

# Принцип оптимальной компрессии фронта импульса в нелинейной линии передачи на основе сегнетоэлектрических варакторов

В.В. Медведева, Р.А. Платонов, М.В. Злыгостов, А.В. Тумаркин

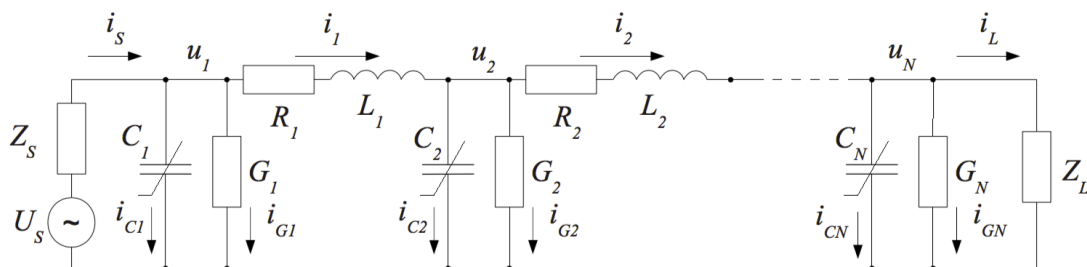
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

**Аннотация:** рассмотрена эффективность сжатия импульсов в нелинейных линиях на основе сегнетоэлектрических варакторов. Описана проблема возникновения осцилляций при сжатии фронта. Сформулирован принцип оптимальной компрессии, позволяющий избежать этих осцилляций. Этот принцип был подтвержден моделированием процесса сжатия фронта в нелинейных линиях на основе варакторов с различными вольт-фарадными характеристиками.

**Ключевые слова:** нелинейная линия передачи, сжатие импульса, периодически нагруженная линия передачи, электрически управляемый конденсатор

## 1. Введение

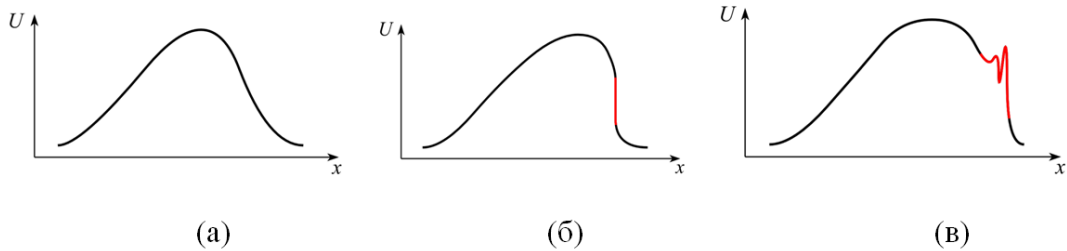
Перспективным направлением развития современной СВЧ-электроники являются сверхширокополосные устройства [1]. Разработка таких устройств требует генераторов ультракоротких импульсов. Они могут быть построены на основе нелинейных линий передачи, используемых в качестве обострителей импульсов. Суммирование двух импульсов с коротким фронтом и различной полярностью с небольшой задержкой между ними дает один ультракороткий импульс. В настоящее время основными элементами, используемыми в таких линиях, являются полупроводниковые элементы (варакторные диоды). Возможной альтернативой являются сегнетоэлектрические (СЭ) варакторы. По сравнению с полупроводниковыми аналогами они демонстрируют более высокие рабочие напряжения и более низкие СВЧ потери. Планарная конструкция сегнетоэлектрических варакторов также дает ряд преимуществ, а именно хороший теплоотвод (из-за большей поверхности контакта с подложкой), а также простоту и, следовательно, низкую себестоимость технологии их изготовления. Основное внимание в работе уделено исследованию эффективности сжатия импульсов в нелинейных линиях на основе сегнетоэлектрических варакторов. Схема такой линии представлена на рис. 1.



**Рисунок 1.** Схема нелинейной линии передачи на основе сегнетоэлектрических варакторов с внешней нагрузкой  $Z_L$  и источником сигнала  $U_s$ .

Одной из проблем использования таких линий в качестве обострителя фронта импульса, является эффект возникновения осцилляций в области фронта ударной волны при распространении в нелинейных дисперсионных средах. Этот эффект

известен давно [1] и в настоящее время используется, в частности, для генерации солитонов [2, 4]. Данный эффект проявляется когда ударный фронт возникает от сжатия изначально непрерывного импульса, поступающего в нелинейную среду (см. рис. 2) [1-3]. Возникновение таких колебаний является отрицательным эффектом, ограничивающим потенциал сжатия импульса. В данной работе рассматривается способ подавления данного эффекта.



**Рисунок 2.** Формирование области ударной волны на фронте импульса и ее преобразование в область осцилляций в процессе компрессии.

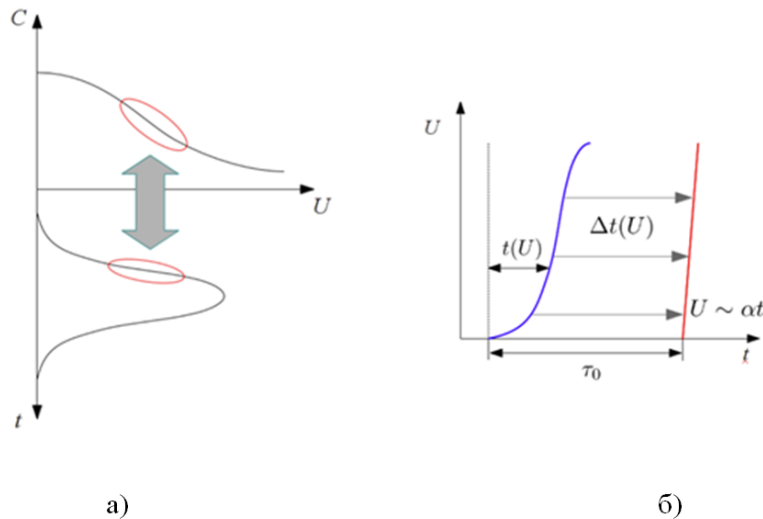
## 2. Теоретический анализ

Причиной образования областей ударной волны и, следовательно, осцилляций фронта импульса в процессе сжатия является влияние двух факторов: формы начального фронта импульса и крутизны вольт-фарадной характеристики (ВФХ) нелинейного варактора. Эти области появляются, когда объединяются области с более высокой крутизной начального фронта импульса ( $dU/dt \rightarrow \max$ ) и ВФХ ( $dC/dU \rightarrow \max$ ), то есть область фронта, которая изначально имеет высокую крутизну, подвергается наиболее интенсивному сжатию. Это приводит к нерегулярному сжатию фронта: в то время как одна область принимает форму ударной волны, другие остаются практически несжатыми (см. рис. 3а).

Эта проблема может быть решена путем использования взаимной компенсации двух вышеупомянутых факторов. А именно, участки наименьшей крутизны ВФХ должны соответствовать участкам наибольшей крутизны фронта начального импульса и наоборот. Этот подход можно назвать «принципом оптимальной компрессии». Более строго этот принцип можно сформулировать с помощью следующего уравнения:

$$\Delta t(U) = \sqrt{C(U)L} = \tau_0 - t(U) + U/\alpha \quad (1)$$

где  $t(U)$  - обратная функция времени фронта импульса  $U(t)$ ;  $\Delta t(U)$  - время задержки линии в зависимости от напряжения  $U$ ;  $\tau_0$  - задержка линии в малосигнальном приближении ( $U \rightarrow 0$ );  $\alpha$  - требуемая крутизна результирующего фронта импульса (см. рис. 3б).



**Рисунок 3.** Иллюстрация причины эффекта нерегулярного сжатия фронта – а); иллюстрация принципа оптимальной компрессии – б).

Значение  $\alpha$  для периодической линии передачи можно оценить через ее частоту отсечки  $f_c$ , оцененную при максимальном напряжении:

$$\alpha = 2\pi f_c = 1/\sqrt{C(U_{max})L} \quad (2)$$

### 3. Результаты моделирования

Чтобы подтвердить этот принцип, был смоделирован процесс сжатия фронта в нелинейных линиях с двумя различными ВФХ варакторами. Первый - классический ВФХ сегнетоэлектрических варакторов [6]:

$$C(U) = \frac{C_0}{K} \left( 1 + \frac{K-1}{1+(U/U_0)^2} \right) \quad (3)$$

где  $C_0$  - начальная емкость (в нашем случае 1 пФ),  $K$  – коэффициент управляемости варактора (в нашем случае 3), а  $U_0$  - параметр нелинейности (в нашем случае 350 В). Это уравнение можно упростить до  $C \rightarrow C_0/K$ , когда  $U \rightarrow \infty$ , и до  $C = C_0$ , когда  $U = 0$  В.

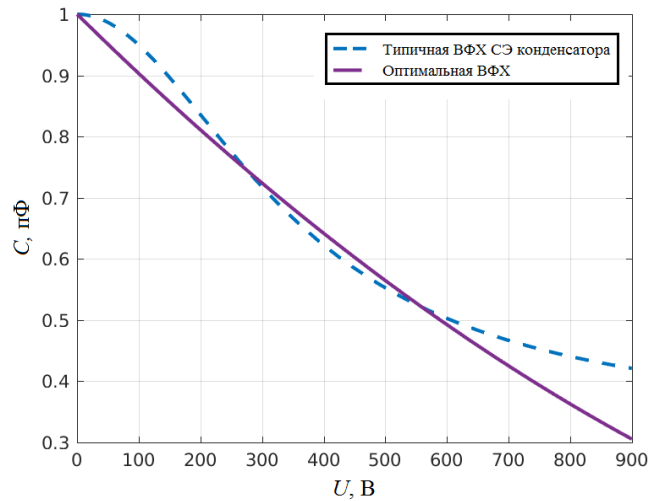
Для простоты начальный импульсный фронт был выбран линейным:

$$U(t) = \begin{cases} \frac{U_{max}}{t_f} t & t < t_f \\ U_{max} & t \geq t_f \end{cases} \quad (4)$$

где  $U_{max} = 850$  В - максимальное значение импульса начального напряжения, а  $t_f = 1$  нс. Вторая **ВФХ** получена для данного начального фронта (4) в соответствии с оптимальным принципом сжатия:

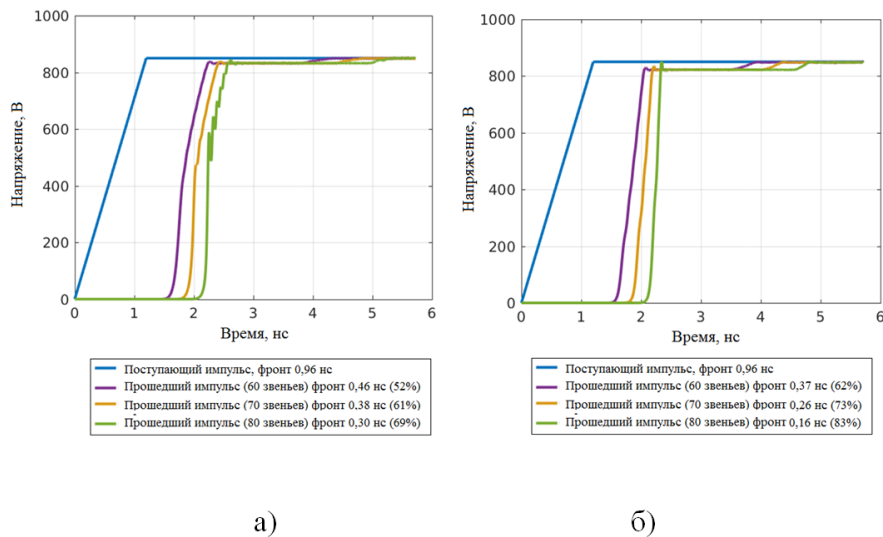
$$C(U) = \left( \frac{\sqrt{C_0/K} - \sqrt{C_0}}{U_{max}} U + \sqrt{C_0} \right)^2 \quad (5)$$

В свою очередь, с этой **ВФХ**, при  $U = 0$  В,  $C = C_0$ , а когда  $U = U_{max}$ ,  $C = C_0/K$  (чтобы сделать данную **ВФХ** сопоставимой с предыдущей). Сравнение **ВФХ**, определенных по (3) и (5), представлено на рис. 4.



**Рисунок 4.** Типичная ВФХ СЭ конденсатора ( $U_0 = 350$  В и  $K = 3$ ) и ВФХ конденсатора, выбранная по принципу оптимального сжатия для фронта линейного импульса.

Для упрощения моделирования потери в линии передачи не учитывались ( $R$  и  $G$  на рис. 1). Значение индуктивности  $L$  составляло  $0,9$  нГн. Результаты моделирования представлены на рис. 5. Длительность входного фронта и фронтов сжатых импульсов (определяемых по уровням  $0,9U_{\max}$  и  $0,1U_{\max}$ ) для линий с различным количеством звеньев, а также относительные коэффициенты сжатия в процентах представлены на графиках. Видно, что использование принципа оптимальной компрессии позволяет сжимать фронт импульса более чем на 80% без появления осцилляций, тогда как в случае с типичными СЭ варакторами осцилляции возникают до достижения 70% сжатия.



**Рисунок 5.** Временные зависимости линейного сжатия фронта в нелинейных линиях на основе типичных СЭ варакторов - а) и варакторов с оптимизированной ВФХ - б).

### 3. Заключение

Полученные результаты могут быть использованы для улучшения характеристик обострителей импульсов на основе нелинейных линий с сегнетоэлектрическими варакторами. Как было показано, типичная ВФХ СЭ-варактора не является оптимальной для сжатия фронтов гауссовых и линейных импульсов. Изменение этой ВФХ (в частности, путем подачи напряжения смещения)

в соответствии с принципом оптимальной компрессии позволяет получить коэффициент сжатия до 80%.

Работа выполнена при финансовой поддержке **Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта № 18-37-00348 мол\_а.**

#### Список литературы

1. Prakash T., Ghosh D. Review of the ultra wideband pulse generation //2015 International Conference on Microwave, Optical and Communication Engineering (ICMOCE). – IEEE, 2015. – С. 310-313.
2. Gurevich A. V., Pitaevskii L. P. Nonstationary structure of a collisionless shock wave //Zhurnal Eksperimentalnoi i Teoreticheskoi Fiziki. – 1973. – Т. 65. – С. 590-604.
3. Ikezi H., DeGrassie J. S., Drake J. Soliton generation at 10 MW level in the very high frequency band //Applied physics letters. – 1991. – Т. 58. – №. 9. – С. 986-987.
4. Valsa J. Simulation of" Tsunami Waves" Propagating along Non-Linear Transmission Lines //RADIOENGINEERING-PRAGUE-. – 2005. – Т. 14. – №. 3. – С. 41.
5. Ablowitz M. J., Baldwin D. E., Hofer M. A. Soliton generation and multiple phases in dispersive shock and rarefaction wave interaction //Physical Review E. – 2009. – Т. 80. – №. 1. – С. 016603.
6. Antonov N. N. et al. Ferroelectrics in Microwave Technology //Soviet radio. – 1979. – С. 272.