

ИМПУЛЬСНЫЙ МОДУЛЯТОР С НЕОДНОРОДНОЙ ИСКУССТВЕННОЙ ЛИНИЕЙ

Н. И. ВОРОБЬЕВ

(Представлено научным семинаром физико-технического факультета)

Рассматривается модулятор с выходным импульсным трансформатором. Предлагается корректировать форму импульса напряжения на нагрузке путем замены формирующей однородной искусственной линии на неоднородную. Указывается на возможность сокращения веса импульсного трансформатора. Дан метод расчета неоднородной цепной линии.

Введение

Рассматриваемый тип модулятора (рис. 1) широко применяется в различных импульсных устройствах, на выходе которых требуется получить прямоугольный импульс напряжения. Идеальными формирующими двух-

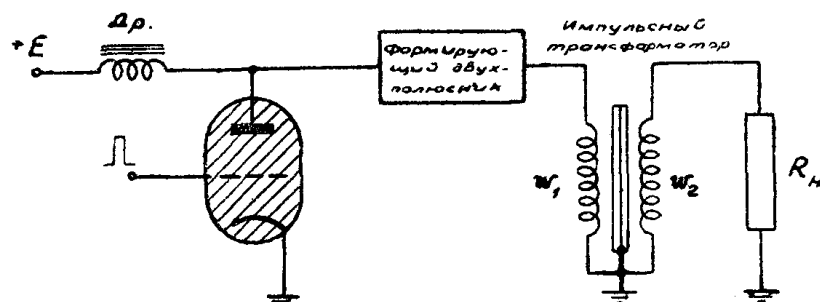


Рис. 1

полюсниками являются длинные линии, но техническое использование их является нецелесообразным ввиду больших габаритов и весьма низкого волнового сопротивления [1].

Обычно в качестве формирующих двухполюсников используются однородные цепные линии (рис. 2). Использование цепной линии в каче-

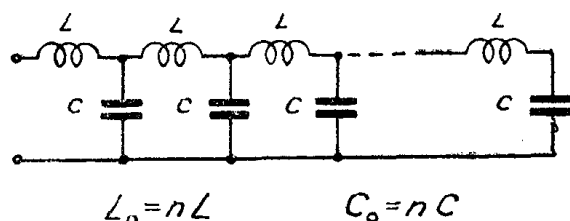


Рис. 2

стве формирующей схемы выражает стремление заменить линию с распределенными параметрами искусственной линией.

В ряде случаев форма импульса на нагрузке может существенно отличаться от прямоугольной (рис. 3). Основными искажениями являются увеличение длительности фронта t_{ϕ} и снижение плоской части ΔU импульса.

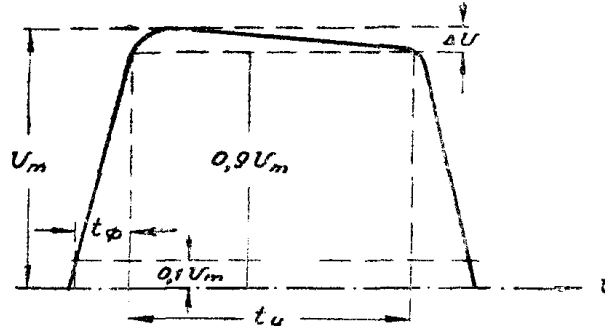


Рис. 3

Длительность фронта определяется из выражения [1].

$$t_{\phi} = k_{\phi} \cdot \frac{\sqrt{L_p \cdot C_n}}{\sqrt{1 + \frac{R_z}{R'_H}}}, \quad (1)$$

где

k_{ϕ} — коэффициент активной длительности фронта импульса,

L_p — индуктивность рассеяния трансформатора,

C_n — суммарная величина паразитной емкости трансформатора и нагрузки, приведенная к первичной обмотке,

R_z — внутреннее сопротивление модулятора,

R'_H — сопротивление нагрузки, приведенное к первичной обмотке трансформатора.

Снижение плоской части импульса при $R'_H = R_z$ [1]

$$\Delta U = \frac{1}{2} I_k \cdot R_z = 40 \frac{L_c \cdot t_u \cdot U_1 \cdot R_z}{\omega_1^2 \cdot S_c \cdot \mu_k}, \quad (2)$$

где

I_k — ток кажущегося намагничивания трансформатора при $t = t_u$,

L_c — средняя длина магнитной цепи,

S_c — сечение сердечника,

ω_1 — число витков первичной обмотки трансформатора,

μ_k — кажущаяся проницаемость.

Из сопоставления формул (1 и 2) видно, что требования минимальной длительности фронта и минимального снижения плоской части являются противоречивыми [2]. Для одного и того же напряжения U_1 и длительности импульса t_u трансформатор, рассчитанный на хорошее воспроизведение плоской части, будет значительно увеличивать длительность фронта, а трансформатор, рассчитанный на хорошее воспроизведение фронта, будет давать большое снижение плоской части импульса. По мере увеличения произведения $t_u \cdot U_1$ получить хорошую форму импульса становится все труднее.

Для ряда применений (как, например, для магнетронных генераторов) требуются импульсы хорошей прямоугольной формы. Задачу получения прямоугольного импульса напряжения можно значительно легче решить, если вместо однородной искусственной линии применить неоднородную искусственную линию.

Неоднородная искусственная линия как формирующий двухполюсник

За последние годы неоднородные линии с распределенными параметрами находят все более широкое применение в качестве широкополосных трансформаторов сопротивления, цепей временной задержки, фильтров, коаксиальных спиральных линий в усилителях сантиметрового диапазона и т. д. Они могут быть также использованы в качестве линий, формирующих импульсы специальной формы.

Любая неоднородная линия достаточно полно характеризуется тремя параметрами: погонным последовательным сопротивлением $z(x)$, параллельной погонной проводимостью $y(x)$ и эквивалентным сопротивлением линии $\rho(x)$ в точке x , с учетом граничных условий [3]. Эквивалентное сопротивление определяется как отношение напряжения к току в данной точке линии

$$\rho(x) = \frac{u(x)}{i(x)}. \quad (3)$$

Пусть неоднородная линия (рис. 4), эквивалентное сопротивление $\rho(x)$ которой изменяется от точки к точке и уменьшается по мере роста коор-

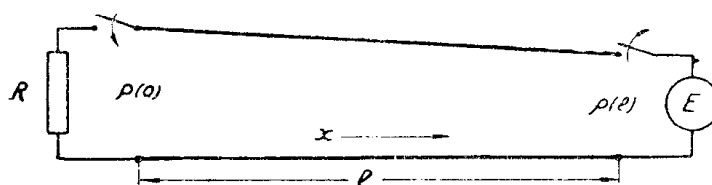


Рис. 4

динаты x , заряжена предварительно до напряжения E . Если теперь линию замкнуть на сопротивление $R = \rho(0)$, отключив ее при этом от источника напряжения, то форма волн напряжения и тока в линии будет аналогичной показанной на рис. 5.

Следовательно, если эквивалентное сопротивление линии с ростом координаты x монотонно убывает (растет), то напряжение на нагрузке R монотонно растет (убывает). Характер изменения ординаты $u(t)$ импульса (рис. 6) будет определяться характером изменения $\rho(x)$.

Вместо неоднородных линий с распределенными параметрами, из-за отмеченных выше недостатков, на практике удобнее применять неоднородные цепные линии (рис. 7). Волновое сопротивление W такой линии со стороны нагрузки в первом приближении

$$W_1 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}. \quad (4)$$

При согласовании с нагрузкой

$$W_1 = R'_n, \quad (5)$$

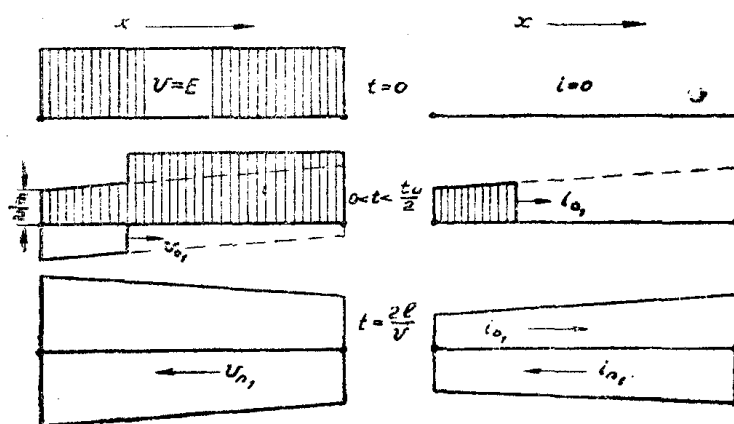


Рис. 5

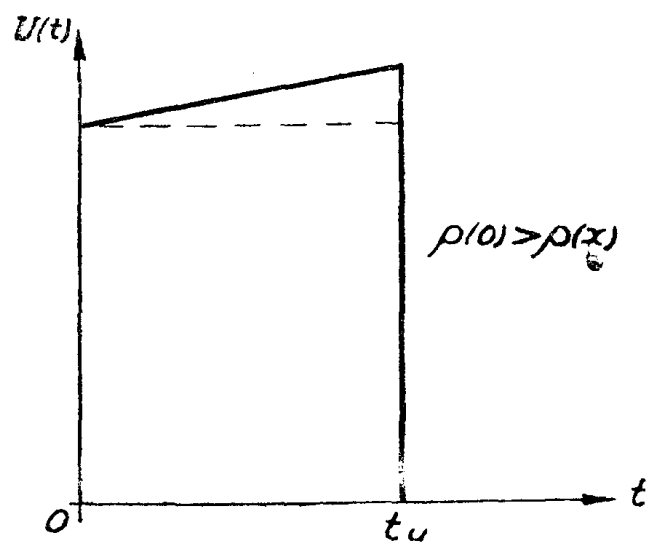


Рис. 6

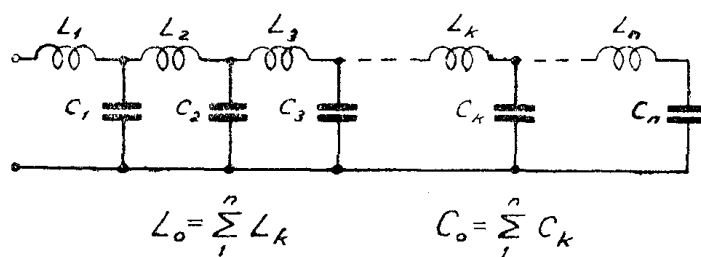


Рис. 7

а закон изменения волнового сопротивления $W_k = f(k)$ (здесь k — номер ячейки линии) определяется требуемой формой импульса.

Вследствие значительных математических трудностей в настоящей статье не делается попытки получить аналитические выражения, которые бы позволяли выбрать необходимый закон изменения параметров линии в зависимости от требуемой формы импульса.

Ставилась задача экспериментально проверить возможность использования неоднородной цепной линии в модуляторе для получения на нагрузке прямоугольного импульса, форма которого была бы лучше, чем при использовании однородной цепной линии.

Эксперименты показали, что, применяя неоднородную цепную линию, можно скорректировать значительное (до 20—25%) снижение плоской части импульса, которое имело бы место при использовании однородной линии.

На рис. 8 приводится осциллограмма импульса напряжения длительностью $t_u = 10$ мксек на нагрузке при формировании импульса однородной линией, а на рис. 9 показана осциллограмма импульса напряжения на нагрузке при формировании импульса неоднородной линией. Для сопоставления на рис. 10 приведена осциллограмма импульса, формируемого неоднородной линией.

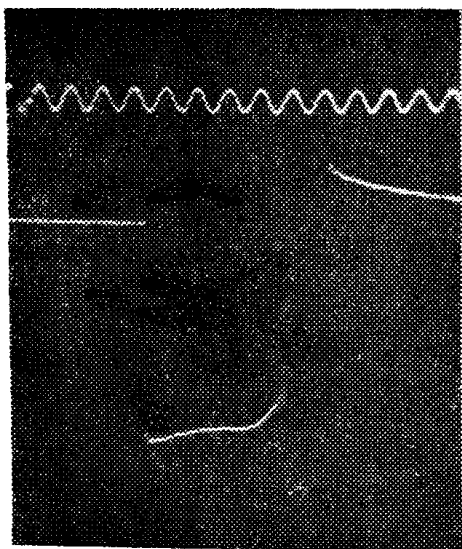


Рис. 8. Относительное снижение плоской части $\frac{\Delta u}{u} = 0,1$, калибровочная частота 500 кГц.

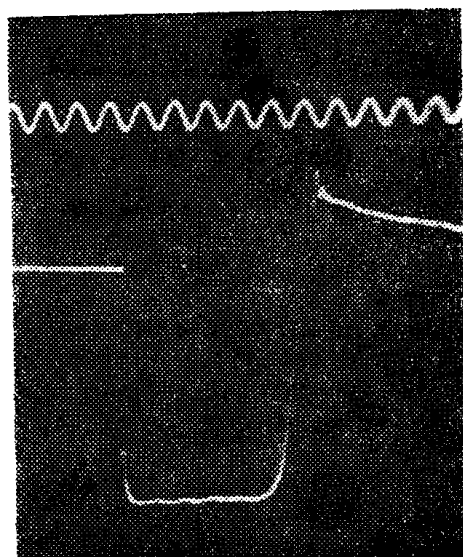


Рис. 9. Относительное снижение плоской части $\frac{\Delta u}{u} = 0$, калибровочная частота 500 кГц.

Таким образом, задача ставится принципиально по-новому. Применяя в модуляторе неоднородную линию, можно проектировать импульсный трансформатор, допуская значительное снижение плоской части импульса, которое бы имело место при формирующей однородной линии. Из формулы (2) следует, что при этом трансформатор может иметь или меньшее число витков обмоток w , или меньшее сечение сердечника S_c . Легко видеть, что при этом уменьшается вес трансформатора и увеличивается крутизна фронта трансформируемого импульса.

Следует указать, что в некоторых случаях, когда тепловой режим трансформатора весьма напряжен, применение неоднородной линии может

оказаться невозможным, если нет способа сделать охлаждение трансформатора более интенсивным. Однако для большинства случаев, когда требования к форме импульса высокие, а тепловой режим трансформатора не напряжен, использование неоднородной линии целесообразно.

А. И. М. М. М.

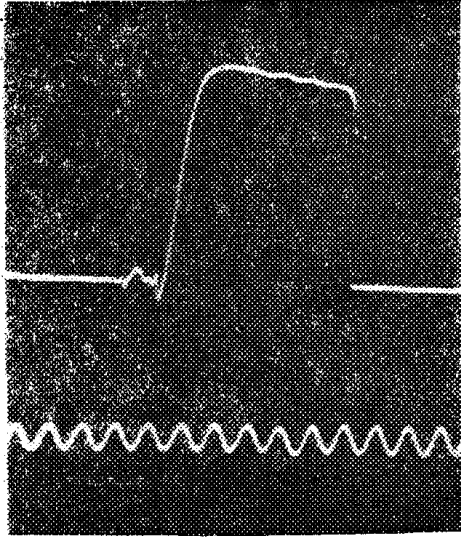


Рис. 10. Относительное повышение плоской части $\frac{\Delta u}{u}$, калибровочная частота 500 кГц.

Особенно хорошие результаты может дать использование неоднородных линий в высоковольтных модуляторах, например, применяемых в инжектирующих устройствах ряда ускорителей заряженных частиц, в импульсных магнетронных генераторах и т. п. Размеры импульсных трансформаторов в таких модуляторах определяются требованиями электрической прочности изоляции. Трансформаторы получаются весьма больших размеров, и получить желаемую форму импульса, оказывается, не всегда возможно.

В заключение следует привести расчетные соотношения для неоднородной цепной линии (рис. 7):

1. Индуктивность L_1 и емкость C_1 при числе ячеек линии n берутся такими же, как и для однородной линии [1]

$$L_1 = \frac{R'_n}{2 \cdot n} \cdot t_n \quad (6) \quad C_1 = \frac{1}{2 \cdot n \cdot R'_n} \cdot t_n \quad (7)$$

2. Для получения импульса заданной длительности t_n произведение суммарной индуктивности линии L_0 на суммарную емкость линии C_0 должно быть равно этому же произведению для случая однородной линии, формирующей импульс такой же длительности.

3. Наиболее плоская вершина импульса получается, когда

$$W_k = \sqrt{W_{k-1} \cdot W_{k+1}}, \quad (8)$$

где $W_k = \sqrt{\frac{L_k}{C_k}}$, а $k = 1, 2, 3, \dots, n$ — число ячеек линии.

Величины W_1 , W_k и W_{k+1} связаны соотношением

$$W_1 = \frac{W_k^2}{W_{k+1}}. \quad (9)$$

4. Отношение $\frac{W_1 - W_n}{W_1}$ в первом приближении следует брать равным

удвоенному относительному снижению плоской части импульса

$$\frac{\Delta W_n}{W_1} = 2 \frac{\Delta U}{U}, \quad (10)$$

здесь: $\Delta W_n = W_1 - W_n > 0$.

Если снижение плоской части окажется недокорректированным или перекорректированным, то следует W_n взять несколько меньшим или большим расчетного (10).

5. Величины L_k и C_k (с учетом пункта 2) определяются из формул:

$$L_k = L_1 \frac{W_k}{W_1} \quad (11) \quad C_k = C_1 \frac{W_1}{W_k} \quad (12)$$

Из формул (6--12) определяются величины всех элементов линии.

Приложение

Пример электрического расчета неоднородной цепной линии

Рассчитанный и изготовленный импульсный трансформатор дает при трансформации прямоугольного импульса длительностью 10 $\mu\text{сек}$, сформированного однородной линией, относительный спад $\frac{\Delta U}{U} = 5\%$. Требуется

рассчитать неоднородную линию, которая бы скорректировала этот спад вершины при сохранении всех остальных параметров импульса неизменными. Сопротивление нагрузки $R'_n = 100 \text{ ом}$, число ячеек линии $n = 10$.

1. Индуктивность первой ячейки

$$L_1 = \frac{R'_n}{2 \cdot n} \cdot t_u = \frac{100 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 10} = 50 \text{ мкГн.}$$

Емкость первой ячейки

$$C_1 = \frac{1}{2 \cdot n \cdot R'_n} \cdot t_u = \frac{10^{-5}}{2 \cdot 100 \cdot 10} = 5000 \text{ пФ.}$$

2. Волновое сопротивление последней ячейки линии

$$W_{10} = W_1 \left(1 - 2 \cdot \frac{\Delta U}{U} \right) = 100(1 - 2 \cdot 0,05) = 90 \text{ ом.}$$

3. Волновые сопротивления остальных ячеек определяются из формулы (9), а индуктивности и емкости из формул (11 и 12). Результаты расчета сведены в табл. 1.

Таблица 1

Номер ячейки	W (омб)	L (мкГн)	C (пФ)
1	100,0	50,0	5000
2	98,8	49,4	5060
3	97,7	48,8	5120
4	96,6	48,3	5180
5	95,5	47,8	5230
6	94,3	47,1	5300
7	93,1	46,6	5370
8	92,0	46,0	5440
9	91,0	45,5	5500
10	90,0	45,0	5560

Проверяем: $L_0 = 474,5 \text{ мкГн}$, $C_0 = 52760 \text{ пФ}$

$$L_0 \cdot C_0 = 474,5 \times 52760 = 2,5 \cdot 10^7 \text{ мкГн. пФ.}$$

Для однородной линии получаем

$$L_0 \cdot C_0 = n^2 \cdot L \cdot C = 10^2 \times 50 \times 5000 = 2,5 \cdot 10^7 \text{ мкГн. пФ.}$$

4. Энергия, запасенная в однородной линии,

$$\frac{C_{00} \cdot U^2}{2},$$

5. энергия, запасенная в неоднородной линии,

$$\frac{C_{0н} \cdot U^2}{2}.$$

Следовательно, в неоднородной линии запасается энергии в $\frac{C_{0н}}{C_{00}}$ раз больше. В нашем примере

$$\frac{C_{0н}}{C_{00}} = \frac{52760}{50000} = 1,06,$$

т. е. на 6% больше. Эта энергия в основном рассеивается в импульсном трансформаторе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ицхоки Я. С. Импульсная техника. Издательство „Советское радио“, 1949.
 2. Матханов П. Н. К инженерному расчету мощных импульсных трансформаторов. „Радиотехника“ № 5, 1951.
 3. Ильин В. А. Длинные линии с изменяющимися по длине параметрами. „Электричество“ № 2, 1950.
-