

**РАСЧЁТ СКВАЖНОСТИ УПРАВЛЯЮЩИХ ИМПУЛЬСОВ
ДЛЯ КЛЮЧЕВОЙ СХЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

© 2012 г. А.С. ПИЛИПЕНКО, А.Ф. ГЕЙЕР*

Волгоградский государственный университет,

*ООО «Аврора», г. Волгоград

Данная работа касается возбуждения электроакустического пьезопреобразователя в ключевой схеме с накопительной индуктивностью. Эта схема позволяет при низком напряжении питания получить значительную энергетическую отдачу резонансной пьезоэлектрической нагрузке [1]. Существо процесса, происходящего в схеме, это переходные процессы накопления и отдачи энергии накопительной индуктивностью, повторяющиеся с частотой резонансных колебаний пьезопреобразователя. В случае возбуждения мощных электроакустических преобразователей, например преобразователей для мощных сирен и других звукоизлучающих устройств, важное значение имеет экономичность энергопотребления. Экономичность в частности зависит от оптимального соотношения времён накопления и отдачи энергии.

Упрощённая схема оконечного устройства представлена на Рис. 1а. Она включает в себя ключ Кл, в качестве которого может быть полевой или биполярный транзистор, пьезопреобразователь П, накопительную индуктивность L, диод D и источник ЭДС E.

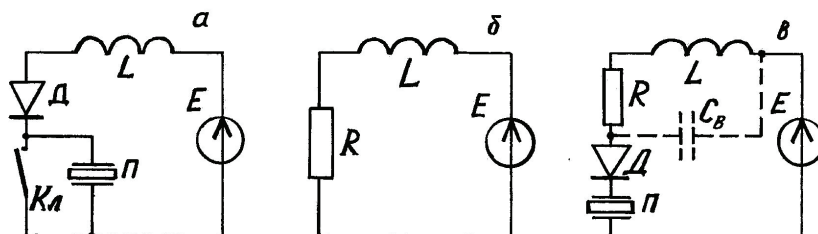


Рис. 1. Упрощённая схема оконечного ключевого устройства с накопительной индуктивностью.

Эквивалентная схема для случая замкнутого ключа изображена на Рис. 1б. В момент замыкания ключа через индуктивность протекает ток i по закону [2]:

$$i = \frac{E}{R_1} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (1)$$

Здесь $\tau = L/R_1$ - постоянная времени нарастания тока в фазе накопления энергии.

На Рис. 1в изображена эквивалентная схема, соответствующая разомкнутому состоянию. В этой цепи ток подчиняется закону:

$$i = i(0)e^{-\frac{t}{\tau'}} \quad (2)$$

Здесь $i(0) = E/R_1$ - величина тока, определённая по (1), в момент времени, предшествовавший размыканию; $\tau' = L/R_2$ - постоянная времени протекания тока че-

рез нагрузку в фазе отдачи энергии. Сопротивление R_2 является эквивалентным сопротивлением пьезопреобразователя на резонансе и представляет собой активную нагрузку для первой гармоники импульсного напряжения. В момент размыкания ключа в силу наличия межвитковой ёмкости в катушке возникают высокочастотные (порядка 100 кГц) колебания. Поэтому под током i в (2) будем понимать «выпрямленный» диодом D высокочастотный ток [2].

В состоянии с замкнутым ключом происходит накопление энергии в индуктивности, а после размыкания, её отдача в нагрузку. При этом времена нахождения в состоянии с замкнутым и разомкнутым ключом могут различаться. Возможна ситуация, когда накопленная энергия полностью потреблена нагрузкой, а ресурс времени ещё не израсходован. В этом случае целесообразно увеличить время накопления энергии за счёт сокращения времени её отдачи и это даст выигрыш по звуковому давлению. Возможен и другой случай, когда накопленная энергия может быть до конца периода не израсходована и тогда следует уменьшить время для накопления энергии, увеличив время для её отдачи. Однако это приведет к увеличению среднего тока, потребляемого схемой. Результатом расчёта должно быть определение оптимального соотношения времени накопления и времени отдачи энергии (оптимальной скважности импульсов, управляющих ключом). Для этого необходимо получить выражение для потреблённой энергии как функции скважности и исследовать его на максимум.

Для упрощения расчёта воспользуемся тем обстоятельством, что начальный ход экспоненты, когда рассматривается временной интервал в несколько раз меньше постоянной времени, очень близок к линейной зависимости. Поэтому аппроксимируем выражение (1) линейной зависимостью в пределах периода звуковых колебаний, при условии, что постоянная времени равна утроенному периоду. Учитывая последнее обстоятельство, а также определение постоянной времени, представим (1) в следующем виде.

$$i = \frac{3ET}{L} \left(1 - e^{-\frac{t}{3T}}\right)$$

Определим тангенс угла наклона, как производную в середине периода и получим хорошее, в пределах периода, линейное приближение:

$$i = 0,84 \frac{E}{L} t$$

Определим скважность b как отношение периода к длительности фазы накопления энергии. Тогда в момент размыкания цепи ток достигнет значения

$$i(0) = 0,84 \frac{ET}{bL} \tag{3}$$

После размыкания ток в цепи, достигнув значения $i(0)$ согласно (3), начинает убывать с постоянной времени τ' :

$$\tau' = \frac{L}{R_2}$$

Подставив значения τ' и $i(0)$ в (2), получим закон изменения свободного тока в фазе отдачи энергии.

$$i_{св} = 0,84 \frac{ET}{bL} e^{-\frac{R_2 t}{L}}$$

Отдача энергии будет происходить в течение интервала от 0 до $T - T/b$. В этот же промежуток времени через нагрузку протекает принуждённый ток i_{np} источника ЭДС, величина которого равна E/R_2 . Энергия, отдаваемая в нагрузку в течение указанного интервала, будет равняться:

$$W = \int_0^{T(1-1/b)} (i_{св} + i_{np})^2 R_2 dt = \int_0^{T(1-1/b)} \left(0,7 \frac{E^2 R_2 T^2}{L^2 b^2} e^{-\frac{2R_2 t}{L}} + 1,68 \frac{E^2 T}{Lb} e^{-\frac{R_2 t}{L}} + \frac{E^2}{R_2} \right) dt =$$

$$= 0,35 \frac{E^2 T^2}{Lb^2} \left(1 - e^{-\frac{2R_2 T(1-b)}{bL}} \right) + 1,68 \frac{E^2 T}{R_2 b} \left(1 - e^{-\frac{R_2 T(1-b)}{bL}} \right) + \frac{E^2 T(b-1)}{R_2 b} \quad (4)$$

Выражение (4) определяет величину энергии, отданную в нагрузку в течение части периода, когда ключ разомкнут, при условии, что к моменту размыкания ток в индуктивности достиг величины, определяемой (3). Необходимо определить, при каком соотношении времён накопления и отдачи энергии, эта энергия будет максимальна. То есть необходимо исследовать результат на максимум при переменной скважности. После вычисления производной и приравнивания её к нулю получим следующее уравнение.

$$\frac{1}{b^4} \left[\frac{0,7T}{L} \left(b + \frac{R_2 T}{L} \right) e^{-\frac{2R_2 T(1-b)}{bL}} + 1,68 \left(\frac{b^2}{R_2} + \frac{bT}{L} \right) e^{-\frac{R_2 T(1-b)}{bL}} - \frac{0,7bT}{L} - 0,68 \frac{b^2}{R_2} \right] = 0$$

Решением этого уравнения при параметрах схемы $L = 5 \cdot 10^{-3}$ Гн, $R = 100$ Ом, $T = 0,4 \cdot 10^{-3}$ с является $b = 1,2$. Для указанных значений параметров вычислены значения энергии при различных величинах скважности. График этой зависимости в масштабе мощности приведен на Рис. 2 (сплошная линия).

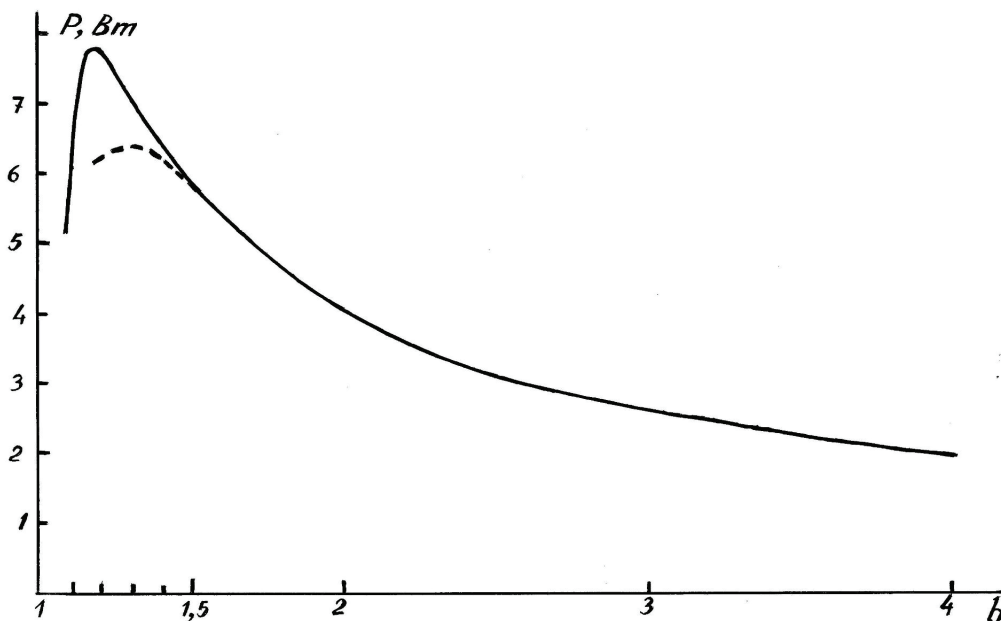


Рис. 2. Теоретическая (сплошная линия) и экспериментальная (пунктирная линия) зависимости отдаваемой в нагрузку мощности от скважности запускающих импульсов.

Тот факт, что теоретический максимум при заданных значениях параметров наблюдается при скважности 1,2, физически легко объяснить. Вычислим постоянную RL-цепи в фазе отдачи энергии

$$\tau = \frac{L}{R_2} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{100} = 0,05 \text{ мс}$$

Время для отдачи энергии при скважности 1,2 равно 0,067 мс. Это время составляет $1,3\tau$ и легко убедиться, что к окончанию периода неизрасходованная энергия составит 0,068 от запасённой и эта часть далее будет всё больше расти, обгоняя прирост, в результате чего отданная в нагрузку энергия будет резко падать.

На Рис. 2 пунктирной линией показана экспериментальная зависимость. При скважности менее 1,5 заметного роста отдаваемой в нагрузку мощности не наблюдается. По-видимому, это объясняется главным образом неидеальностью катушки индуктивности, качеством ферромагнитного материала. Поэтому нецелесообразно устанавливать скважность меньше, чем 1,5–1,6. В противном случае будет неоправданно расти ток потребления без увеличения отдачи мощности. Вычислим ток, потребляемый конечным устройством, при указанных выше параметрах схемы с учётом линейной аппроксимации и скважности 1,5.

$$i(0) = 0,84 \frac{ET}{bL} = 0,84 \frac{12 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3}}{1,5 \cdot 5 \cdot 10^{-3}} = 0,64 \text{ А}$$

Это максимальный ток в импульсе. Средний ток импульса составит 320мА, а за период - 214мА.

На основании полученных результатов следуют выводы, имеющие значение для обоснования требований к конечному устройству возбуждения электроакустического преобразователя:

-Скважность запускающих импульсов следует выбирать из условия, чтобы в течение $2/3$ периода было накопление энергии, а $1/3$ периода использовалась для её отдачи.

-Величина тока в импульсе достигает 640мА, что необходимо учитывать при выборе ключевого транзистора.

-Полученные зависимости будут полезны для расчёта при любых сочетания параметров схемы и сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гейер А.Ф. Пьезокерамические излучатели звука (звонки, оповещатели) [Электронный ресурс]. URL: http://avrora-binib.ru/index.php?option=com_content&task=view&&id=81&Itemid=36 (дата обращения: 29.09.2012).
2. Лосев А.К. Теория линейных электрических цепей.– М.: Высшая школа, 1987, 512 с.