

15
5-53

Экз. чит. зала

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

P - 486

И.М. Бескровный

МАГНИТОСТРИКЦИОННЫЕ ЛИНИИ ЗАДЕРЖКИ

Дубна 1960 год

P - 496

И.М. Бескровный

МАГНИТОСТРИКЦИОННЫЕ ЛИНИИ
ЗАДЕРЖКИ

Направлено в "Акустический журнал"

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

261 7/685

В статье излагается краткая теория магнитоотрицательных линий. Приводится метод расчета переходной характеристики линии как для идеализированного, так и для реального случая. Рассмотрены факторы, влияющие на амплитуду сигнала, температурная стабильность линии, методы подавления отраженных сигналов. Теоретические выводы сравниваются с результатами эксперимента. Приводится описание четырехканального блока памяти на магнитоотрицательных линиях.

Указаны возможные области применения магнитоотрицательных линий задержки.

1. В в е д е н и е

1.1. Механические аналоги электрических величин

При исследовании принципов работы магнитоэлектрических линий приходится иметь дело с механическими величинами такими как сила, скорость, масса и т.п. Для построения теории процессов, происходящих в линии, удобно воспользоваться аналогией между электрическими и механическими величинами согласно приводимой ниже табл. 1 /31 / .

Таблица № 1
Электрические и механические аналоги

Электрические величины		Механические величины	
Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Заряд	q	Смещение	x
Напряжение	e	Сила	f_m
Ток	i	Скорость	v_m
Индуктивность	L	Масса	M
Сопротивление	R	Сопротивление /трения/	R_m
Емкость	C	Упругость	C_m

Основные соотношения

электрические

$$e = i \cdot R$$

$$q = C e$$

$$i = \frac{dq}{dt}$$

$$e = L \frac{di}{dt}$$

механические

$$f_m = v_m \cdot R_m$$

$$x = C_m f_m$$

$$v_m = \frac{dx}{dt}$$

$$f_m = M \frac{dv_m}{dt}$$

1.2. Общие принципы работы магнитострикционных линий

Действие магнитострикционной линии основано на магнитострикционном эффекте, заключающемся в том, что некоторые материалы /никель, нержавеющая сталь, сплав $Ni-Fe-Ti$, ниспан С, элинвар, пермаллой и т.д./ проявляют свойство изменять длину при приложении магнитного поля вдоль продольной оси материала.

На фиг. 1 показана зависимость относительной деформации $\frac{\Delta l}{l}$ от напряженности поля H для никеля, железа и 45% пермалоя. У никеля деформация является сжимающей, а у пермаллоя и у железа - расширяющей, причем знак деформации не зависит от знака напряженности магнитного поля, т.е. зависимость деформации от напряженности является четной. Для слабых полей можно считать деформацию пропорциональной квадрату плотности потока.

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l} = \lambda B^2. \quad //1/$$

Однако, при наличии достаточно сильного магнитного смещения зависимость деформации от малых изменений потока можно полагать линейной. Существует и обратный магнитострикционный эффект, заключающийся в том, что материал, подвергающийся механическому растяжению /или сжатию/, изменяет свою магнитную проницаемость. На фиг. 2 приведена кривая, показывающая зависимость начальной магнитной проницаемости никеля от приложенного натяжения 10 . Эти два эффекта и используются для работы магнитострикционной линии, принципиальная схема которой приведена на фиг. 3. Линия состоит из звукопровода, на концах которого надеты на расстоянии L друг от друга две преобразовательные катушки датчика - КД и приемника - ПК. Концы звукопровода заделаны в резиновые демпферы $-D$. Преобразовательные катушки находятся каждая в поле поляризующего магнита - М. Катушка КД подключена к выходу датчика Д, а катушка ПК - к входу приемника П. При подаче входного импульса на вход датчика Д по катушке КД протекает импульс тока. Этот импульс создает магнитное поле, сжимающее в силу магнитострикционного эффекта участок никелевой проволоки, находящейся внутри катушки КД. Таким образом, электрический импульс преобразуется в механический. Механический импульс распространяется в обе стороны от КД со

скоростью $v = 0,5$ см/мсек. Импульс, распространяющийся влево от КД, дважды проходя под демпфером \mathcal{D} , существенно ослабляется, так что его наличием можно пренебречь. Импульс, распространяющийся вправо от КД, через время $t_{\text{заг}} = \frac{L}{v}$ достигает приемной катушки ПК, которая находится в поле постоянного магнита М.

В момент прохождения механического импульса под катушкой ПК, проницаемость никелевой проволоки, находящейся внутри катушки, меняется, а значит меняется и поток индукции. Это изменение потока индукции наводит в приемной катушке ЭДС сигнала.

Когда говорят о передаче сигнала вдоль электромагнитной линии задержки, то говорят о форме падающей волны тока или напряжения. Если линия нагружена на чисто активное сопротивление, равное волновому сопротивлению R_0 /имеется в виду линия без потерь с неограниченной полосой пропускания/, то для падающей волны справедливо соотношение:

$$e(t - \frac{d}{v_0}) = i(t - \frac{d}{v_0}) R_0, \quad (2)$$

где $i(t - \frac{d}{v_0})$ - падающая волна тока и $R_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$, L_0 - индуктивность /см длины, C_0 - емкость /см длины, d - расстояние от рассматриваемой точки, $v_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}$ - скорость распространения в см/сек.

Пользуясь аналогиями между электрическими и механическими величинами, рассмотренными в 1.1., при передаче сигнала вдоль ультразвуковой линии задержки можно говорить о форме падающей волны силы или скорости. Если идеальная магнитострикционная линия /без потерь/ также нагружена на сопротивление, равное волновому, /т.е. соответствующим образом демпфирована/, то падающая волна описывается соотношением:

$$f_m(t - \frac{d}{v_0}) = v_m(t - \frac{d}{v_0}) R_0, \quad (3)$$

где $v_m(t - \frac{d}{v_0})$ - падающая волна скорости и

$$R_0 = \sqrt{\frac{M_0}{C_{m0}}}; \quad (4)$$

здесь M_0 - масса в грамм/см длины, C_{m0} - упругость в /см/дин//см длины,

$$v_0 = \sqrt{\frac{1}{M_0 C_{m0}}} \text{ скорость распространения в см/сек,} \quad (5)$$

$M_0 = \rho A$, где A — площадь поперечного сечения проволоки в см^2 , ρ — плотность в $\text{масса}/\text{см}^3$ проволоки $C_{m_0} = \frac{1}{EA}$ и E — модуль Юнга в $\text{дин}/\text{см}^2$, тогда из /5/ следует

$$v_0 = \sqrt{\frac{1}{\rho A} \frac{1}{EA}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad /6/$$

Интересным соотношением является:

$$\frac{R_0}{v_0} = \sqrt{\frac{M_0}{C_{m_0}}} \cdot \sqrt{M_0 C_{m_0}} \quad /7/$$

или

$$R_0 = M_0 v_0 \quad /8/$$

Никелевая проволока диаметром в 0,5 мм имеет импеданс примерно 2800 механических ом.

2. Анализ переходной характеристики магнитострикционной линии

Проведем расчет переходной характеристики для общего случая с помощью метода ординатных последовательностей [30]. При расчете будем исходить из следующих предположений:

а/ Магнитный поток меняется пропорционально току /при малой толщине звукопровода потерями на вихревые токи можно пренебречь/.

б/ Распределение плотности магнитного потока вдоль оси преобразователя есть функция Φ_x .

в/ Линия не имеет потерь и нагрузка согласована с волновым сопротивлением линии.

Коротко остановимся на сущности метода ординатных последовательностей, предложенного в 30. Любая функция $A(t)$ может быть представлена многочленом вида $a_0 y_0 + a_1 y_1 + a_2 y_2 + \dots + a_n y^n$, где $y_0, y_1, y_2, \dots, y^n$ означают номера ординат, расположенных через равные промежутки времени δ , и $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ означают высоту соответствующих ор-

динат. Такой многочлен называется ординатной последовательностью. Все расчеты проводятся с этими многочленами по правилам, изложенным в [30].

Рассмотрим датчик. Если на вход датчика поступает единичная ступенька тока, то магнитный поток во времени также представляет единичную ступеньку, и под катушкой датчика образуется механический импульс сжатия, повторяющий по длине звукопровода форму распределения потока $\bar{\Phi}(x)$ вдоль оси преобразователя. Поскольку до предела упругости сжатие пропорционально напряжению, то эту же форму будет иметь падающая волна механического напряжения $F(x)$, распространяющаяся вдоль линии. Конечно, падающая волна напряжения есть функция двух переменных x и t , т.е. $F = F(t - \frac{x}{v_0})$, но если наблюдать это напряжение в какой-либо фиксированной точке, то эта падающая волна будет иметь вид функции от времени, точно соответствующей функции от расстояния, рассматриваемой справа налево. Поэтому будем говорить в дальнейшем, для краткости, только о функции времени, имея в виду, что x при этом фиксировано и в точке рассмотрения равно нулю. Если же говорится о функции от x , то имеется в виду распределение функции вдоль звукопровода справа налево при фиксированном времени t , равном нулю. Время и длина связаны соотношением $t = \frac{x}{v_0}$. Таким образом,

$$F_1(x) = K_1 \bar{\Phi}_g(x) \quad F_1(t) = K_1 \bar{\Phi}_g\left(\frac{x}{v_0}\right), \quad /9/$$

где $F_1(t)$ форма падающей волны напряжения при воздействии единичной ступеньки бесконечной длительности. Выразим функцию $\bar{\Phi}_g(x)$ через ординатную последовательность

$$\bar{\Phi}_g(x) = a_0 y^0 + a_1 y^1 + a_2 y^2 + \dots + a_n y^n.$$

Пусть интервал между соседними ординатами по x равен δ , тогда интервал во временных функциях между соседними ординатами по t будет равен $\tau = \frac{\delta}{v_0}$. Имея в виду это соотношение между δ и τ , мы можем записать

$$F_1(t) = K_1 \bar{\Phi}_g(x) = K_1 [a_0 y^0 + a_1 y^1 + a_2 y^2 + \dots + a_n y^n]. \quad /10/$$

Чтобы получить форму падающей волны напряжения при единичном воздействии

$F_1(t)$, надо разделить многочлен /9/ на бесконечный многочлен $[2y + 2y^2 + 2y^3 + \dots]$, выражающий единичную ступеньку бесконечной длительности [30].

$$F_{\Delta}(t) = \frac{F_1(t)}{[2y + 2y^3 + 2y^5 + \dots]} \quad /11/$$

Теперь, чтобы получить форму падающей волны напряжения при воздействии входного импульса тока любой формы, достаточно выразить форму импульса входного тока через ординатную последовательность $\mathcal{I}_{\theta x}(t)$ и тогда

$$F(t) = K_2 \mathcal{I}_{\theta x}(t) F_{\Delta}(t). \quad /12/$$

Поясним это на простом примере. Пусть мы имеем длину входного преобразователя l_1 равную шести интервалам δ . Рассмотрим идеальный случай, когда $\Phi_g(x)$ имеет вид, показанный на фиг. 4а. Пусть входной импульс тока имеет трапецеидальную форму, показанную на фиг. 4б, с шириной основания, равной $l_1/v_0 = 6\tau$. Представление входного импульса тока в ординатной последовательности имеет вид

$$\mathcal{I}_{\theta x}(t) = y + 2y^2 + 2y^3 + 2y^4 + y^5. \quad /13/$$

Представление такой формы $\Phi_g(x)$ в ординатной последовательности имеет вид

$$\mathcal{I}_{\theta x}(t) = y + 2y^2 + 2y^3 + 2y^4 + y^5. \quad /14/$$

Тогда, согласно /9/, /11/, /12/, /13/ и /17/ получим:

$$\begin{aligned} F(t) &= K_2 \mathcal{I}_{\theta x}(t) F_{\Delta}(t) = K_2 \mathcal{I}_{\theta x}(t) \frac{K_1 \Phi_g(x)}{[2y + 2y^3 + 2y^5 + \dots]} = \\ &= K_3 [y + 2y^2 + 2y^3 + 2y^4 + y^5] \cdot [1 - y^6] = \quad /15/ \\ &= K_3 [y + 2y^2 + 2y^3 + 2y^4 + y^5 - y^7 - 2y^8 - 2y^9 - 2y^{10} - y^{11}]. \end{aligned}$$

Эта функция показана на фиг. 4в. Теперь проанализируем приемный преобразователь. Поток, сцепленный с приемной катушкой, можно найти из уравнения

$$\Phi = \frac{\mu \partial C}{R_0 + R(t)} = K_4 [R_0 + R(t)]^{-1}, \quad /16/$$

где R_m - магнитное сопротивление участка звукопровода внутри катушки μK , $R(t)$ - переменная составляющая магнитного сопротивления. Напряжение, индуцированное в n витках катушки, равно:

$$e(t) = n \frac{d\Phi}{dt} = K_5 [R_0 + R(t)]^{-2} \left[\frac{dR(t)}{dt} \right], \quad /17/$$

но, так как $R(t)$ обычно много меньше чем R_0 , то величина $R_0 + R(t)$ может считаться постоянной и тогда

$$e(t) = K_5 \frac{dR(t)}{dt} = K_6 \rho R(t), \quad /18/$$

где ρ - оператор дифференцирования.

Определим $R(t)$. На фиг. 5 показана зависимость удельного магнитного сопротивления γ от напряжения F . Зависимость настолько линейна, что можно записать

$$\gamma = K_7 \cdot F. \quad /19/$$

Очевидно, что закон распределения потокосцеплений по длине звукопровода /вдоль приемной катушки/ есть закон распределения плотности магнитного потока $\Phi_n(x)$. Тогда, если форма падающей волны F - единичная бесконечная ступенька, с учетом /19/

$$R_1(t) = K_8 \int_0^{x/v_0} \Phi_n \left(\frac{x}{v_0} \right) dt = K_8 \frac{1}{\rho} \Phi_n \left(\frac{x}{v_0} \right). \quad /20/$$

При единичном воздействии ординатной последовательности

$$R_s(t) = \frac{R_1(t)}{2y + 2y^3 + 2y^5 + \dots} = \frac{K_8 \Phi_n(x)}{\rho [2y + 2y^3 + 2y^5 + \dots]}. \quad /21/$$

Для произвольной формы падающей волны $F(t)$, выраженной в ординатной последовательности

$$R(t) = F(t) \frac{K_8 \Phi_n(x)}{\rho [2y + 2y^3 + 2y^5 + \dots]} \quad /22/$$

тогда, подставив /22/ в /8/, получим

$$e(t) = K_0 p R(t) = \frac{K_0 \Phi_0(x) F(t)}{[2y + 2y^3 + 2y^5 + \dots]} \quad /23/$$

Если в рассматриваемом примере приемный преобразователь идентичен передающему, то значение дроби в уравнении /23/ равно $1 - y^6$, тогда

$$e(t) = K_0 F(t) [1 - y^6] \quad /24/$$

Подставив $F(t)$ из /15/ получим

$$\begin{aligned} e(t) &= K_0 [y + 2y^2 + 2y^3 + 2y^4 + y^5 - y^7 - 2y^8 - 2y^9 - 2y^{10} - y^{11}] [1 - y^6] = \\ &= K_0 [y + 2y^2 + 2y^3 + 2y^4 + y^5 - 2y^7 - 4y^8 - 4y^9 - 2y^{10} + y^{11} + 2y^{14} + 2y^{15} + y^{17}] \end{aligned} \quad /25/$$

Эта функция показана на фиг. 4г.

Перейдем к расчету реального случая распределения плотности вдоль преобразователя. Рассмотрим магнитную цепь /фиг. 6/, образованную звукопроводом, катушкой преобразователя с магнитом.

В силу симметрии системы расчет распределения потока вдоль оси X можно произвести только для одной половины, т.е. считать $X=0$ в середине преобразовательной катушки. Распределение потока $\Phi(x)$ по длине магнитной цепи при установившемся режиме описывается следующей системой уравнений:

$$\int dN(x) + \Phi(x)(R_1 + R_2) \cdot dx = dF \quad /26/$$

$$-d\Phi(x) = U(x) \cdot g \cdot dx \quad /27/$$

$\Phi(x)$ - величина потока в любом сечении aa_1 , R_1 и R_2 - удельные магнитные сопротивления участков 1 и 2, g - удельная проводимость утечки, dF - элементарное приращение м.д.с. на участке dx . Пусть $K(x)$ зависимость величины удельных витков от удаления X от рассматриваемого сечения. Тогда для магнитных цепей, работающих на постоянном токе, имеем

$$dF = J \cdot K(x) \cdot dx, \quad /28/$$

где J - ток в обмотке.

Рассматривая линейную трактовку задачи, т.е. $R_1 + R_2 = R_m$ и g - пост. /что вполне допустимо при наличии достаточно сильного поля смещения/, и исключая $U(x)$ - из уравнений /26/ и /27/, получим:

$$-\frac{1}{g} \frac{d^2 \Phi(x)}{dx^2} + R_m \Phi(x) = K(x) J. \quad /29/$$

Для любого характера распределения удельных витков $K / X /$ общим решением уравнения /29/ является

$$\Phi(x) = C_1 e^{\gamma x} + C_2 e^{-\gamma x}, \quad /30/$$

где $\gamma = \sqrt{R_m g}$ C_1, C_2 некоторые функции от x , определяющиеся вариацией из полных дифференциальных уравнений в виде:

$$C_1 = A_1 - \frac{\gamma}{2Zm} \int_0^x K(x) e^{-\gamma x} dx \quad /31/$$

$$C_2 = A_2 + \frac{\gamma}{2Zm} \int_0^x K(x) e^{-\gamma x} dx, \quad /32/$$

где $Z = \sqrt{\frac{R_m}{g}}$, A_1 и A_2 - значения C_1 и C_2 при $x=0$, определяемые из граничных условий. Если $K(x) = \frac{J_0}{l_1} = K$ при $0 < x < l_1$ и $K(x) = 0$ $l_1 < x$, то

$$C_1 = A_1 - \frac{\gamma K}{2Zm} \int_0^x e^{-\gamma x} dx = A_1 + \frac{\gamma K}{2Zm} (e^{-\gamma x} - 1) \quad 0 < x < l_1 \quad /33/$$

$$C_1 = A_1 - \frac{\gamma K}{2Zm} \int_0^{l_1} e^{-\gamma x} dx = A_1 + \frac{\gamma K}{2Zm} (e^{-\gamma l_1} - 1) \quad x > l_1 \quad /34/$$

$$C_2 = A_2 + \frac{\gamma K}{2Zm} \int_0^x e^{-\gamma x} dx = A_2 + \frac{\gamma K}{2Zm} (e^{-\gamma x} - 1) \quad 0 < x < l_1 \quad /35/$$

$$C_2 = A_2 + \frac{\gamma K}{2Zm} \int_0^{l_1} e^{-\gamma x} dx = A_2 + \frac{\gamma K}{2Zm} (e^{-\gamma l_1} - 1) \quad x > l_1 \quad /36/$$

Граничные условия $I \quad x=0$

$$\Phi_{x=0} = \Phi_m$$

$$U_{x=0} = 0$$

$$\Phi'_{x=0} = 0$$

Из этого условия, пользуясь уравнением /30/, находим $A_1 = A_2$

$$\bar{\Pi} \quad x = l$$

$$\begin{aligned} \bar{\Phi}_{x=l} &= \bar{\Phi}_0 \\ \bar{U}_{x=l} &= U_0 = \frac{\Phi_0}{g_0} \\ \frac{1}{g} \bar{\Phi}'_{x=l} &= -\frac{\Phi_0}{g_0} \end{aligned}$$

Пользуясь уравнениями /30/, /34/ и /36/, получаем:

$$A_1 = \frac{J \cdot K}{Z_m \gamma} \cdot \frac{\text{sh} \gamma l + \frac{Z_0}{Z_m} \text{sh} \gamma l - \text{sh} \gamma (l - l_1) - \frac{Z_0}{Z_m} \text{ch} \gamma (l - l_1)}{2 (\text{sh} \gamma l + \frac{Z_0}{Z_m} \text{ch} \gamma l)} \quad /37/$$

При малых γl это можно упростить

$$A_1 = \frac{J \cdot K}{Z_m \gamma} \cdot \frac{\frac{Z_0}{Z_m} (\gamma l - 1) + \gamma l_1}{2 (\gamma l + \frac{Z_0}{Z_m})} = \frac{J \cdot K}{Z_m \gamma} A \quad /38/$$

[справедливо при $l_1 > \frac{Z_0}{Z_m} (l - \frac{1}{\gamma})$].

Пользуясь уравнениями /30/, /33/ и /35/, для участка $x < l_1$ получаем

$$\bar{\Phi}(x) = \frac{J \cdot K}{Z_m \gamma} [1 - (1 - 2A) \text{ch} \gamma x]. \quad /39/$$

Из уравнений /30/, /34/ и /36/ для участка $x > l_1$ получаем:

$$\bar{\Phi}(x) = \frac{J \cdot K}{Z_m \gamma} [\text{ch} \gamma (x - l_1) - (1 - 2A) \text{ch} \gamma x]. \quad /40/$$

На фиг. 4 д представлена кривая, рассчитанная по уравнениям /39/ и /40/ для следующего конкретного случая:

$$l = 3,05 \text{ мм}$$

$$b = 8,3 \text{ мм}$$

$$c = 0,5 \text{ мм}$$

$$r = 0,25 \text{ мм}$$

$$a = 4,2 \text{ мм}$$

$$\mu = 200$$

$$g_0 = \frac{2\pi\mu_0 \cdot a}{\ln \frac{c^2 + \sqrt{c^2 - r^2}}{r}} = 25,6 \cdot 10^{-9} \text{ Гн/мм} \quad R_m = \frac{1}{\mu_0 \mu^2} = 2 \cdot 10^{-7} \frac{1}{\text{Гн/мм}}$$

$$Z_m = \sqrt{\frac{R_m}{g}} = 10^8 \text{ Гн}$$

$$g = \frac{2\pi\mu_0}{\ln \frac{2b}{r}} = 19 \cdot 10^{-9} \frac{1}{\text{мм}}$$

$$Z_0 = \frac{1}{g_0} = 0,39 \cdot 10^8 \text{ Гн}$$

$$\gamma = \sqrt{R_m \cdot g} = 0,2 \frac{1}{\text{мм}}$$

$$\frac{Z_0}{Z_m} = 0,39.$$

Если представить закон распределения потока в виде

$$\Phi(x) = \frac{I \cdot K}{Z_m \gamma} \cdot 2A \cdot B,$$

141/

то результаты расчета можно представить следующей таблицей.

Т а б л и ц а 2

l мм	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
B	1	0,96	0,87	0,78	0,57	0,39	0,23	0,07

Пользуясь таблицей 2, представим $\Phi(x)$ в виде ординатной последовательности

$$\Phi(x) = 0,07y + 0,23y^2 + 0,39y^3 + 0,57y^4 + 0,78y^5 + 0,87y^6 + 0,96y^7 + y^8 + 0,96y^9 + 0,87y^{10} + 0,78y^{11} + 0,57y^{12} + 0,39y^{13} + 0,23y^{14} + 0,07y^{15} \quad 142/$$

Для сравнения с идеализированным случаем импульс входного тока возьмем точно такой же формы /фиг. 4б и 4е/, т.е.

$$I_{\text{вх}}(t) = y + 2y^2 + 2y^3 + 2y^4 + y^5.$$

143/

Подставим значение /42/ и /43/ в уравнение /15/ и произведем вычисление. Деление многочлена /43/ на многочлен $[2y + 2y^3 + \dots + 2y^{2n+1}]$ дает многочлен

$$0,035y + 0,115y^2 + 0,16y^3 + 0,17y^4 + 0,195y^5 + 0,15y^6 + 0,09y^7 + \\ 0,065y^8 - 0,065y^{10} - 0,09y^{11} - 0,15y^{12} - 0,195y^{13} - 0,17y^{14} - 0,16y^{15} - 0,115y^{16} - 0,035y^{18} \quad /44/$$

Умножение многочлена /43/ на многочлен /44/ дает в результате:

$$F(t) = 0,035y^2 + 0,185y^3 + 0,46y^4 + 0,79y^5 + 1,12y^6 + 1,315y^7 + 1,28y^8 + 1,105y^9 + \\ + 0,85y^{10} + 0,395y^{11} - 0,395y^{13} - 0,85y^{14} - 1,105y^{15} - 1,28y^{16} - 1,315y^{17} - \\ - 1,12y^{18} - 0,79y^{19} - 0,46y^{20} - 0,185y^{21} - 0,035y^{22}. \quad /45/$$

Эта функция показана на фиг. 4ж в том же масштабе, что и фиг. 4в. Если приемный преобразователь идентичен в передающем, то

$$\bar{\Phi}_n(x) = \Phi_g(x)$$

и тогда значение дроби в уравнении /25/ соответствует многочлену /44/.

Умножив многочлен /44/ на многочлен /45/, мы получим в соответствии с уравнением /25/

$$e(t) = 0,001y^3 + 0,009y^4 + 0,04y^5 + 0,121y^6 + 0,239y^7 + 0,42y^8 + 0,628y^9 + \\ 0,829y^{10} + 0,974y^{11} + 1,022y^{12} + 1,053y^{13} + 0,751y^{14} + 0,407y^{15} - 0,059y^{16} - \\ 0,564y^{17} - 1,135y^{18} - 1,633y^{19} - 1,948y^{20} - 2,056y^{21} - 1,948y^{22} - \\ - 1,633y^{23} - 1,135y^{24} - 0,564y^{25} - 0,059y^{26} + 0,407y^{27} + 0,751y^{28} + \\ + 1,053y^{29} + 1,022y^{30} + 0,974y^{31} + 0,829y^{32} + 0,628y^{33} + 0,420y^{34} + \\ + 0,239y^{35} + 0,121y^{36} + 0,04y^{37} + 0,009y^{38} + 0,001y^{39}. \quad /46/$$

Эта функция показана на рис. 4з в том же масштабе, что и 4г. Как видно из сравнения этих кривых, реальный импульс имеет амплитуду в 1,95 раза меньше, а ширину отрицательной части на уровне нуля в два раза больше, чем идеализированный. Этот результат полностью совпадает с осциллограммой реального импульса.

Аналогичные результаты расчета были получены в работе [13], поскольку они базировались на законе распределения потока вдоль преобразователя довольно близком к реальному.

Два уравнения /15/ и /23/ можно объединить в одно, связывающее входной ток линии с выходным напряжением:

$$e_{\text{вых}}(t) = K I_{\text{вх}}(t) \frac{\Phi_g(x)}{[2y + 2y^3 + 2y^5 + \dots]} \cdot \frac{\Phi_n(x)}{[2y + 2y^3 + 2y^5 + \dots]} \quad /47/$$

Тогда для расчета переходной характеристики линии, при любой форме входного тока, достаточно выразить $I_{\text{вх}}(t)$, $\Phi_g(x)$ и $\Phi_n(x)$ в ординатных последовательностях и произвести умножение и деление многочленов.

Согласно уравнению /47/ $e_{\text{вых max}}$ и $I_{\text{вх max}}$ связаны линейной зависимостью. Экспериментальная проверка полностью подтвердила эту зависимость. На фиг. 7 показана зависимость $e_{\text{вых}} = f(I_{\text{вх}})$, где можно видеть, что до области насыщения это почти прямая линия. Зависимость снималась при катушке датчика, имеющей 250 витков. Анализируя с помощью уравнения /47/ переходные характеристики линии при различных условиях, можно прийти к следующим выводам:

1/ При заданной частоте повторения импульсов оптимальной длительностью выходного импульса является половина периода следования импульсов, т.е.

$$\tau_{\text{вых опт}} = \frac{T_u}{2}.$$

При этом оптимальной длиной преобразователя является

$$l_1 = l_2 = \frac{1}{2} \tau_{\text{вых опт}} v_0 = \frac{1}{4} T_u v_0.$$

2/ При данной длине преобразователя оптимальная длительность входного импульса тока равна $\tau_{\text{вх}} = \frac{l}{v_0}$. Эти соотношения хорошо

выдерживаются, если функция распределения потока вдоль преобразователя имеет плоский участок. Для коротких катушек, имеющих распределение потока как на фиг. 4д, т.е. без плоского участка, уменьшение длины катушек не приводит к пропорциональному уменьшению длительности передаваемого сигнала из-за потоков рассеяния /краевой эффект/.

3. Факторы, определяющие амплитуду сигнала

3.1. Материал и конструкция

Общепризнано, что наилучшим материалом для магнитострикционных линий является никель, обладающий наибольшим магнитострикционным эффектом. На амплитуду сигнала влияет не только химический состав материала /т.е. наличие тех или иных примесей в никеле/, но и способ его обработки.

Отжиг никеля при температуре 800°C в течение 15 - 20 минут увеличивает магнитострикционный эффект, но увеличивает при этом и потери в материале. Поэтому наилучший результат дает отжиг не всего звукопровода, а только его концов, это увеличивает амплитуду принимаемого сигнала в 2 - 3 раза.

Помимо собственно материала большое влияние на амплитуду оказывает конфигурация звукопровода, т.е. форма и размеры его поперечного сечения. Для никелевой проволоки оптимальный диаметр составляет 0,4-0,6 мм. В работе [11] показано, что с увеличением диаметра проволоки от 0,1 мм до 0,4 мм амплитуда сигнала возрастает в 2 - 3 раза. В работе [6] приводятся данные о том, что с увеличением диаметра от 0,4 мм до 2 мм амплитуда сигнала в 2-3 раза уменьшается. Причина этого следующая: с ростом диаметра звукопровода увеличивается коэффициент электромеханической связи, но растут и потери на вихревые токи. Поэтому и существует оптимальный диаметр звукопровода. Хороший результат дает применение многожильного звукопровода, состоящего из отдельных тонких проволочек. Тогда коэффициент электромеханической связи возрастает с увеличением числа проволочек быстрее, чем потери. Но и здесь существует оптимум. Подробные экспериментальные результаты влияния материала, его обработки и размера поперечного сечения звукопровода /в том числе и многожильного/ приведены в работе [7].

Форма поперечного сечения звукопровода влияет не только на амплитуду сигнала, но и на частотную характеристику линии. Наивысшей граничной частотой обладает звукопровод из никелевой ленты, так как здесь при достаточно большом коэффициенте электромеханической связи значительно меньше потери на высоких частотах, обусловленные скин-эффектом.

Хорошими частотными и амплитудными свойствами должен обладать по этой же причине звукопровод в виде трубки. Но трубчатый звукопровод имеет полосу частот ослабления, ширина и положение которой зависят только от диаметра трубки и коэффициента Пуассона [14]. Значит, выбрав разумный диаметр трубки, мы получим звукопровод с желаемой частотной характеристикой.

При возбуждении продольных механических колебаний в трубке одновременно возбуждаются и радиальные. Можно показать [32], что в данной симметричной трубке существует только основная частота радиального типа

$$f_z = \frac{1}{2\pi r} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad /48/$$

где r - радиус трубки /средний/, т.е. только на этой частоте возможны чисто радиальные колебания. Если длина X , то возможные частоты чисто продольных колебаний можно определить из выражения:

$$K f_x = \frac{K}{2X} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad /49/$$

$K = 1, 2, 3 \dots$

Фактическая частота, которая может существовать в звукопроводе есть комбинация этих двух частот

$$F = \frac{K^2 f_x^2 + f_z^2 \pm \sqrt{(K^2 f_x^2 - f_z^2)^2 + 4\sigma^2 K^2 f_x^2 f_z^2}}{2(1-\sigma^2)}, \quad /50/$$

где σ - коэффициент Пуассона.

Это дает две последовательности частот: 1-я для знака /-/, где все частоты меньше f_z и, 11-я для знака /+/, где все частоты больше f_z . Наивысшая частота последовательности F_{11} достигается при $X \rightarrow 0$ и равна

$$F_{11 \max} = f_z. \quad /51/$$

24. 8/685

Наини́зшая частота последовательности f_{II}^* достигается при $X \rightarrow \infty$ и равна

$$f_{II}^* \min = f_z / \sqrt{1 - \beta^2} . \quad /52/$$

Итак, для данной тонкостенной трубки возможны две полосы частот F_I и F_{II} и существует полоса ослабления, определяемая из выражения

$$F_{II}^* \min - F_I^* \max = f_z \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right) \quad /53/$$

и зависящая только от γ и β .

Для никелевой трубки с $\gamma = 1,55$ мм и толщиной стенок 0,1 мм

$$F_I^* \max = f_z = \frac{1}{0,937} \cdot 4,9 \cdot 10^5 = 504 \text{ кГц}$$

$$F_{II}^* \min - F_I^* \max = 5,04 \left(\frac{1}{0,955} - 1 \right) \cdot 10^5 = 23,7 \text{ кГц} .$$

Для трубки с $\gamma = 0,55$ мм, $F_I^* \max = 1,36$ мгц.

Оптимальная толщина стенок трубки 0,1 мм. Величина затухания в зависимости от длины звукопровода возрастает мало. В работе [8] приведена величина затухания примерно 2 дБ/м, хорошо совпадающая с нашими наблюдениями.

Немалую роль играет и конструкция линии. Если задержка мала, т.е. длина звукопровода не превышает /30-50/ см, то его можно укрепить без промежуточных стоек. Если же требуется задержка свыше 100 мксек, то возникает вопрос о размещении звукопровода. Звукопровод можно свить в спираль. При этом возрастает дисперсия, уменьшается амплитуда сигнала. Правда, само сворачивание звукопровода не приводит к существенному увеличению затухания; так в наших экспериментах свободно лежащий звукопровод, длиной 5 м, сворачивался в спираль диаметром до 15 см без особого уменьшения амплитуды принимаемого сигнала. Но в готовых конструкциях звукопровод приходится закреплять на стойках. И тогда, если провод свернут в спираль малого размера, то много точек звукопровода соприкасается с опорными стойками, а это вызывает резкое увеличение затухания и появление ложных

сигналов. Величина затухания существенно зависит от материала стоек и их размеров. Проведенный эксперимент позволил установить, что достаточно приемлимыми являются стойки из губчатой резины, толщиной в 2 мм. Применение таких стоек позволило свернуть 5 метровую линию / $t_{\text{св}} = 1000$ мксек / в спираль диаметром 40 см.

3.2. Преобразователи

Оптимальная длина преобразователей, как уже указывалось выше, равна примерно $\frac{1}{2} T_{\text{вых}}$, где $T_{\text{вых}}$ - заданная длительность отрицательной части выходного импульса / главного максимума/. При выборе числа витков преобразователя следует искать разумный компромисс между частотными свойствами схемы и экономичностью датчика. Действительно, если входной преобразователь имеет малое число витков, то их можно намотать в один слой на каркасе малого диаметра так, чтобы получился длинный соленоид. У такого соленоида поле рассеяния будет мало и импульс будет мало "размазываться", т.е. возможна передача более узких импульсов. Но при этом будет мал коэффициент связи и от схемы датчика требуется очень большой импульс тока, чтобы на выходе линии получить достаточную амплитуду. С ростом числа витков амплитуду тока можно уменьшать, но при этом снижается собственная резонансная частота катушки датчика и, если число витков превышает примерно 400-500, то теперь верхнюю граничную частоту системы задает резонансная частота преобразователя, образованная его индуктивностью и паразитной емкостью. Приемлемый компромисс получается при числе витков 250-300, тогда резонансная частота преобразователя равна примерно 1,4-1,3 мгц и не ограничивает частотную характеристику системы,

Улучшить форму распределения магнитного потока вдоль преобразователя можно, поместив преобразователь в ферритовый экран. При этом форма распределения приближается к прямоугольной, что приводит не только к повышению амплитуды сигнала, но и снижает минимально возможную длительность передаваемого сигнала. Г.В.Глебович [4] сконструировал ферритовый экран такой формы, что верхняя граничная частота повысилась до 3 мгц

Очень хорошие результаты можно получить, используя распределенные преобразователи [17]. На фиг. 8 показана схематическая конструкция такого преобразователя, а на фиг. 9 — принципиальная схема. Преобразователь содержит восемь основных катушек $L_1 \dots L_8$, разделенных ферритовыми экранами. Толщина ферритовых перегородок 0,5 мм. Ширина намотки 1 мм. Ферритовые экраны изготовлены из ферритовых горшочков типа УВ7.076.164 путем ставивания до нужных размеров. Чтобы все катушки $L_1 \dots L_8$ действовали последовательно, нужно возбуждать их в соответствующей временной последовательности, т.е. каждую следующую катушку позже предыдущей на время, требуемое для прохождения механическим импульсом расстояния, равного сумме толщины экрана и ширины намотки. При указанных выше размерах это составляет 0,3 мксек. Для этой цели надо образовать электромагнитную линию задержки, имеющую задержку на элемент 0,3 мксек. Но если такую линию образовать только из основных катушек, то полоса пропускания электромагнитной линии будет узкой. Поэтому имеется еще 9 вспомогательных катушек, намотанных на каркасе из оргстекла. Основные катушки имеют по 100 витков провода ПЭЛ 0,05 и имеют индуктивность $L = 46$ мкГн. Вспомогательные катушки $L_2' \dots L_8'$ имеют индуктивность, также равную L , а катушки L_1' и L' , $\frac{1}{2}L$. Эти катушки вместе с емкостями типа ПМ-1 по 510 пф образовали линию задержки с требуемой задержкой между основными катушками и волновым сопротивлением 300 ом, $\tau_{\text{ит}} = 0,2$ мксек. Преобразователь должен быть нагружен на омическое сопротивление, равное волновому, чтобы повысить коэффициент преобразования для волн выбранного направления. Опыты с этим преобразователем показали, что при этом:

- а/ Увеличилась в 5,5 раз амплитуда принимаемого сигнала,
- б/ Минимальная длительность сигнала 0,6 мксек по главному максимуму.
- в/ Благодаря направленному действию преобразователей отсутствуют сколько-нибудь значительные отраженные сигналы.

Еще более повысить граничную частоту системы можно, взяв не по одной вспомогательной катушке на элемент, а по две-три. Недостатком распределенного преобразователя является большая сложность изготовления.

3.3. Магниты

В принципе, для работы линии необходим только один магнит — у приемной катушки. Но наличие магнита у передающей катушки, как показали эксперименты, увеличивает амплитуду принимаемого сигнала, делает ее более стабильной и позволяет получать на выходе линии импульсы обратной полярности. Как уже говорилось, магнитострикция есть четная функция от потока, т.е. знак деформации не зависит от знака магнитного поля. Но при наличии постоянного поля смещения знак переменной составляющей деформации зависит от знака поля, создаваемого входным сигналом.

Таким образом, при наличии магнита у датчика, линию можно использовать для запоминания чисел в троичном коде, имея три возможных сигнала на выходе $+1, 0, -1$. Это может очень сильно повысить емкость линии или, при той же емкости, снизить габариты. Магнит у датчика необходим также, если желательно иметь переменную задержку в линии, перемещая катушку датчика. /часто это удобнее, чем перемещать катушку приемника, особенно если приемников несколько/. Так как звукопровод имеет на различных участках различную намагниченность, то перемещение катушки датчика вдоль звукопровода без магнита вызовет сильное колебание амплитуды. На амплитуду сигнала сильно влияет расстояние магнита от звукопровода. Это обусловлено тем, что от расстояния между магнитом и звукопроводом зависит величина смещения и, как мы видели в разделе 2, — форма распределения потока вдоль преобразователя. Поэтому, чтобы добиться максимальной амплитуды, нужно должным образом отрегулировать положение магнитов. Расстояние между полюсами магнитов должно быть возможно меньше, это улучшит форму распределения магнитного потока.

4. Подавление отраженных сигналов

Если на концах линии не поставлены демпферы δ /см.фиг.3/, то в приемной катушке наряду с полезным сигналом появятся два отраженных — один от левого конца и другой от правого.

В качестве материала для демпферов можно использовать резину, битум и другие пластические материалы. В работе [7] приведена подробная таблица результатов исследования различных демпферов. В работе [6] указывается, что применение резины в качестве демпфера нежелательно, так как резина стареет и от этого со временем появляются отраженные сигналы. Поэтому предлагается два оригинальных метода демпфирования. Первый, для тонких звукопроводов, состоит в том, что концевые участки звукопровода длиной 15-20 см наматываются на барабан с фетровой прокладкой /2-3 витка/. Натяжение регулируется специальной пружиной. Это дает ослабление отраженного сигнала в 50-60 раз. У толстого звукопровода концы свиваются в спираль Архимеда, в плоскости витков спираль сжимается дисками с фетровыми прокладками.

Отжиг концов звукопровода во всех случаях уменьшает величину отраженного сигнала.

В разработанном нами четырехканальном блоке памяти применен отжиг концов при температуре 800°C в течение 20 минут и демпферы изготовлены из вакуумной резины. Демпферы имеют вид конусообразных трубок с длиной 85 мм и диаметром основания 10 мм и посажены на концы звукопровода с помощью клея БФ-2. На фиг. 10 показана осциллограмма принятого сигнала. Как видно из фиг. 10, сколько-нибудь значительные отраженные сигналы отсутствуют.

5. Температурная стабильность

Измерение температурной стабильности производилось на четырехканальном блоке памяти, где каждый из каналов имел задержку в 1000 мксек. Измерения показали, что при изменении температуры от $+20^{\circ}\text{C}$ до $+30^{\circ}\text{C}$ задержка увеличивается не более чем на 0,15%. В этом диапазоне температур задержка меняется в зависимости от температуры линейно, так что изменение задержки на один градус составляет не более +0,015%. Эта цифра совпадает с результатами, приводимыми в других работах. Так в работе [26] приводится цифра + 0,0148%. В работе [14] приводится цифра несколько большая, а именно 0,016% или точнее $\frac{1}{6000}$. Небольшие расхождения обусловлены,

по-видимому, некоторыми различиями в химическом составе материала. Изменилось также изменение задержки одного канала относительно другого. В течение восьми часов работы максимальное изменение задержки одного канала относительно другого составило 0,23 мксек на 1000 мксек или 0,023%. Таким образом, температурная стабильность никелевых магнестрикционных линий для многих применений может считаться достаточной. В тех же случаях, где требуется большая стабильность, необходимо применять специальные меры.

Легкость регулировки задержки в магнестрикционной линии позволяет осуществить подстройку задержки с помощью электронно-механической схемы, передвигающей один из преобразователей в зависимости от изменения задержки.

При использовании линии для задержки периодических импульсов можно регулировать период следования импульсов, компенсируя тем самым температурное изменение задержки. В работе [8] рекомендуется параметрическое регулирование с помощью биметаллической пластины, которая, изгибаясь при изменении температуры, перемещает один из преобразователей. Можно применить и термостатирование линии.

6. Четырехканальный блок памяти на магнестрикционных линиях задержки

Как уже упоминалось выше, был разработан четырехканальный блок памяти на магнестрикционных линиях. Технические требования на его разработку были следующими: требовалось получить четыре независимых канала задержки, которые можно было бы использовать как параллельно, так и последовательно. Задержка каждого из каналов 1000 мксек. На выходе каналов должны быть стандартные прямоугольные импульсы длительностью 2 мксек и с амплитудой 20 в на выгрузке 150 ом. Минимальное расстояние между двумя раздельно-воспроизводимыми импульсами не более 10 мксек.

Блок представляет собой прямоугольное шасси, на котором укреплены линии и электронные полупроводниковые схемы. Линии намотаны одна над другой в виде цилиндрических спиралей диаметром 430 мм на шести стойках из мягкой пористой резины. В качестве звукопровода используется никелевая

проволока диаметром в 0,5 мм. Поляризующие магниты изготовлены из сплава Альнико и имеют форму прямоугольных подковок толщиной 7 мм и длиной основания 17 мм. Преобразовательные катушки намотаны на каркасе из оргстекла с внутренним диаметром намотки 2 мм и длиной намотки 1,5 мм проводом ПЭЛ-0,05 и имеют: КД-300 витков и ПК-500 витков соответственно. В качестве датчика используется блокинг-генератор, схема которого приведена на фиг. 11. Блокинг-генератор запускается от прямоугольных импульсов положительной полярности, имеющих амплитуду не менее 10в на нагрузке 1 ком и вырабатывает на катушке датчика прямоугольный положительный импульс с амплитудой 60 в и длительностью 2 мксек.

Разрешающее время датчика равно ширине воспроизводимого импульса. Трансформатор блокинг-генератора намотан на ферритовом кольце с $\mu = 2000$, имеющем внешний диаметр 20 мм и величину поперечного сечения 25 мм^2 . Обмотки выполнены проводом ПЭЛШО-0,27 и имеют: коллекторная - 20 витков, базовая - 15 витков, и выходная - 50 витков. Датчик смонтирован на текстолитовой пластинке размером $60 \times 30 \text{ мм}^2$ и для уменьшения сигнала, наводимого на приемник в момент подачи входного импульса, закрыт прямоугольным алюминиевым экраном и расположен под общим шасси, на котором установлена линия и находится схема приемника.

Схема приемника состоит из двух частей: одна часть, схема которой представлена на фиг. 12, это первый каскад предварительного усилителя. Он собран на текстолитовой пластинке размером $40 \times 20 \text{ мм}^2$ и закреплен непосредственно у приемной катушки. Это сделано для уменьшения величины паразитного сигнала, наводимого в момент подачи импульса на вход линии. Вторая часть, схема которой приведена на фиг. 13, содержит второй каскад предварительного усилителя, два усилителя-ограничителя, усилитель мощности и выходной блокинг-генератор. На выходе блокинг-генератора вырабатывается импульс положительной полярности с амплитудой 20 в на нагрузке 150 ом и длительностью 2 мксек. На фиг. 14 показаны два импульса на выходе линии, расположенные на минимальном расстоянии друг от друга. Как видно из фиг. 14, разрешающее время всей линии равно двойной ширине импульса, воспроизводимого на ее выходе.

Наводимые сигналы являются серьезным препятствием при наладке многоканальных блоков памяти на магнестрикционных линиях. Наводка происходит через цепи питания и через паразитные связи. Для борьбы с наводками лучше всего питать приемники и датчики от отдельных источников, но можно ограничиться достаточно эффективными фильтрами, как это сделано в описываемом блоке. Далее все приемники должны подключаться к шине питания приемников тоже только через фильтры, во избежание наводки сигнала с одного приемника на другой. Для этой же цели надо экранировать один приемник от другого.

Для увеличения отношения полезного сигнала к паразитному большое значение имеет подбор триода для первого вынесенного каскада предусилителя. Этот триод должен обладать возможно большим усилением.

Так как после сборки всех линий может оказаться, что линии имеют несколько различные задержки /неточность сборки, неоднородность никелевой проволоки/, то в блоке предусмотрена плавная регулировка задержки в пределах ± 7 мсек. Катушки датчиков вместе со своими магнитами могут перемещаться с помощью винтов в специальной стойке на ± 35 мм. С помощью этих винтов можно уравнивать задержки с точностью не менее $\pm 0,1$ мсек.

7. Крутильные колебания

Линии задержки, работающие с использованием продольных колебаний, не дают возможности получить большое отношение $t_{загр.}/t_{разгр.}$ /т.е. емкость/ из-за дисперсии. Эта трудность может быть преодолена применением крутильных колебаний. Для крутильных колебаний

$$v_T = \sqrt{\frac{E_S}{\rho}},$$

/54/

где E_S - модуль сдвига. Так как $E_S = \frac{E}{2(1+\sigma)}$ и $\sigma \approx 0,3$, то $v_T/v_L = 0,6$ и при использовании крутильных колебаний вместо продольных для получения одинаковой задержки требуется соответственно меньшая длина проволоки.

В то же время, согласно экспериментальным данным, акустические потери для обоих видов колебаний на единицу времени задержки одинаковы [24].

Крутильные колебания не сопровождаются искажениями формы звуковой волны, поэтому звукопровод может иметь больший диаметр. Таким образом можно получить дешевые и прочные линии задержки с t задержки до 4 мксек и t разр. = 2 мксек.

На фиг. 15 показан принцип устройства преобразователя для возбуждения и приема крутильных колебаний. Эти колебания возбуждаются в проволоке с помощью двух никелевых лент. Постоянный магнит создает вдоль лент магнитное поле смещения, направленное для обеих лент одинаково. Переменные магнитные поля катушек преобразователей направлены противоположно друг другу, так что появление тока в катушке усиливает поле для одной ленты и ослабляет для другой. В результате магнитострикции в никелевых лентах возникают продольные колебания, которые вызывают крутильные колебания в проволоке.

На приемном конце такое же устройство работает в обратном порядке и создает выходной электрический сигнал. Условие согласования ленты с проволокой в преобразователе колебаний имеет вид:

$$A = \frac{\pi r^2 \times 0.3}{n},$$

где A - поперечное сечение ленты, см², r - радиус проволоки, см, n - число лент.

8. Возможные области применения магнитострикционных линий задержки

Ряд особенностей магнитострикционных линий дают возможность широкого их применения в ряде областей. Легкая возможность плавной регулировки задержки в очень широких пределах позволяет применять линии в генераторах сдвинутых импульсов [5].

Возможность съема любого количества сигналов путем расположения многих приемников вдоль линии используется для создания дешифраторов [16], преобразовывающих временное разделение импульсов в разделение по каналам и наоборот.

Широко используются магнитоотрицательные линии в вычислительной технике [21], [22], [26] и др.

Находят они применение и во временных анализаторах амплитуд. Магнитоотрицательную линию можно использовать также для задержки видеосигналов без существенного искажения их формы, конечно, в ограниченном диапазоне длительностей. Для этого на вход магнитоотрицательной линии подается напряжение несущей частоты, модулированное видеоимпульсом [33]. Согласно экспериментальным результатам сигналы с несущей частотой вплоть до 7 мГц могут задерживаться таким способом до 140 мксек. Линия, работающая при несущей частоте 5 мГц и при длительности задержки в 70 мксек, имеет потери в 82 дБ и добавочное затухание примерно 8 дБ на каждые следующие 70 мксек задержки.

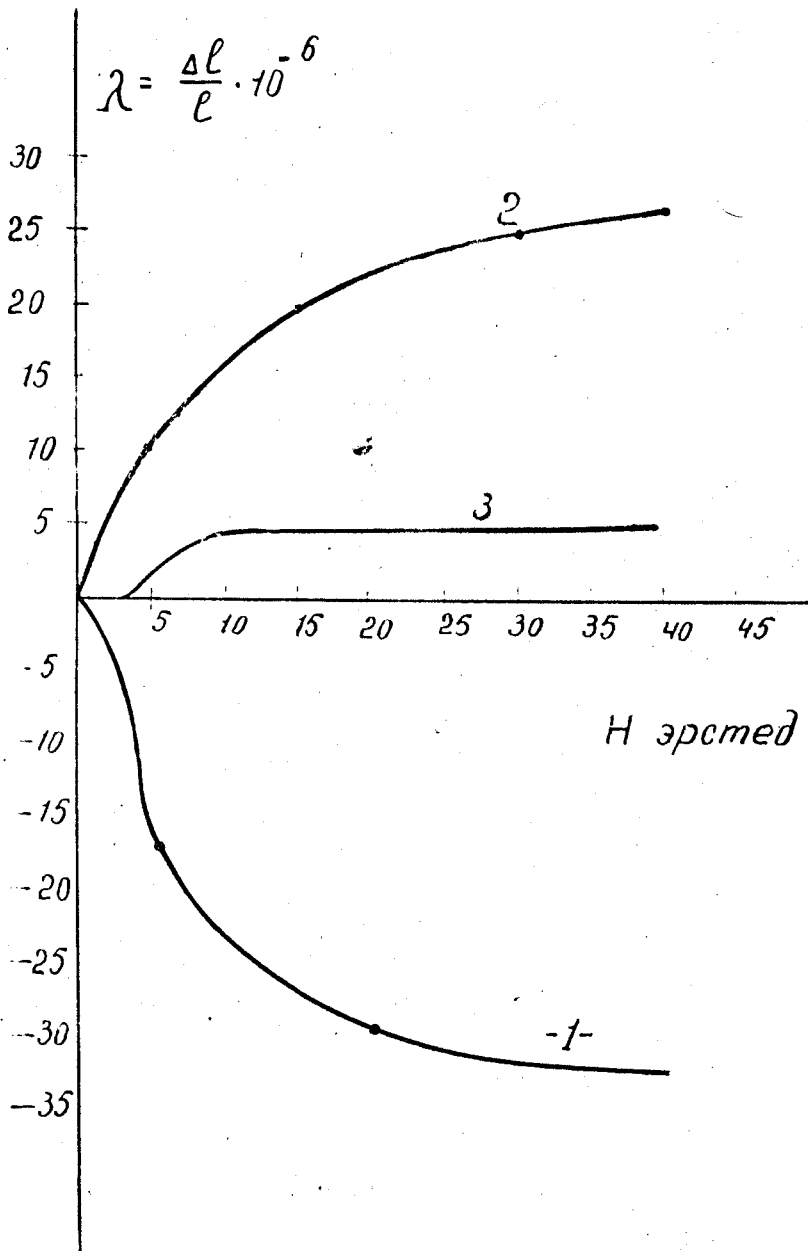
Основные преимущества магнитоотрицательных линий заключаются: в их дешевизне, простоте изготовления, легкой возможности плавной регулировки задержки, возможности съема сигнала с любого количества промежуточных точек, малом весе.

Рукопись поступила в издательский отдел
29 февраля 1960 года.

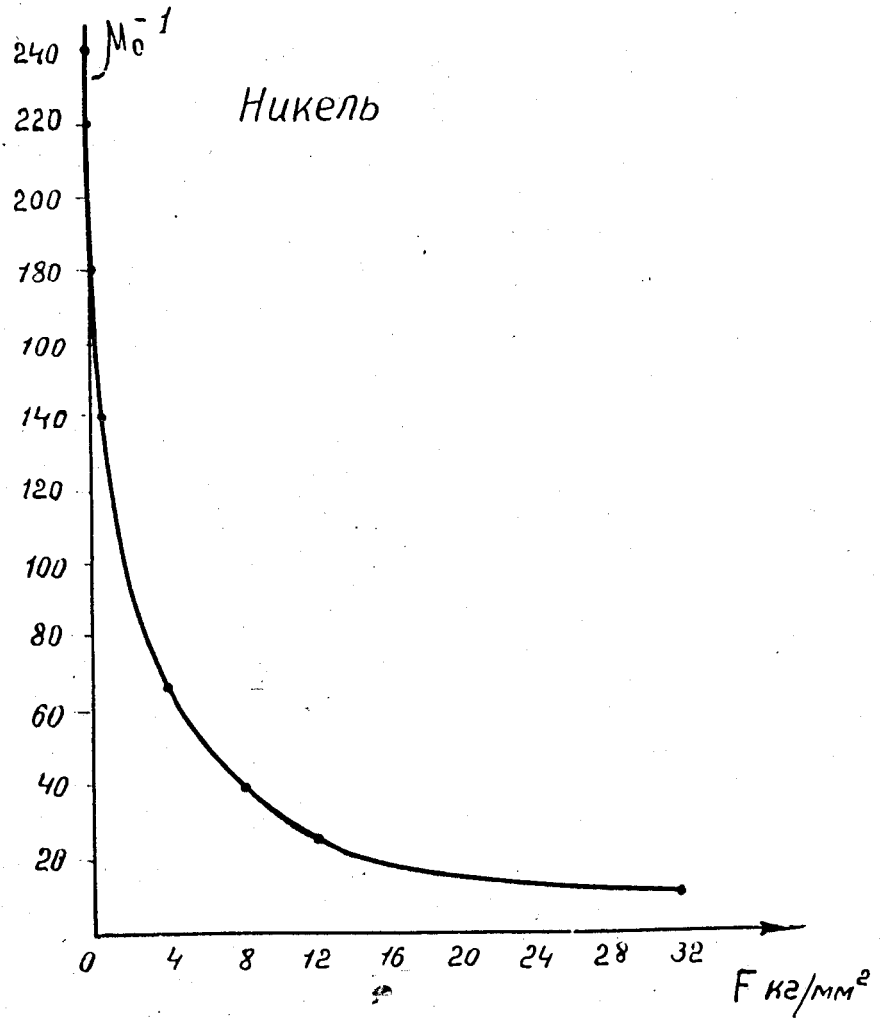
Л и т е р а т у р а

1. Л.Я. Гутин. ЖТФ, 1945 г. ХУ вып. 4-5 стр. 239.
2. Л.Я. Гутин. ЖТФ, 1945, т.ХУ, вып. 12, стр. 924.
3. Г.В. Глебович. Труды ЦНИИ, научно-технический сборник, 1957 г. Горький, вып. 1, стр. 36.
4. Г.В. Глебович. Радиотехника, 1959 г. № 2, стр. 74.
5. С.И. Лужин, С.М. Тройнов. Научно-технический сборник /труды Института, 1958 г. Горький, вып. 3 /7/ стр. 24.
6. С.И. Лужин, С.М. Тройнов. Сборник трудов конференции по электро-механическим фильтрам, 1957 1958 г.г. НИИ стр. 120.
7. Е.Ф. Бережной. Оперативный регистр на магнитоотрицательной линии задержки 1958 г. Издание ИТМ и ВТ АН СССР.
8. Е.Ф. Бережной. Сборник трудов конференции по электромеханическим фильтрам 1957-1958 г.г. НИИ стр. 116.
9. С.А. Алескеров. Автоматика и Телемеханика 1951 г. т.Х11, № 1, стр.182.
10. Р. Бозорт. Ферромагнетизм 1956 г. Издательство иностранной литературы, глава Х111.

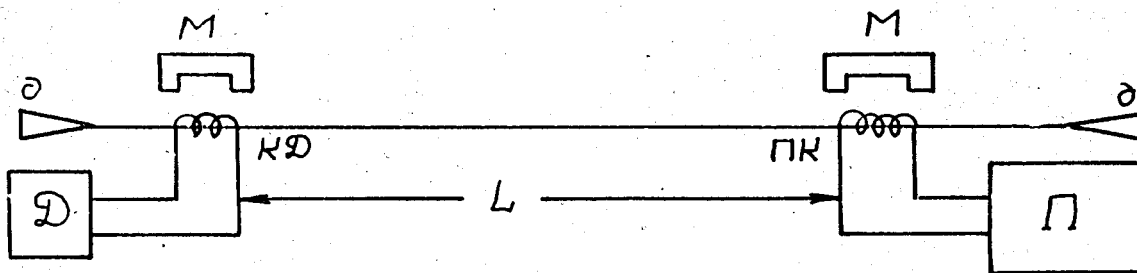
11. T.B. Thompson, J.A.M. Lyon, *Proc. National Electr. Conf.*, 1955, v. XI, p. 791.
12. A. Rothbart, L. Rossenberg, *IRE Trans. PGUE-6*, 1957, pp. 32-53.
13. R.C. Williams, *IRE Trans. PGUE-7*, 1959, pp. 16-33.
14. H. Epstein, O.B. Stram, *PGUE-5*, 1957, pp. 1-24.
15. H. Epstein, O.B. Stram, *Rev. Sci. Inst.* 1953, v. 24 No 3, p. 231.
16. *IRE Transactions on Aeronautical and Navigational Electronics* 1956. v. 3, No 3, p. 113-116.
17. D. Maeder *Helv. Physica Acta* 1957, v. 30, VIII, p. 347.
18. H.L. Schultz, G.F. Pieper, L. Rosler, *Rev. Scin. Instr.* 1956, 27, p. 437.
19. D. Maeder *Helv. Physica Acta* 1956, 29, p. 459.
20. D. Maeder *Helv. Physica Acta* 1956, 29, p. 265.
21. *Proc. IEE* 1955, part B v 102, No. 4, p. 412-425.
22. R.C. Robbins, R. Millership, *Symposium on Automatic Digital Computation N.P.L.*, 1953, March.
23. E.M. Bradburd, *Electrical Communication* 1951, v. 28, No. 1, p. 46-53.
24. G.G. Scarrott, R. Naylor, *Journ. IEE* v. 2, 1956, No. 22, p. 617.
25. *Journ. IEE.* 1956, No. 23, p. 681-683.
26. *Proc. IEE.* 1956, Part B v. 103, No. 3, p. 497-508.
27. G.G. Scarrott, *Nuclear Instr.* 1958, v. 2, No. 2, p. 101.
28. R.C. Robbins, A.E. De Barr, *British Journ. Appl. Phys.*, 1951, v. 2, No. 10, p. 304.
29. A. Rothbart, *Proc.*, 1959, v. 47, No. 6, p. 1163.
30. A. Tustin, *J. IEE*, 1947, part II A. p. 130.
31. H.F. Olson, *Dynamical Analogies*, 1943, New York, D. van Nostrand Company, Inc.
32. E. Giebe, E. Blechschmidt, *Annalen der Physik* 1933, 5 band 18, S 417.
33. G.J. Cohn, *Proc. National Electr. Conf.* 1957, v. XIII, pp. 77-88.



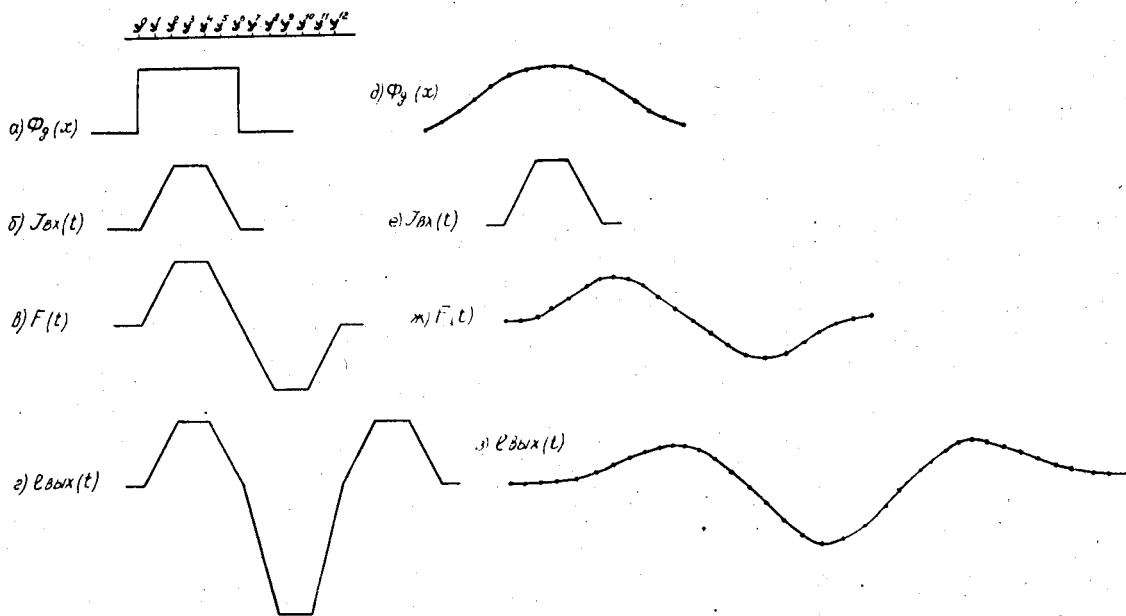
Фиг. 1. Зависимость относительной деформации от напряженности магнитного поля. 1 - никель, 2 - 45% пермаллой, 3 - железо.



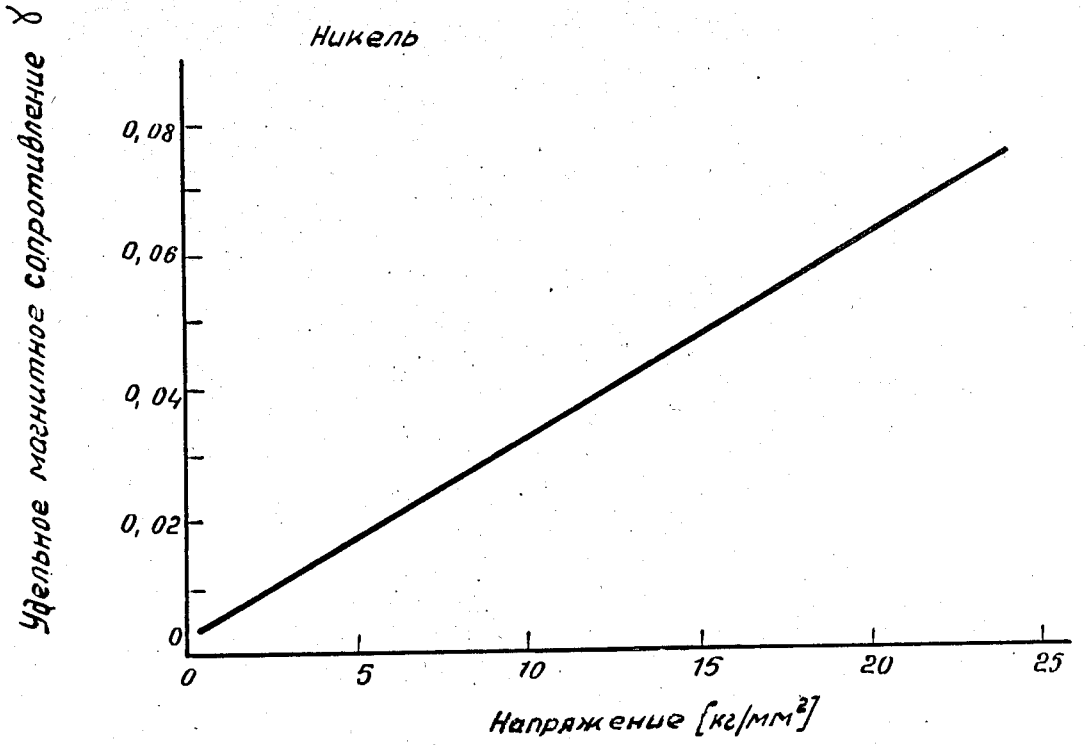
Фиг. 2. Зависимость начальной магнитной проницаемости от механического напряжения.



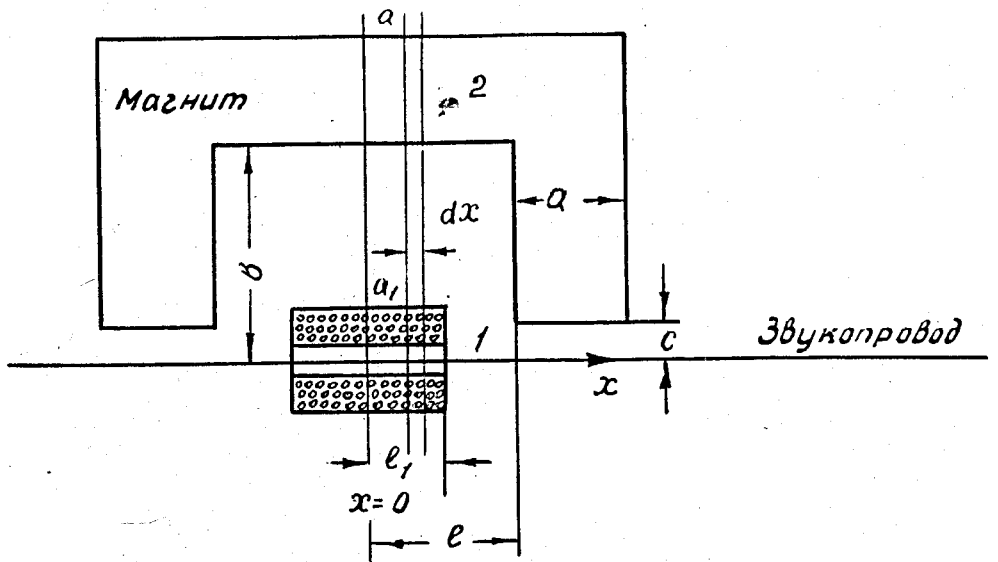
Фиг. 3. Принципиальная схема магнитострикционной линии.



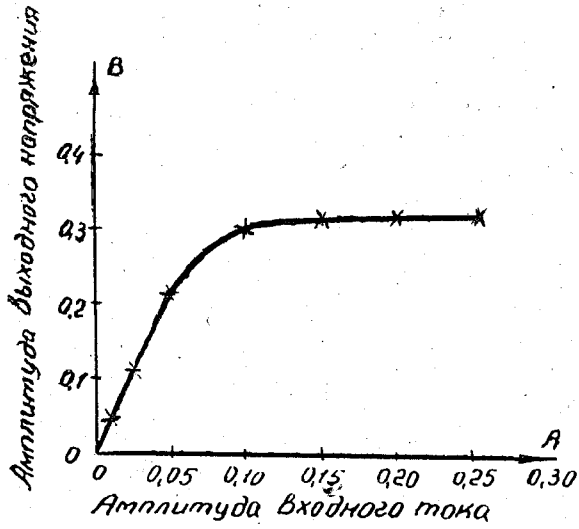
Фиг. 4. Форма импульсов в магнитострикционной линии.



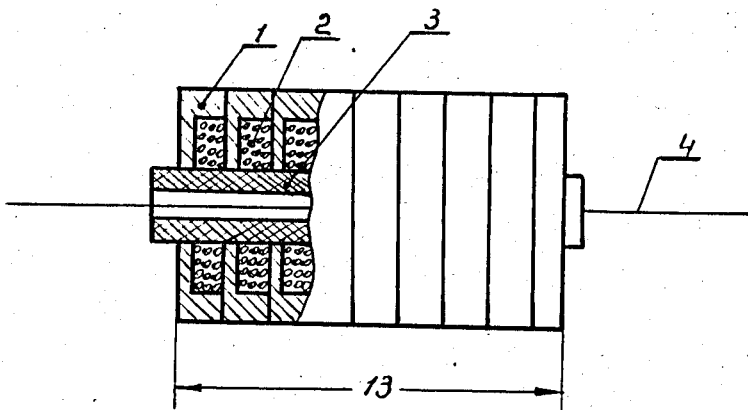
Фиг. 5. Зависимость удельного магнитного сопротивления звукопровода от механического напряжения.



Фиг. 6. Магнитная цепь преобразователя.



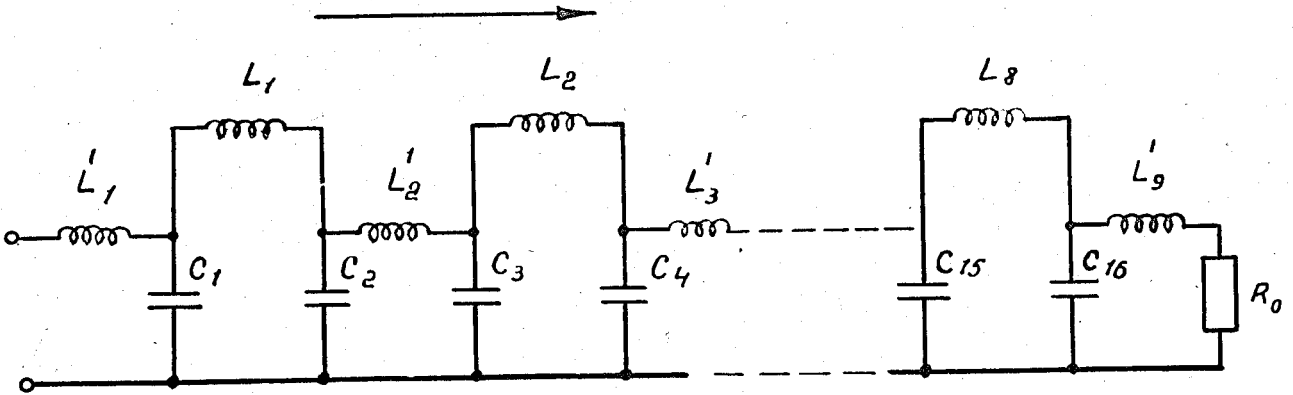
Фиг. 7. Зависимость выходного напряжения от входного тока.



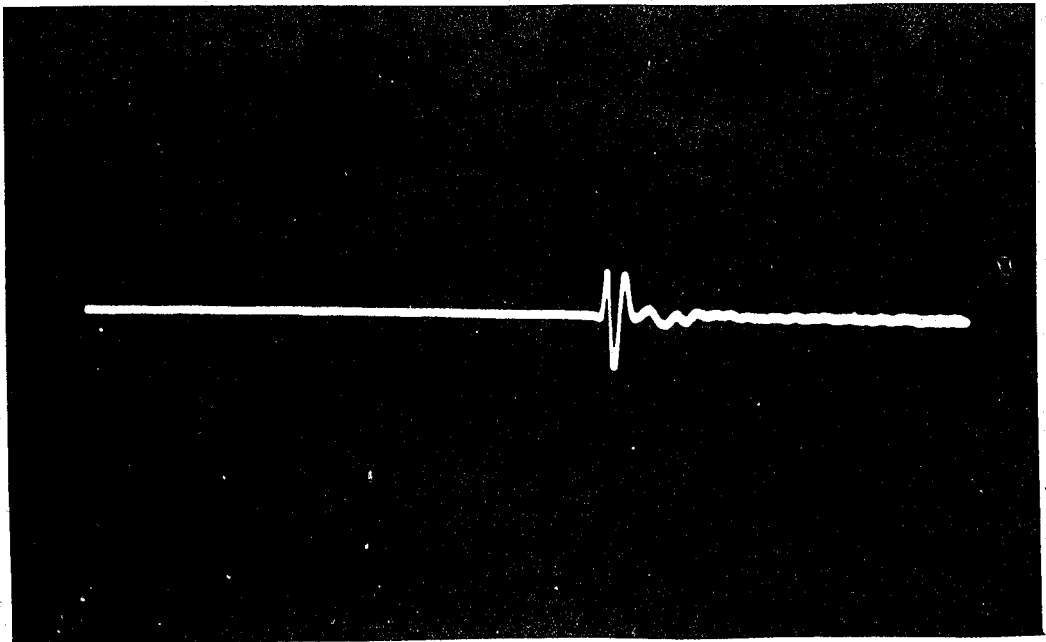
1. Ферритовый экран.
2. Катушки.
3. Каркас.
4. Звукпровод.

Фиг. 8. Конструкция распределенного преобразователя.

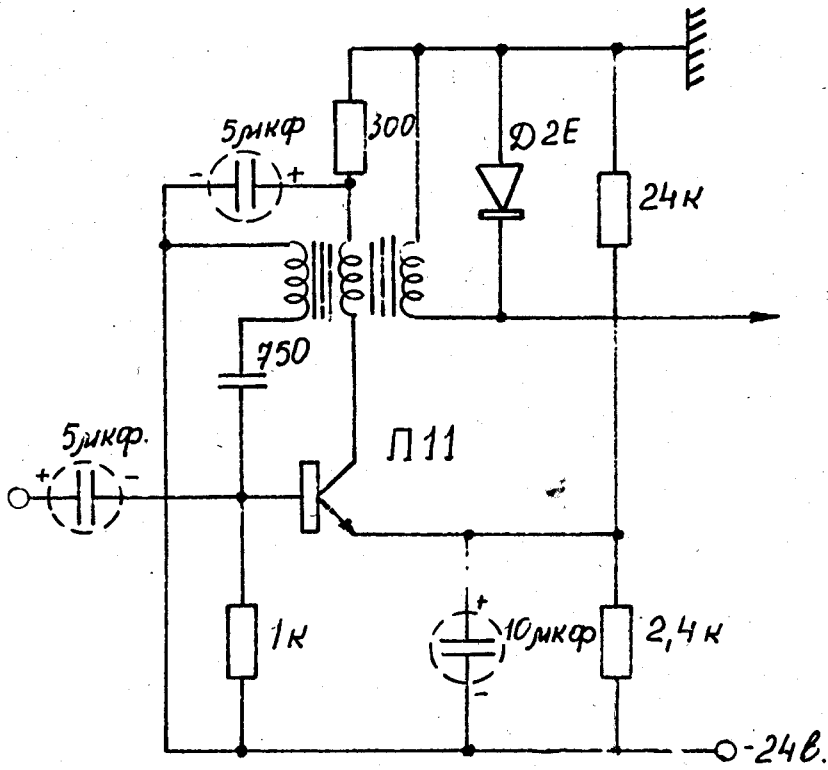
Направление сигнала



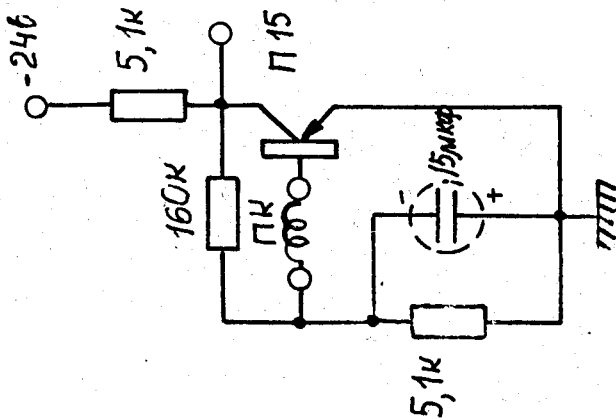
Фиг. 9. Принципиальная схема распределенного преобразователя.



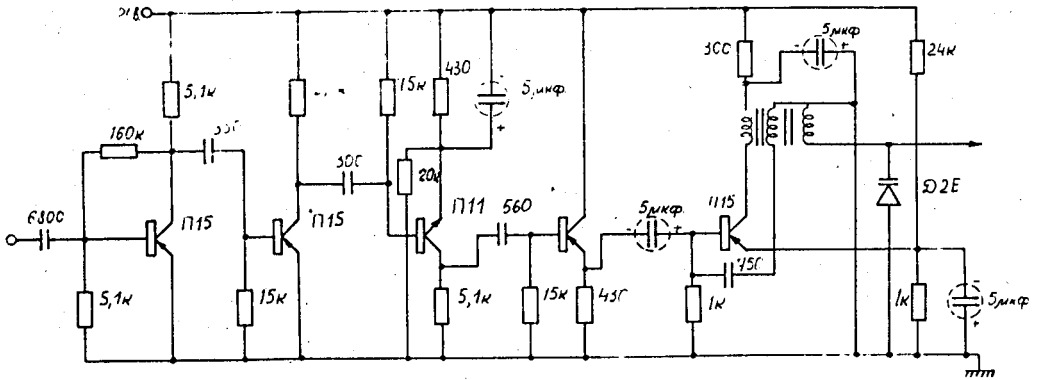
Фиг. 10. Осциллограмма сигнала на выходе магнитострикционной линии
 t задержки = 1000 мксек.



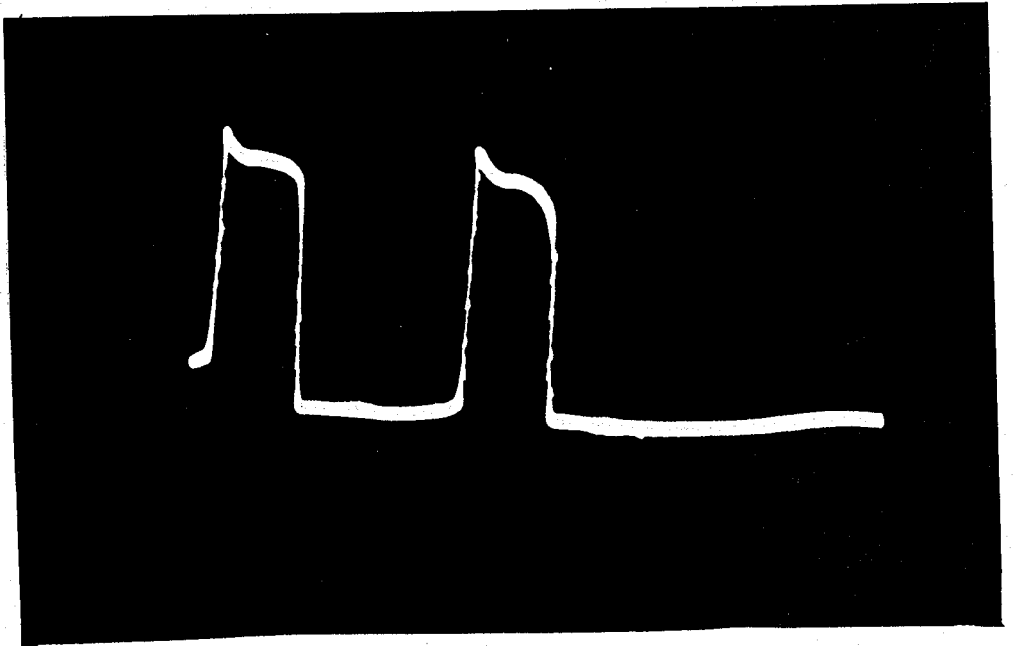
Фиг. 11. Схема полупроводникового датчика.



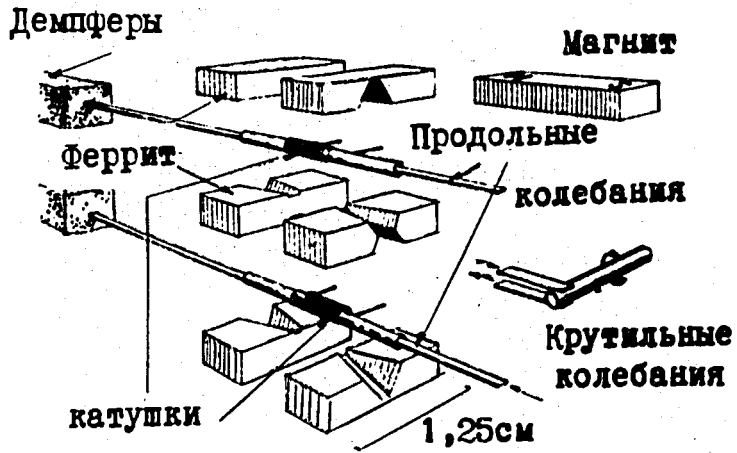
Фиг. 12. Первый каскад приемного преобразователя.



Фиг. 13. Схема полупроводникового приемника.



Фиг. 14. Сформированные сигналы на выходе линии.



Фиг. 15. Принцип устройства преобразователя крутильных колебаний.