

## ЛИНИЯ ЗАДЕРЖКИ С МАГНИТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Л. М. АНАНЬЕВ, Я. С. ПЕККЕР

(Представлена научным семинаром кафедры промэлектроники)

В различных радиотехнических устройствах применяются искусственные линии задержки для формирования прямоугольных импульсов малой длительности и получения постоянного запаздывания импульсных сигналов от десятых долей мксек. до десятков мксек. Такие линии обычно выполняются на индуктивно-емкостных элементах, соединенных последовательно, каждый из которых представляет собой  $LC$ -фильтр нижних частот.

Широкое применение искусственных линий задержки обусловлено их простотой, малой стоимостью и практически неограниченным сроком службы, что является бесспорным преимуществом их по сравнению с различными электронными схемами, предназначенными для тех же целей.

В целом ряде радиотехнических устройств необходимо получать управляемое запаздывание сигнала, что достигается применением соответствующих электронных схем, замена которых управляемыми линиями задержки (УЛЗ) может существенно повысить надежность этих устройств.

Линия задержки характеризуется основными параметрами: волновым сопротивлением —  $\rho_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$  и величиной задержки —  $\tau_{30} = n\sqrt{LC}$  ( $n$  — число звеньев линии). Очевидно, что для получения управляемой задержки необходимо изменять хотя бы один из элементов линии —  $L$  или  $C$ , или число ее звеньев.

При разработке управляемых линий задержки необходимо учитывать особенности устройств, в которых должна работать УЛЗ. Основными и общими требованиями, предъявляемыми к УЛЗ, следует считать: малый вес и габариты, простоту схемы управления, большой диапазон изменения времени задержки, а также согласование УЛЗ с нагрузкой во всем диапазоне регулирования.

В настоящее время для регулирования времени задержки чаще всего применяется ступенчатое изменение либо числа звеньев линии [3], либо величины емкости линии [4]. Такая регулировка осуществляется механическим переключателем. Простота схемы управления и возможность изменения времени задержки в больших пределах являются достоинствами этих линий. Однако возникающие при переключении электрические шумы, а также скачкообразное изменение времени задержки путем переключений — существенные недо-

статки, которые затрудняют применение такого рода УЛЗ в ряде устройств, например, в схемах стабилизации, модуляции и др. Этим недостатком лишены УЛЗ с бесконтактной и плавной регулировкой задержки.

Для осуществления плавного изменения времени задержки искусственной линии необходимо предусмотреть возможность соответствующего регулирования параметров входящих в нее элементов.

Предварительные исследования показали, что наиболее перспективным является магнитное управление ЛЗ, временные характеристики которых регулируются путем изменения индуктивности ячеек (рис. 1, а). Индуктивность звеньев такой УЛЗ выполняется на тороидальных магнитных сердечниках. На каждом сердечнике, кроме обмотки  $L$ , помещена управляющая обмотка  $L_y$ . Для того, чтобы развя-

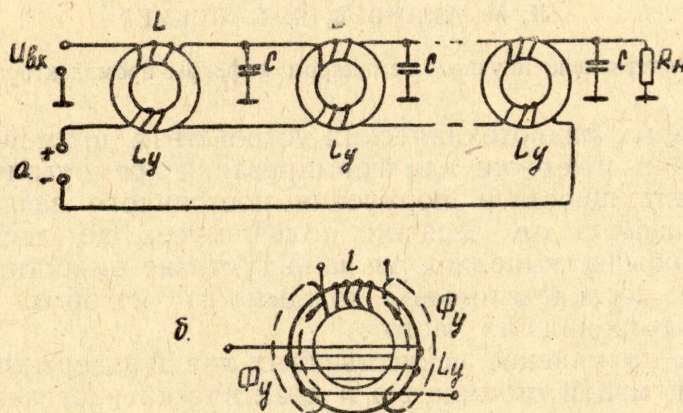


Рис. 1. а — схема линии задержки с магнитным управлением, б — размещение управляющей обмотки при нечетном числе звеньев линии,  $U_{вх}$  — входной сигнал,  $L$  — индуктивность звена,  $C$  — емкость звена,  $L_y$  — управляющая обмотка,  $R_n$  — сопротивление нагрузки,  $\Phi_y$  — магнитный поток управления

зять цепи сигнала и управления, обмотки  $L_y$  включаются попарно-встречно при четном числе звеньев, а при нечетном обмотка управления размещается на сердечнике, как показано на рис. 1, б. Такое размещение обмотки  $L_y$  препятствует прохождению импульсов по цепи управления, но затрудняет изготовление линии.

Принцип управления в данном случае основан на том, что при изменении тока подмагничивания сердечника меняется его магнитная проницаемость, а следовательно, меняется индуктивность звеньев и время задержки линии.

В качестве материала сердечника в данном случае наиболее целесообразно использовать ферриты, магнитная проницаемость которых [1, 2] в сильной степени зависит от величины тока подмагничивания. Причем эта зависимость тем ярче выражена, чем больше начальная проницаемость феррита —  $\mu_n$ . Зависимость действующей проницаемости феррита  $\mu_d$  от величины тока подмагничивания носит экспоненциальный характер и без учета гистерезиса аппроксимируется выражением

$$\mu_d = \mu_n e^{-\alpha I_y}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  — коэффициент, зависящий от состава феррита.

Учитывая это, определим зависимость времени задержки линии, ее волнового сопротивления и выходного напряжения от степени подмагничивания.

Индуктивность тороидальной обмотки определяется по известной формуле

$$L = \frac{0,4 \pi 10^{-8} \mu_d \omega^2 S_c}{l_c} [\text{гн}], \quad (2)$$

где  $\omega$  — число витков обмотки,

$S_c$  и  $l_c$  — сечение и средняя длина силовой линии сердечника соответственно.

Подставляя в выражении (2) значение  $\mu_d$ , получим

$$L_{\text{подм.}} = L e^{-a I_y}. \quad (3)$$

Откуда

$$\tau_{3\text{подм}} = \tau_{30} l^{-\frac{a}{2} I_y} \quad (4)$$

и

$$\rho_{\text{подм}} = \rho_0 l^{-\frac{a}{2} I_y}. \quad (5)$$

Таким образом, время задержки  $\tau_{3\text{подм}}$  и волновое сопротивление линии  $\rho_{\text{подм}}$  при подмагничивании изменяются по экспоненциальному закону. Изменение волнового сопротивления при регулировании времени задержки приводит к нарушению условий согласования линии с нагрузкой, что вызывает изменение амплитуды выходного сигнала по закону, который не трудно получить, используя эквивалентную схему замещения устройства рис. 2.

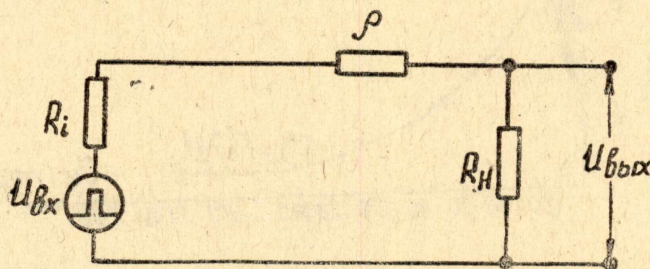


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения линии задержки:

$U_{\text{вх}}$  — генератор входных импульсов,  $U_{\text{вых}}$  — выходной сигнал,  $R_i$  — внутреннее сопротивление генератора входных импульсов,  $\rho$  — волновое сопротивление ЛЗ,  $R_H$  — сопротивление нагрузки

Из рис. 2 видно, что выходное напряжение

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} \frac{R_H}{R_H + R_i + \rho_{\text{подм}}}, \quad (6)$$

где  $R_i$  — внутреннее сопротивление источника входных импульсов,

$\rho_{\text{подм}}$  — волновое сопротивление УЛЗ,

$R_H$  — сопротивление нагрузки.

Учитывая, что  $\rho_{\text{подм}} = \rho_0 l^{-\frac{\alpha}{2} I_y}$ , можно записать

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} \frac{1}{1 + \frac{R_i}{R_n} + \frac{\rho_0}{R_n} l^{-\frac{\alpha}{2} I_y}} \quad (7)$$

Для проверки полученных зависимостей были изготовлены опытные образцы УЛЗ, экспериментальные характеристики одной из которых приведены на рис. 3 и находятся в хорошем соответствии с теоретическими.

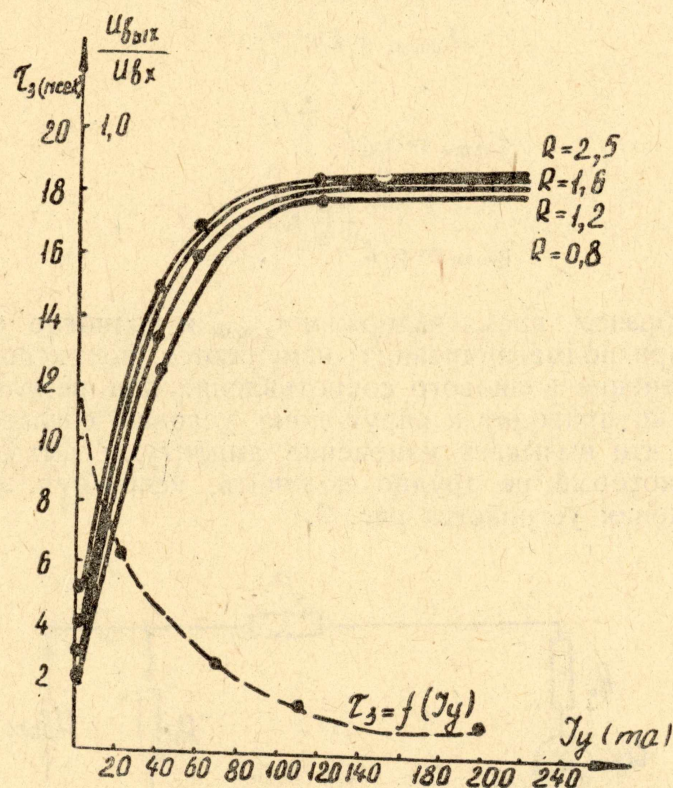


Рис. 3. Экспериментальные характеристики УЛЗ для различных сопротивлений нагрузки.  
Параметры УЛЗ: тип сердечника  $\Phi - 2000$ ,  $L_n = 10$  мм,  $W_L = 110$  вит.,  $W_{Ly} = 110$  вит.,  $C = 750$  пф,  $n = 10$

Экспериментальные исследования опытных образцов УЛЗ подтвердили возможность осуществления плавного регулирования времени задержки в широком диапазоне, который можно расширить введением дополнительного переключения звеньев линии.

Однако изменение выходного сигнала линии при подмагничивании не всегда приемлемо.

Рассмотрим условия, при которых выходной сигнал с УЛЗ остается постоянным. Очевидно, что для получения постоянного выходного сигнала необходимо, чтобы изменение волнового сопротивления УЛЗ было полностью скомпенсировано изменением хотя бы одной из величин, входящих в выражение (7). Внутреннее сопротивление источника сигнала  $R_i$  из конструктивных соображений не

всегда возможно изменять по определенному закону. Поэтому целесообразным является подключение согласующего элемента к сопротивлению нагрузки  $R_n$ , что позволяет менять по необходимому закону  $Z_n$ . Применение в данном случае чисто активного сопротивления в качестве согласующего элемента не желательно, так как это снижает к. п. д. устройства и, кроме того, необходимо создание потенциометров с заданной зависимостью  $R = f(\gamma)$  ( $\gamma$  — угол поворота движка потенциометра), причем в этом случае возможна лишь механическая регулировка.

Для изменения сопротивления нагрузки в качестве согласующих элементов могут быть применены электронная лампа или транзистор, но это приводит к усложнению схемы и уменьшению ее надежности.

Наиболее удобно получать  $Z_n = f(I_y)$  при последовательном или параллельном соединении  $R_n$  с согласующей управляемой индуктивностью  $x_L(I_y)$ .

Рассмотрим случай параллельного соединения согласующей управляемой индуктивности с  $R_n$ , который, на наш взгляд, является наиболее пригодным для стабилизации выходного напряжения с УЛЗ.

Выражение (7) в данном случае запишется в виде

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} \frac{Z_n(I_y)}{Z_n(I_y) + R_i + \rho(I_y)}. \quad (8)$$

Для получения постоянного выходного сигнала второй сомножитель в выражении (8) должен оставаться неизменным во всем диапазоне регулирования и равным некоторой величине

$$A = \frac{Z_{n_0}}{Z_{n_0} + R_i + \rho_0}, \quad (9)$$

где  $Z_{n_0} = \frac{x_{L_0} R_n}{x_{L_0} + R_n}$  — сопротивление нагрузки при  $I_y = 0$

После преобразований получим

$$Z_n(I_y) = \frac{x_L(I_y) \cdot R_n}{x_L(I_y) + R_n} = \frac{AR_i}{1-A} + \frac{A}{1-A} l^{-\alpha I_y}. \quad (10)$$

Решив (10) относительно  $x_L(I_y)$ , получим

$$x_L(I_y) = \frac{R_n \left( \frac{AR_i}{1-A} + \frac{A}{1-A} \rho_0 l^{-\alpha I_y} \right)}{R_n - \frac{AR_i}{1-A} - \frac{A \rho_0}{1-A} l^{-\alpha I_y}}. \quad (11)$$

При  $R_i = 0$  и  $R_n \gg 1$  величина согласующей управляемой индуктивности

$$x_L(I_y) = \frac{A}{1-A} l^{-\alpha I_y} = \frac{R_n x_{L_0}}{R_n + x_{L_0}} e^{-\alpha I_y}, \quad (12)$$

Такую зависимость  $x_L = f(I_y)$  легко осуществить, если применить индуктивность на феррите с подпиткой. Начальное значение  $x_{L_0}$  при  $I_y = 0$  определяется из условия согласования УЛЗ с нагрузкой. Так, например, при наилучшем согласовании

$$\rho_0 = Z_{n_0} = \frac{x_{L_0} R_n}{R_n + x_{L_0}}. \quad (13)$$

Откуда

$$x_{L_0} = \frac{\rho_0 R_H}{R_H - \rho_0}. \quad (14)$$

Таким образом, введение согласующей управляемой индуктивности параллельно сопротивлению нагрузки позволяет просто осуществить стабилизацию выходного сигнала с УЛЗ.

Возможность практического применения ЛЗ с магнитным управлением зависит от ее габаритов и потребляемой мощности. Габариты УЛЗ без переключения звеньев в основном определяются размерами ферритовых сердечников, а потребляемая мощность — величиной  $AW_y$  управления. В связи с этим определим минимальный объем сердечника и оптимальную величину  $AW_y$  управления.

Для полного использования материала магнитопровода необходимо, чтобы сердечник работал на предельном частном цикле. При этом за время действия импульса в сердечнике создается индукция

$$\Delta B = B_s - B_r = \frac{100 U_i \tau_i}{W_L S_c}, \quad (15)$$

где  $B_s$  и  $B_r$  — индукция насыщения и остаточная индукция сердечника соответственно,

$U_i$  — амплитуда входного импульса,

$\tau_i$  — длительность входного импульса, и напряженность поля

$$\Delta H = H_m = \frac{0,4 \pi \omega I_i}{l_c}, \quad (16)$$

где  $H_m$  — напряженность поля, при которой происходит насыщение сердечника;

$I_i$  — ток в импульсе.

Из выражений (15) и (16) находим минимальный объем сердечника

$$V_{c \min} = S_c \cdot l_c = \frac{40 \pi U_i I_i \tau_i}{\Delta B H_m}. \quad (17)$$

Для регулирования времени задержки в наибольшем диапазоне напряженность поля подмагничивания должна меняться от нуля до  $H_m$ , т. е.

$$AW_y = \frac{H_m l_c}{0,4 \pi}. \quad (18)$$

Решая соответственно уравнения (17) и (18), получим оптимальное значение

$$AW_y = \frac{100 U_i I_i \tau_i}{\Delta B S_c}. \quad (19)$$

Следует отметить, что полученные выражения справедливы для прямоугольных импульсов. Можно показать, что  $V_{c \min}$  и  $AW_y$  в сильной степени зависят от формы сигнала, поступающего на вход линии. Например, для часто встречающегося параболического импульса минимальный объем сердечника уменьшается примерно в 2 раза, а  $AW_y$  — в 5 раз при всех прочих равных условиях.

Таким образом, линия задержки с магнитным управлением является простым и надежным устройством, позволяющим получать плавно регулируемое запаздывание. Благодаря этим качествам такие ЛЗ могут найти широкое применение в различных радиотехнических устройствах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Л. И. Рабкин. Высоочастотные ферромагнетики, М. Физматгиз, 1960.
2. Л. И. Рабкин, Б. Ш. Эпштейн. Неметаллические ферромагнетики в аппаратуре связи. Связьиздат, 1952.
3. Электроника, 1963, № 3, 11, 40.
4. Л. М. Знаменский. Регулируемые искусственные линии. Связьиздат, 1961.