

Медведева В.В.¹, Пташник С.В.¹, Козырев А.Б.^{1,2}

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

²Дагестанский государственный университет народного хозяйства

Принцип оптимального сжатия фронта импульса в нелинейной линии передачи на основе сегнетоэлектрических конденсаторов

Представлены условия распространения импульса в нелинейной линии передачи с отсечкой, позволяющие избежать возникновения "ударной волны" с последующей генерацией солитонов. Принцип оптимального сжатия заключается в задании соответствия формы сжимаемого импульса и формы вольт-фарадной характеристики нелинейного элемента. Показано, что соблюдении предложенного принципа, обеспечивает равномерное сжатие различных участков фронта импульса.

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

Эффект преобразования ударного фронта в осциллирующую область в нелинейных дисперсионных средах известен уже давно [1] и в настоящее время используется, в частности, для генерации солитонов [2, 4]. Можно выделить два сценария, при которых возникает подобный эффект. Входящий в среду сигнал изначально имеет скачки, т.е. ограниченные по амплитуде участки с ударным фронтом [1, 4]. Ударный фронт возникает вследствие сжатия фронта непрерывного импульса, вошедшего в среду, за счет ее нелинейности [1–3]. С точки зрения решения задачи компрессии фронта импульса в нелинейной линии передачи, подобный эффект играет негативную роль. Причина возникновения осцилляций обусловлена двумя факторами: крутизной фронта изначально импульса и крутизной вольт-фарадной характеристики (ВФХ) нелинейного конденсатора.

Можно привести такое простейшее объяснение этого эффекта. Функция Хевисайда, описывающая ударный фронт, имеет бесконечно широкий спектр. Вследствие дисперсионных и/или диссипативных свойств среды, происходит отражение и/или поглощение высших гармоник, что приводит к возникновению области осцилляций, сформированных оставшимися гармониками. Аналогичный процесс происходит в случае формирования ударного фронта непосредственно в ходе сжатия фронта импульса в нелинейной среде, что иллюстрируется рисунком 1 [2]. Рис. 1 а показывает импульс до возникновения ударного фронта. Рис. 1 б показывает непосредственно момент формирования ударного фронта (недостижимый в дисперсионных средах). Рис. 1 с, d демонстрируют дальнейшее развитие ситуации в разных физических системах: в случае использования уравнений гидродинамики, происходит "опрокидывание" фронта, хорошо известное на примере волн на поверхности воды (рис. 1 с). В случае использования уравнений Кортевега–да Фриза или Бюргерса без параметризации, исключаящем возможность наличия многих значений функции-решения в одной точке, происходит возникновение области осцилляций, которая, при наличии в среде достаточно сильной дисперсии, может превратиться в солитон [3, 5].

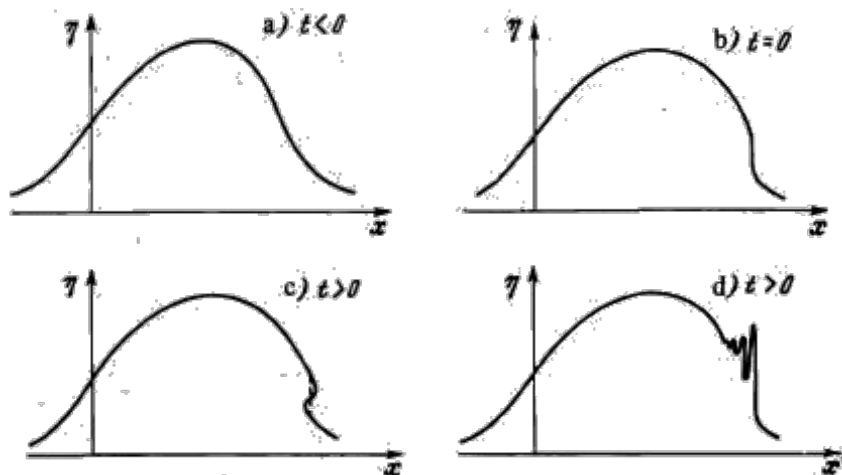


Рис. 1. Формирование ударного фронта и его преобразование солитон [2].

С точки зрения решения задачи компрессии фронта импульса в нелинейной линии передачи, подобный эффект играет негативную роль. Рассмотрим пример линии со следующими параметрами: $C_0 = 1$ пФ (ёмкость описывается выражением (1) с параметрами нелинейности ёмкости: $U_0 = 350$ В, $K = 3$), $L = 0.9$ нГн и переменным числом звеньев, на вход которой подается импульс в форме гауссиана с амплитудой 850 В и длительностью фронта 0.6 нс. Результаты численного моделирования приведены на рис. 2.

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

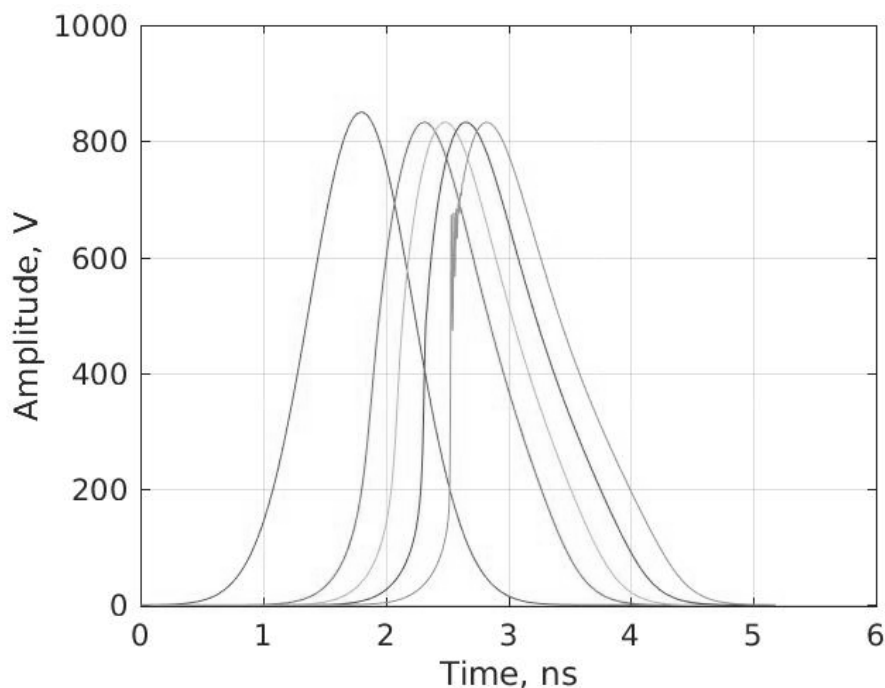


Рис. 2. Моделирование компрессии фронта гауссиана. Слева направо: входной импульс, выходные импульсы после 30, 40, 50 и 60 звеньев.

Таким образом, если считать, что возникновение осцилляций является условием для прекращения компрессии (так как генерация радиоимпульсов на основе видеоимпульсов не входит рамки решаемой задачи), можно заключить, что эффективность сжатия подобным методом ограничена: когда на одном уровне напряжения формируется ударный фронт, другие участки фронта остаются несжатыми.

Чтобы прояснить причины возникновения описанной проблемы и определить пути ее решения, рассмотрим простую диаграмму, приведенную на рис. 3. Сверху на ней приведена типовая ВФХ сегнетоэлектрического конденсатора $C(U)$, снизу осциллограмма входного импульса во времени, развернутая таким образом, чтобы ось напряжения соответствовала аналогичной оси ВФХ. Фактически, второй график иллюстрирует не прямую зависимость $U(t)$, а обратную $t(U)$ (чтобы исключить множественность значений $t(U)$, ограничимся лишь фронтом импульса). Как видно из графиков, обе зависимости имеют участки с различной крутизной. С одной стороны, участок фронта входного импульса $U(t)$ с большой крутизной изначально ближе к ударному, чем участки с меньшей крутизной. С другой стороны, в диапазоне значений напряжения, соответствующий максимальной крутизне $C(U)$, сжатие также происходит более эффективно, чем за пределами этого диапазона. В совокупности, эти два фактора и задают неравномерность сжатия фронта импульса.

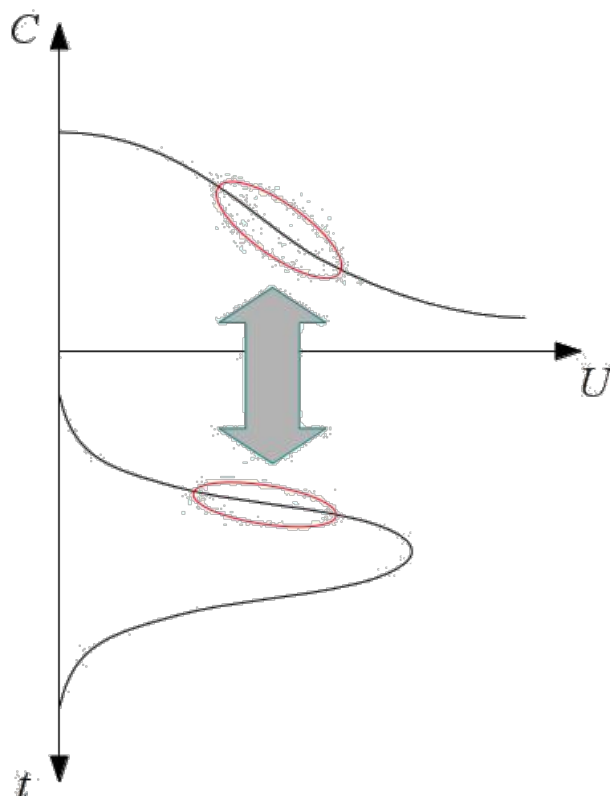


Рис. 3. Диаграмма, иллюстрирующая эффективность сжатия различных участков фронта импульса: ВФХ конденсатора (сверху) и осциллограмма входного импульса (снизу). Обведены участки наибольшей крутизны обеих функций.

Очевидный путь решения проблемы, т.е. обеспечение оптимальности сжатия фронта импульса, состоит в том, чтобы заставить два вышеописанных фактора компенсировать друг друга, т.е. подобрать начальный импульс и ВФХ таким образом, чтобы на участках наибольшей крутизны фронта входного импульса сжатие происходило менее эффективно, в то время как на участках малой крутизны фронта – более эффективно.

Описанный принцип был проверен численным моделированием: рассматривалось поведение импульса с линейно возрастающим фронтом в линиях на основе конденсаторов

с классической ВФХ (рис. 5 а) и на основе ВФХ, выбранной исходя из принципа оптимального сжатия, т.е. квадратичной (рис. 5 б). Как видно из рисунка б, во втором случае осцилляции не возникают, что подтверждает корректность принципа.

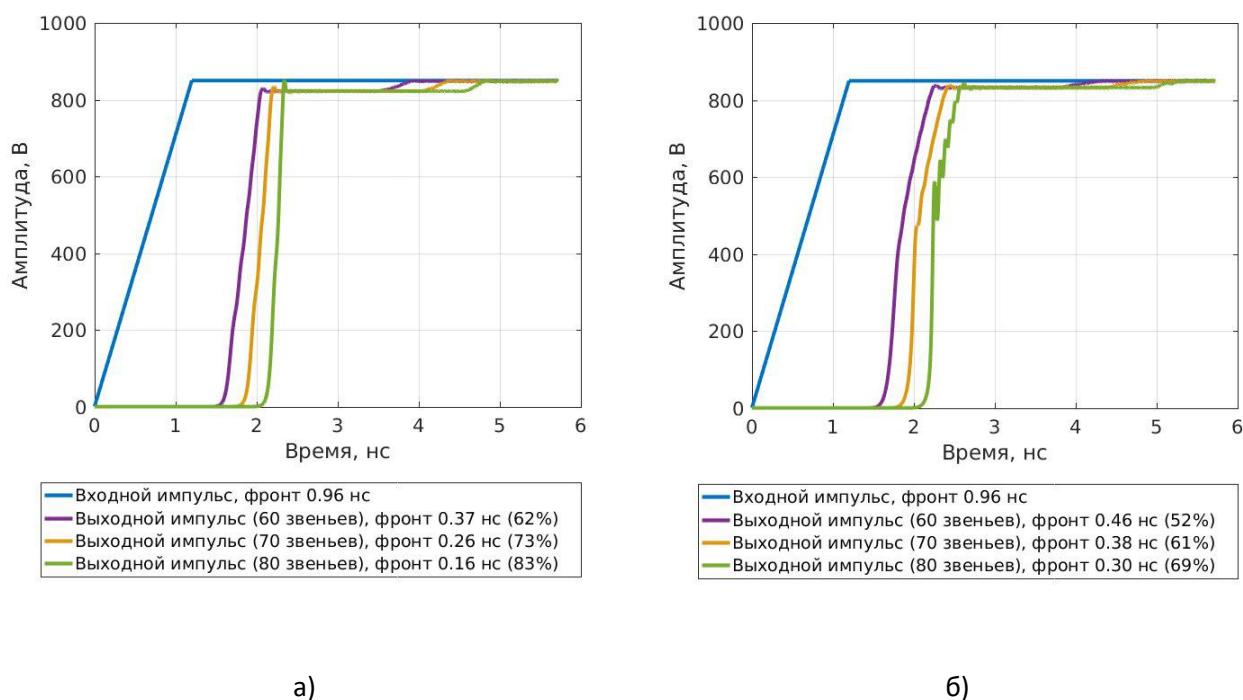


Рис. 5. Пример сжатия линейного фронта импульса по классическому (а) и оптимальному (б) законам.

Исследование выполнено при поддержке Министерства Науки и Образования Российской Федерации в рамках программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы", соглашение №14.608.21.0002 от 27.10.2015 (уникальный номер соглашения RFMEFI60815X0002).

Библиографический список

1. Whitham G. B. Non-linear dispersive waves //Proc. R. Soc. Lond. A. – 1965. – Т. 283. – №. 1393. – С. 238-261.
2. Гуревич А. В., Питаевский Л. П. Нестационарная структура бесстолкновительной ударной волны //ЖЭТФ. – 1973. – Т. 65. – №. 2. – С. 590.
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.