

09

Эффективность сегнетоэлектрических нелинейных линий передачи для формирования ударной волны

© А.К. Михайлов, А.Б. Козырев, Т.Б. Самойлова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет „ЛЭТИ“
E-mail: mikhailov@umwlab.com

Поступило в Редакцию 30 апреля 2009 г.

Приведен упрощенный анализ нелинейной линии передачи на основе сегнетоэлектрика в параэлектрической фазе. Анализ позволяет оценить эффективность линии, предназначенной для увеличения крутизны фронта распространяющегося сигнала, с учетом потерь в линии. Приведены выражения для оценки эффективности нелинейных линий с распределенными и сосредоточенными параметрами и их графическая иллюстрация.

PACS: 77.84.Dy, 84.40.-x, 84.40.Az, 84.40.Va

Использование сегнетоэлектриков в нелинейных линиях передачи (НЛП) для формирования ударных волн и солитонов активно обсуждалось в 60–70-х годах [1,2]. В настоящее время развитие новых направлений электроники, техники связи и локации — высокоскоростная электроника, сверхширокополосная технология связи и локации — вновь инициировало интерес к сегнетоэлектрикам для создания на их основе НЛП [3–5]. Линия передачи с нелинейными распределениями и сосредоточенными параметрами, содержащие сегнетоэлектрические тонкие пленки или объемную керамику в параэлектрической фазе, являющиеся альтернативой НЛП на полупроводниковых диодах, способны обеспечить широкий диапазон амплитуд (от единиц вольт до 10 kV) формируемого фронта волны наносекундной и субнаносекундной длительности.

Здесь мы приводим упрощенный анализ, позволяющий оценить эффективность сегнетоэлектрической НЛП, предназначенной для увеличения крутизны фронта сигналов. Предлагаемый анализ не требует решения нелинейного дифференциального уравнения для распро-

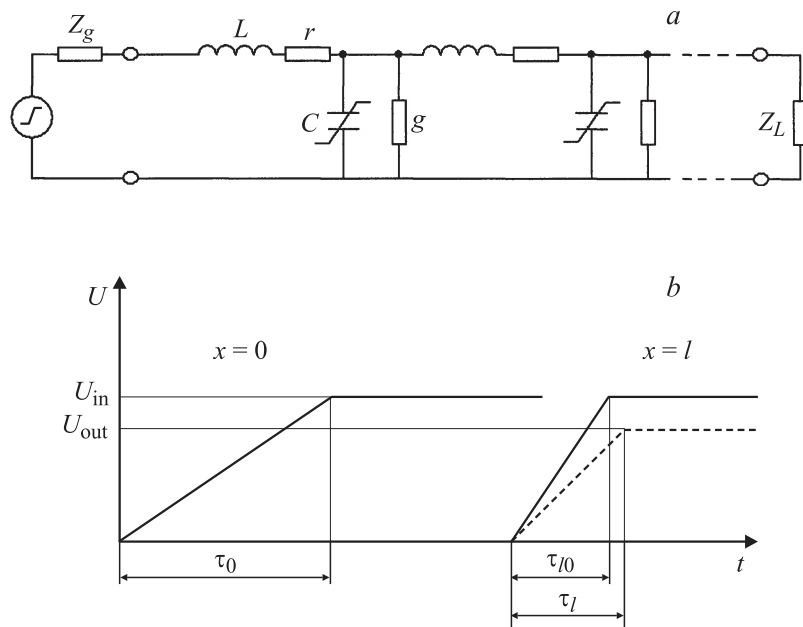


Рис. 1. Эквивалентная схема нелинейной линии передачи (а) и сжатие ступенчатого импульса на выходе нелинейной линии передачи без потерь (сплошная линия) и с потерями (пунктирная линия) (b). τ_0 — длительность фронта на входе НЛП, τ_0 , τ_l — длительности фронта на выходе НЛП без потерь и с потерями соответственно.

страняющегося вдоль НЛП сигнала или моделирования цепочечных структур с нелинейными элементами. Анализ основан на феноменологическом описании вольт-фарадных характеристик (ВФХ) емкостных сегнетоэлектрических элементов НЛП и определении эффективности как параметра, характеризующего относительное изменение обратной крутизны фронта на выходе НЛП. Результаты анализа справедливы для различных типов НЛП, содержащих нелинейный диэлектрик: распределенных структур с поперечными и квазипоперечными типами поля и цепочечных структур НЛП.

Принцип работы сегнетоэлектрических НЛП (рис. 1, а) основывается на зависимости от напряжения скорости распространения элек-

тромагнитной волны $V(U)$ в распределенной (полосковая, копланарная) линии передачи или времени задержки на звено $t_d(U)$ в линии передачи на сосредоточенных элементах:

$$V(U) = \frac{1}{\sqrt{LC(U)}}, \quad t_d(U) = \sqrt{LC(U)}, \quad (1)$$

где $L, C(U)$ — погонные индуктивность и емкость распределенной НЛП или индуктивность и емкость звена НЛП на сосредоточенных элементах; $U = U_b + U(t)$, U_b — постоянное напряжение смещения, $U(t)$ — напряжение распространяющегося вдоль НЛП сигнала. Как результат уменьшения емкости при увеличении напряжения значения $V(U)$ и $t_d(U)$ оказываются различными для разных участков фронта сигнала, что приводит к увеличению крутизны фронта по мере прохождения сигнала по НЛП (в предельном случае формируется ударная волна). Рис. 1, б схематически иллюстрирует эволюцию фронта ступенчатого напряжения на выходе НЛП.

Для емкостных элементов на основе сегнетоэлектрических пленок ВФХ (зависимость дифференциальной емкости от статического напряжения) во многих случаях хорошо описывается выражением:

$$C(U) = \frac{C(0)}{K} \left[1 + \frac{K-1}{1 + \left(\frac{U}{U_0}\right)^2} \right], \quad (2)$$

где U_0 — феноменологический параметр, имеющий размерность напряжения; $K = C(0)/C(U \rightarrow \infty)$ — коэффициент, характеризующий предельную управляемость емкости. Параметры ВФХ U_0 и K зависят от свойств сегнетоэлектрика и могут варьироваться в широких пределах изменением геометрии емкостной структуры. Например, $K = 3-7$, $U_0 = 1-50$ В характерны для плоскопараллельных конденсаторов на основе пленок $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$, тогда как в планарных конденсаторных $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ структурах могут быть обеспечены $K = 2-3$, $U_0 > 100$ В. Поскольку для сегнетоэлектрических емкостных элементов приложение только малых напряжений смещения может быть целесообразно для увеличения крутизны начального рабочего участка ВФХ и для подавления влияния гистерезисных эффектов на управляемость линии, ниже мы приводим результаты анализа эффективности сегнетоэлектрических НЛП только для случая $U_b = 0$.

Пусть на вход НЛП подается ступенчатое напряжение U_{in} с длительностью фронта τ_0 (рис. 1, *b*). Введем эффективность сжатия фронта ступенчатого напряжения F как относительное изменение обратной крутизны фронта:

$$F = \frac{\frac{\tau_0}{U_{in}} - \frac{\tau_{out}}{U_{out}}}{\frac{\tau_0}{U_{in}}} = 1 - \frac{U_{in}}{U_{out}}, \quad (3)$$

где для НЛП с распределенными параметрами длиной l : $\tau_{out} = \tau_l$, $U_{in}/U_{out} = \exp(\alpha l)$, α — погонное затухание, или для цепочечной структуры НЛП, содержащей N звеньев: $\tau_{out} = \tau_N$, $U_{in}/U_{out} = \exp(\alpha N)$, α — затухание на звено. Для упрощения анализа будем считать, что α не зависит от частоты.

Для идеализированной бездисперсионной НЛП без потерь эффективность характеризует относительное сжатие фронта сигнала на выходе линии:

$$F = \frac{\tau_0 - \tau_{out}}{\tau_0}, \quad (4)$$

и $F = 1$ соответствует формированию ударной волны. В соответствии с рис. 1, *b* для распределенной линии без потерь

$$\tau_0 - \tau_{out} = \frac{l}{V(U)} - \frac{l}{V_0},$$

где V_0 — малосигнальная скорость волны в НЛП, и с учетом выражений (1) и (2) выражение для эффективности (4) принимает вид:

$$\begin{aligned} F &= \frac{\tau_0 - \tau_{out}}{\tau_0} = \frac{l}{V_0 \tau_0} \left(1 - \sqrt{\frac{C(U_{in})}{C(0)}} \right) \\ &= \frac{l}{V_0 \tau_0} \left[1 - \sqrt{\frac{1}{K} \left(1 + \frac{K-1}{1 + \left(\frac{U_{in}}{U_0}\right)^2} \right)} \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

С учетом экспоненциального ослабления сигнала в распределенной НЛП с потерями для эффективности линии получаем:

$$F = 1 - \left(1 - \frac{l}{V_0 \tau_0} \left[1 - \frac{1}{l} \int_0^l \sqrt{\frac{1}{K} \left(1 + \frac{K-1}{1 + \left(\frac{U_{in}}{U_0}\right)^2 \exp(-2\alpha x)} \right)} dx \right] \right) \exp(\alpha l). \quad (6)$$

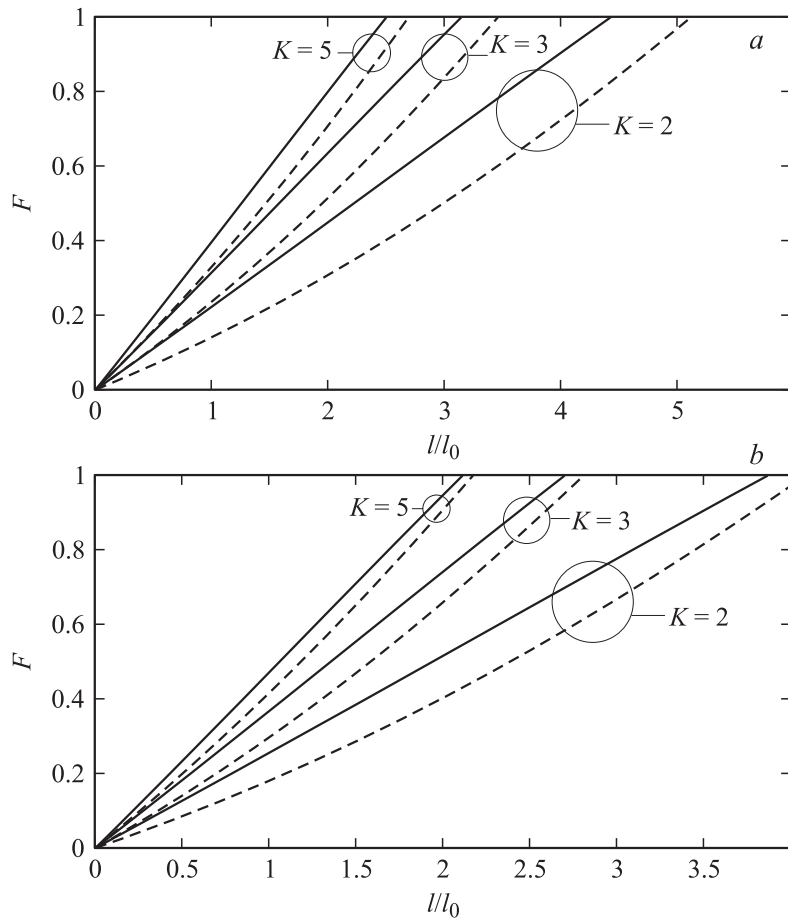


Рис. 2. Зависимость эффективности от длины распределений НЛП, полученная из выражения (6) при $U_{in}/U_0 = 2$ (а) и $U_{in}/U_0 = 3$ (б) при разных значениях параметра K . Длина линии нормирована на параметр $l_0 = V_0\tau_0$, сплошные линии соответствуют НЛП без потерь, пунктирные — НЛП с погонными потерями $\alpha = 0.5$ dB/mm.

Выражение для эффективности НЛП на сосредоточенных элементах, полученное аналогичным образом, имеет вид:

$$F = 1 - \left(1 - \frac{N}{p f_c \tau_0} \times \left[1 - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sqrt{\frac{1}{K} \left(1 + \frac{K-1}{1 + \left(\frac{U_{in}}{U_0}\right)^2 \exp(-2\alpha n)} \right)} \right] \right) \exp(\alpha N), \quad (7)$$

где $f_c = 1/p\sqrt{LC(0)}$ — малосигнальная граничная частота полосы пропускания периодической структуры НЛП, n — номер звена. Граничная частота определяет минимально достижимую длительность фронта на выходе НЛП как $\tau_{N \min} \approx 0.611/f_c$ [6]. Следовательно, максимально достижимое значение эффективности НЛП на сосредоточенных элементах ограничивается соотношением:

$$F_{\max} = 1 - \frac{0.611}{f_c \tau_0} e^{\alpha N}. \quad (8)$$

Как следует из выражений (5) и (6), эффективность НЛП определяется параметрами ВФХ емкостных элементов линии (K, U_0) и зависит от амплитуды напряжения распространяющегося сигнала (U_{in}) и потерь в линии (α).

На рис. 2 показаны зависимости эффективности от длины распределенной НЛП, рассчитанные для $U_{in}/U_0 = 2$ и $U_{in}/U_0 = 3$ при разных значениях K и двух значениях погонного затухания $\alpha = 0 \text{ dB/mm}$ и $\alpha = 0.1 \text{ dB/mm}$. Использование нормированных амплитуды напряжения и длины линии делает представленные на рис. 2 результаты справедливыми для различных параметров входного сигнала (U_{in}, τ_0) и различных конструкций НЛП с распределенными параметрами. Например, для копланарной линии на двухслойной подложке с тонким слоем параэлектрика ($\epsilon_r \approx 300$) можно обеспечить эффективную диэлектрическую постоянную линии $\epsilon_{ef} \approx 15-40$, что соответствует малосигнальной фазовой скорости $V_0 \approx (7-4) \cdot 10^7 \text{ m/s}$. Для полосковой линии на объемной керамике ($\epsilon_r \approx 10^4$) $V_0 \approx 3 \cdot 10^6 \text{ m/s}$. Как следует из рис. 2, планарные НЛП с тонкими сегнетоэлектрическими пленками длиной до 10 мкм перспективны для обострения фронтов исходно малой (субнаносекундной) длительности, тогда как НЛП на объемной керамике длиной

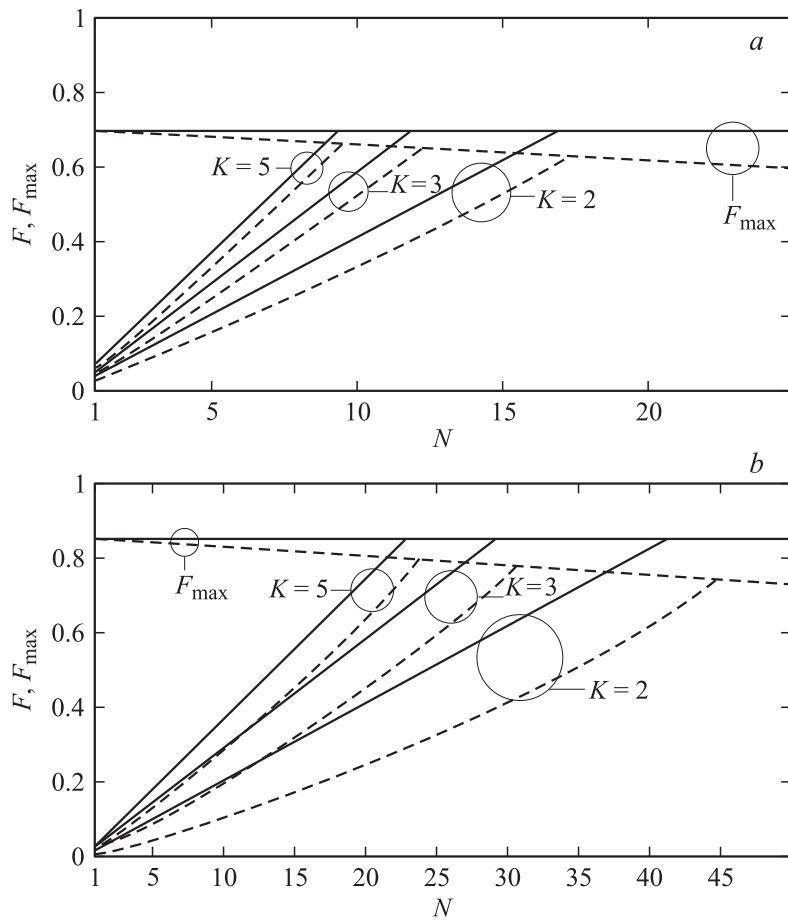


Рис. 3. Зависимости эффективности F и максимально возможного значения эффективности F_{\max} от числа звеньев цепочечной схемы НЛП с нелинейными сегнетоэлектрическими конденсаторами, полученные из выражений (7) и (8) соответственно, при $f_c \tau_0 = 2$ (a) и $f_c \tau_0 = 4$ (b) для $U_{\text{in}}/U_0 = 3$ и разных значений параметра ВФХ конденсаторов K . Сплошные линии соответствуют НЛП без потерь, пунктирные — НЛП с потерями на звено $\alpha = 0.1$ дБ.

от 10 мм до 1 м могут быть использованы для обострения фронтов наносекундной длительности. Следует также отметить, что рабочий диапазон напряжений, который для планарных линий составляет от десятков до сотен вольт, расширяется до 10 кВ при использовании НЛП на объемных керамических образцах.

На рис. 3 приведены зависимости эффективности от числа звеньев цепочечной схемы НЛП при $f_c \tau_0 = 2$ (рис. 3, *a*) и $f_c \tau_0 = 4$ (рис. 3, *b*) для $U_{in}/U_0 = 3$, $\alpha = 0.1$ дВ/мм при разных значениях K , рассчитанные с использованием выражений (7) и (8). Эти данные иллюстрируют влияние потерь и позволяют разумно оценить число элементов и параметры звеньев НЛП при известных параметрах входного импульса и ВФХ конденсаторов. В частности, при $U_{in}/U_0 = 3$, $K = 3$, $f_c = 4$ GHz в НЛП, содержащей 30 идентичных LC-ячеек, обеспечивается пятикратное укорочение фронта исходной длительностью $\tau_0 = 1$ ns.

Таким образом, представленный упрощенный анализ дает хорошее соответствие с более точными методами расчета эффективности сегнетоэлектрической НЛП и может быть использован разработчиками радиоаппаратуры для экспресс-анализа эффективности линий различных конструкций.

Работа выполнена при поддержке программы „Развитие научного потенциала высшей школы (2006–2008 годы)“, проект 2.1.2.7083.

Список литературы

- [1] Хохлов П.В. // Радиотехника и электроника. 1961. Т. 6. № 6. С. 917–925.
- [2] Островский Л.А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1968. Т. 11. № 6. С. 900–906.
- [3] Branch G., Smith P.W. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1996. V. 29. P. 2170–2178.
- [4] Findikoglu A.T., Reagor D.W., Rasmussen K. et al. // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 74. N 12. P. 1770–1772.
- [5] Findikoglu A.T., Jia Q.X., Hahn S.F. // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 77. N 22. P. 3645–3647.
- [6] Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Сов. радио, 1964. 695 с.