

УДК 621.372.2

А. М. Стрельцов

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ
УДАРНЫХ ВОЛН В ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ
С МДП-ВАРИКАПАМИ

Рассмотрены различные формы профиля ударной волны, образующейся в среде без дисперсии с нелинейностью, аппроксимируемой кусочно-линейной функцией. Приведены осциллограммы искажения профиля синусоидальной волны в линии типа фильтра нижних частот с МДП-варикапами при различных напряжениях смещения.

В последнее время исследуются нелинейные свойства линий передачи, в которых в качестве нелинейных емкостей используются МДП-варикапы [1, 2]. Эти элементы обладают большой крутизной вольтфарадной характеристики, поэтому их применение позволяет в первую очередь сократить длину линии, необходимую для эффективного раз-

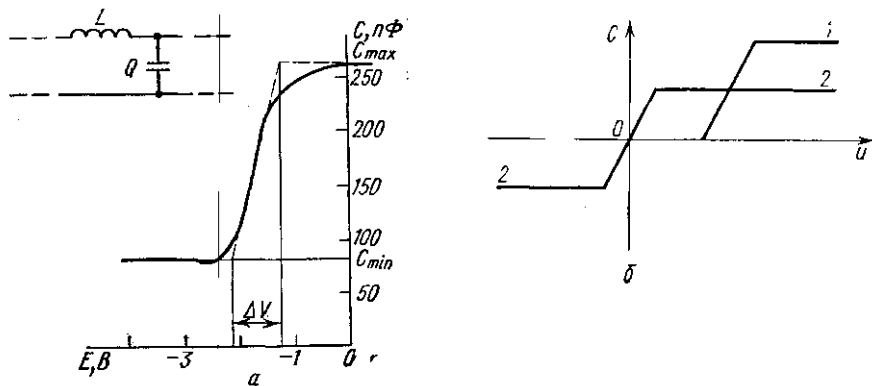


Рис. 1. Вольтфарадная характеристика МДП-варикапа и эквивалентная схема ячейки линии (а); зависимость нелинейной емкости от переменного напряжения при различных напряжениях смещения (б): 1 — при $E = -4$ и 2 — при $E = -1,7$ В

вития требуемого нелинейного процесса. С другой стороны, зависимость емкости МДП-варикапа от приложенного напряжения $C(E)$ имеет своеобразный ступенчатый вид (рис. 1, а) с четко выраженными областями насыщения. В настоящем сообщении рассматриваются особенности формирования ударных волн в среде без дисперсии с реактивной нелинейностью, аппроксимируемой кусочно-линейной функцией. Такая аппроксимация целесообразна для емкости МДП-варикапов при воздействии больших сигналов. Как следует из рис. 1, б, выбором постоянного смещения можно реализовать различные виды $C(u)$ (u — переменное напряжение).

Эксперименты проводились на линии, погонные параметры которой показаны на рис. 1, а. В качестве нелинейных емкостей использовались варикапы на основе МДП-структуры $Al - SiO_2/Si_3N_4 - Si - Al$, технологические параметры приведены в работе [1]. В линии применена коррекция дисперсионной характеристики с помощью введения небольшой положительной индуктивной связи между соседними индуктивностями. Согласование на входе и выходе осуществлялось с помощью потенциометров, КСВ в полосе пропускания не превышал 1,2. Качественно процесс образования и развития ударной волны дается уравнением для квазипростой волны $u = u\left(\mu x, t - \frac{x}{v_0 + \Delta}\right)$, которое может быть получено из волнового уравнения второго порядка приближенным методом Р. В. Хохлова [3]:

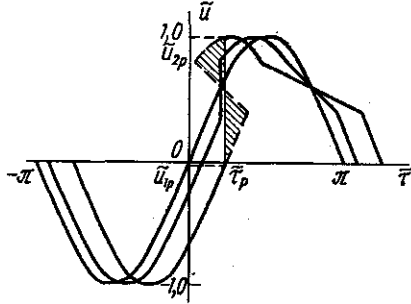


Рис. 2. Качественное графическое построение решения (3)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{v_0 L}{2} \frac{\partial Q_{\text{нел}}}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial \tau} + \frac{\Delta}{v_0^2} \frac{\partial u}{\partial \tau} = 0, \quad (1)$$

Здесь $Q_{\text{нел}}$ — нелинейная часть заряда на варикапе

$$Q = C_0 u + Q_{\text{нел}}(u), \quad \tau = t - \frac{x}{v_0 + \Delta},$$

Δ — поправка к скорости распространения волны $v_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_0}}$, обусловленная изменением средней емкости линии. Очевидно, $\Delta = 0$ лишь при условии $Q_{\text{нел}}(u) = Q_{\text{нел}}(-u)$.

Конкретизируем вид дифференциальной емкости $C(u) = \frac{\partial Q_{\text{нел}}(u)}{\partial u}$, рассмотрев, например, режим с отсечкой (рис. 1 кривая 1)¹

$$C(u) = \begin{cases} \Delta C, & u < u_1 \\ -\frac{\Delta C}{\Delta V} (u - u_2), & u_1 \leq u < u_2, \\ 0, & u \geq u_2 \end{cases} \quad (2)$$

$$\Delta C = C_{\text{max}} - C_{\text{min}}, \quad \Delta V = |u_2 - u_1|.$$

Решение (1) при граничном условии $u(t, 0) = U_0 \sin \omega t$ ($U_0 > \Delta V$) записывается в виде

$$\tilde{\tau} = \arcsin(\tilde{u}) + \frac{\Delta C}{2C_0} \tilde{x}, \quad (\tilde{u} < \tilde{u}_1),$$

$$\tilde{\tau} = \arcsin(\tilde{u}) - \frac{\Delta C U_0 \tilde{x}}{2C_0 \Delta V} (\tilde{u} - \tilde{u}_2), \quad (\tilde{u}_1 \leq \tilde{u} < \tilde{u}_2),$$

¹ При построении разрыва вблизи $\omega \tau = 0$ используется зеркально-обращенная зависимость $C(u)$, для которой справедливы те же результаты.

$$\tilde{\tau} = \arcsin(\tilde{u}) \quad (\tilde{u} \geq \tilde{u}_2), \quad (3)$$

$$\tilde{\tau} = \omega\tau, \quad \tilde{x} = \frac{\omega x}{v_0}, \quad \tilde{u} = \frac{u}{U_0}.$$

Графическое построение кривых (3) показано на рис. 2. Если интервал ΔV лежит вне точки $\tilde{u}=0$, то разрыв образуется при значении \tilde{u} , равном \tilde{u}_1 или \tilde{u}_2 (выбирается то значение, при котором производная $\left. \frac{d\tilde{u}}{d\tilde{\tau}} \right|_{\tilde{u}=\tilde{u}_1, \tilde{u}_2}$ на входе линии максимальна). Длины образования разрыва

$$x_p = \frac{1}{U_0 \xi \beta \sqrt{1 - (\tilde{u}_{1,2})^2}}, \quad \text{где } \xi = \frac{\Delta C}{2C_0 \Delta V}, \quad \beta = \frac{\omega}{v_0}. \quad (4)$$

Если точка $\tilde{u}=0$ лежит внутри интервала ΔV , то разрыв образуется при значении $\tilde{u}=0$, $x_p = \frac{1}{\xi \beta U_0}$, что совпадает со значением для квадратичной зависимости $Q_{\text{нел}}(u)$ [3].

Для описанной линии оценим число ячеек $n_p = \frac{x_p}{l_0}$. При набеге фазы на ячейку $\beta l_0 = 0,02 \pi$ и смещении $E = -1,75 \text{ В}$, $\xi = 0,9 \text{ В}^{-1}$, для амплитуды входного сигнала $U_0 = 1,4 \text{ В}$ получим $n_p \approx 13$. Экспериментально образование разрыва наблюдалось при $n_p = 15-17$. По мере увеличения U_0 величина n_p уменьшилась, достигая минимального значения $n_p \approx 5-6$. Для несимметричной характе-

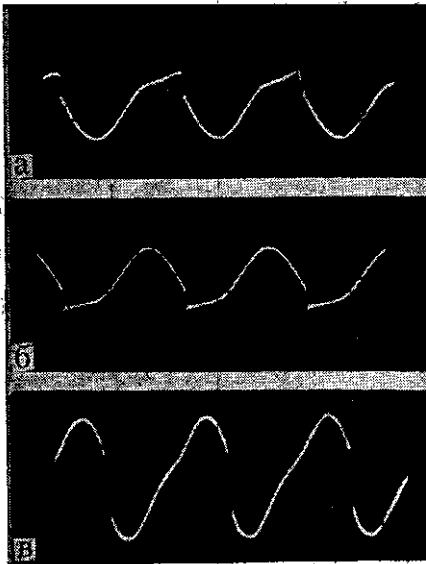


Рис. 3. Осциллограммы напряжений в линии при $E = -4$ (а), $E = -0,5$ (б) и $E = -1,75 \text{ В}$ (в)

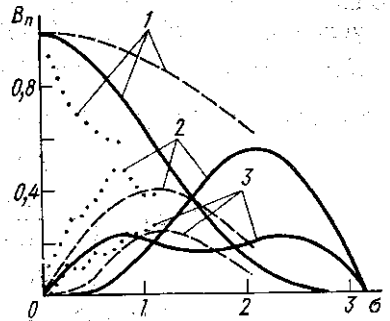


Рис. 4. Зависимости амплитуды гармоник, возникающих при искажении профиля синусоидальной волны, от расстояния. Цифры обозначают номер гармоники, сплошные линии соответствуют среде с нелинейностью релейного типа (5), штриховые линии — квадратичной нелинейности [4]

ристики ($E = -3 \text{ В}$) значение n_p возрастает, как это качественно следует из формулы (4).

Меняя с помощью напряжения смещения положение интервала ΔV относительно $u=0$, можно получить разрывы в различных точках исходного профиля синусоидального напряжения. Осциллограммы на рис. 3 иллюстрируют случай образования разрывов в «верхней» (а), «нижней» (б) и «средней» (в) точках профиля. Следует отметить, что графическое построение формы ударной волны по формулам (3) и эксперимент дают хорошее совпадение формы ударной волны при условии $U_0 > (2-3)\Delta V$, а частота отсечки фильтра в 12—15 раз больше рабочей частоты.

Появление мелкомасштабных осцилляций на осциллограммах обусловлено наличием отражений в линии и конечностью полосы пропускания. Поправка к скорости Δ связана с появлением дополнительного заряда на варикапах при выборе рабочей точки на ветвях вольт-фарадной характеристики, зависящего от амплитуды сигнала и вызывающего нелинейную дисперсию. Это явление приводит к невыполнению правила равенства площадей (ср. [4]).

Решение (1) для нелинейности типа (2) может быть представлено в виде разложения по гармоникам, однако явный вид коэффициентов разложения удается получить лишь в частном случае несмещенной характеристики релейного типа

$$C(u) = \begin{cases} \frac{\Delta C}{2}, & u \leq 0 \\ -\frac{\Delta C}{2}, & u > 0. \end{cases} \quad (5)$$

В этом случае разрыв образуется на входе линии ($x_p=0$), а форма волны дается рядом

$$u = U_0 \sum_{n=1}^{\infty} B_n(\sigma) \sin(n\tau), \quad B_1(\sigma) = \frac{1}{\pi} [(\pi - \sigma) \cos \sigma + \sin \sigma],$$

$$B_n(\sigma) = \frac{2n}{\pi(n^2 - 1)} \sin \sigma + \frac{2(-1)^{n+1}}{\pi(n^2 - 1)} \sin(n\sigma), \quad \text{при } n \geq 2 \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{\omega v_0 L \Delta C x}{4}.$$

Зависимость амплитуд первых трех гармоник от расстояния показана на рис. 4. Для сравнения на том же рисунке приведены экспериментальные точки, снятые при $U_0 \approx 5B$. (Поскольку $V_0 \sim 10 \Delta V$, приближенно характеристику варикапа можно считать близкой к релейной.)

В заключение хочу выразить благодарность В. Ф. Марченко за ценные советы и помощь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мартынов В. П., Мартынова В. П., Марченко В. Ф., Петручук И. И. «Изв. вузов. Радиофизика», 1974, 17, 367.
2. Gunter U., Voges E. AEU, 1973, 27, N 3, 131.
3. Хохлов Р. В. «Радиотехника и электроника», 1961, 6, 1116.
4. Руденко О. В., Солуян С. И. Теоретические основы нелинейной акустики. М., 1975.

Поступила в редакцию
7.6 1977 г.
Кафедра
радиофизики СВЧ