 1968.
5. Т.Томов, Т.Русков. ПТЭ, 5, 138, 1967.
6. J.Lipkin. Rev.Sci.Instr., 33, 1358,1962.
7. V.Vili, T.W.Nybakken. Rev.Sci.Instr., 35, 1085, 1964.
8. Экспериментальная техника эффекта Мессбауэра, под ред. И.Грувермана, Мир, 65, 1967.
9. L.Cohen et al. Rev.Sci. Instr., 34,8, 671, 1963.
10. E.Kankeleit. Rev.Sci.Instr., 35,2, 194, 1964.
11. L.Lövborg. Nucl.Instr.Meth., 36,3,307, 1965.
12. J.Lipkin et al. Rev.Sci.Instr., 35,10, 1336, 1965.
13. J.Ruegg et al. Rev.Sci.Instr., 36,356, 1965.
14. J.Carmeliet et al. Nucl.Instr.Meth., 62, 2, 166, 1968.
15. А.В.Доленко и др. ПТЭ, 2, 43, 1972.
16. R.L.Clase. Rev.Sci.Instr., 40,1, 85, 1969.
17. H.De.Waard et al. Nucl.Instr.Meth. 941, 195, 1971
18. С.И.Ормаджиев и др. ОИЯИ, 13-4720, стр. 295, 1969.

19. Там же, стр. 309.
20. В.И.Гольданский, К.П.Шамов. ПТЭ, 4, 101, 1970.
21. К.П.Алешин и др. ПТЭ, 4, 54, 1972.
22. А.Н.Артемьев и др. ПТЭ, 6, 64, 1971.
23. И.Г.Дрейзен. Электроакустика и звуковое вещание, М., Связьиздат, 1961.

24. Л.Р.Нейман, П.Л.Калантаров. Теоретические основы электротехники. т.1, Госэнергоиздат, М., 1954.
25. О.Дж.М.Сиит. Автоматическое регулирование, М., 1962.
26. CERN 6600 Computer Program Library I, C204, 1969.
27. Н.Г.Клюкин. ОИЯИ, 11-8888, Дубна, 1975.

Рукопись поступила в издательский отдел
1 сентября 1976 года.