

УДК 537.876.42

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СОЛИТОНОВ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ С НЕЛИНЕЙНОЙ ЕМКОСТЬЮ

Н. В. ГЕРАСИМЕНКО, Ф. М. ТРУХАЧЕВ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Солитоны – это особые виды волн, которые обладают рядом особых физических свойств. Они могут распространяться на большие расстояния без потери формы и уменьшения амплитуды, взаимодействовать друг с другом без искажения формы. Скорость их распространения зависит от амплитуды. Солитоны были впервые обнаружены в 1834 г. на поверхности воды, но позже оказалось, что они существуют в разных областях физики, таких как плазма, оптика, астрофизика. Имеются публикации, описывающие применение солитонов в задачах неразрушающего контроля. Солитоны представляют большой интерес для науки и техники, т. к. они могут использоваться для передачи информации, моделирования нелинейных волновых явлений в различных физических системах и создания новых устройств.

Первые экспериментальные исследования солитонов, выполненные Расселом [1], проводились в специально подготовленных каналах, заполненных водой. В каналы опускались массивные плиты для создания локального избытка массы воды, из которого впоследствии формировался солитон. Для изучения свойств солитонов, например одностороннего переноса заряженных частиц в направлении распространения волны [2], эксперименты с жидкостью в каналах являются сложными для реализации в лабораторных условиях. Аналогичные явления наблюдаются в линиях электропередач (длинных линиях), локальное значение емкости в которых нелинейно зависит от напряжения. В таких системах солитоны – это локализованные импульсы напряжения, которые проходят вдоль линии без искажений. Нелинейность уравнивает дисперсию, вызванную линейными элементами линии, такими как резисторы, конденсаторы и индуктивности. Солитоны в линиях электропередачи также имеют множество потенциальных практических применений, таких как генерация гармоник, формирование импульсов, защита от воздействия грозových разрядов в ЛЭП и др.

Рассмотрим произвольную длинную линию передачи с нелинейной межпроводной емкостью $C(U)$. Пренебрегая активными потерями, запишем систему телеграфных уравнений:

$$-\frac{\partial U}{\partial x} = L \frac{\partial I}{\partial t}; \quad -\frac{\partial I}{\partial x} = C(U) \frac{\partial U}{\partial t}, \quad (1)$$

где $U(x,t)$ – волна напряжения в линии; $I(x,t)$ – волна тока в линии; L – индуктивность единицы длины линии; $C(U)$ – функция, описывающая нелинейную емкость единицы длины линии.

В [3] показано, что в длинных линиях с нелинейной емкостью существует солитонное решение КдФ-типа:

$$U(\xi, t) = U_m \operatorname{sech}^2\left(\frac{\xi - Vt}{D}\right), \quad (2)$$

где U_m , D – показатели амплитуды и ширины солитона соответственно.

Взаимосвязь между напряжением и током в линии следует непосредственно из уравнений (1) и имеет вид

$$I = \int_0^U \sqrt{\frac{C(u)}{L}} du. \quad (3)$$

Вольт-фарадная характеристика нелинейной емкости (варактора или варикапа) достаточно точно описывается выражением

$$C(U) = C_0 \left(1 + \frac{U}{\varphi_k}\right)^{-1/2},$$

где φ_k – барьерный потенциал, $\varphi_k \approx 0,4 \dots 0,9$ В.

Подставляя в выражение (3) и вычисляя интеграл, получаем

$$I(\xi, t) = \frac{4\varphi_k}{3Z} \left[\left(1 + \frac{U_m \operatorname{sech}^2\left(\frac{\xi - Vt}{D}\right)}{\varphi_k} \right)^{3/4} - 1 \right],$$

где Z – волновое сопротивление линии в невозмущенном состоянии, $Z = \sqrt{L_0 / C_0}$.

На рис. 1 показаны формы импульсов напряжения и тока при $U_m = 0,5$.

Основой для построения физической модели данного процесса является компьютерная модель, разработанная с помощью Multisim 11 (образовательная лицензия). В качестве нелинейной емкости использовались варакторы ВВ112 и линейные индуктивности. Линия возбуждалась прямоугольным импульсом от источника переменного напряжения прямоугольной формы (рис. 2 и 3).

Было установлено следующее. Ток в нелинейной линии электропередач не связан с напряжением простым соотношением $I = U/Z$, где Z – волновое сопротивление линии. При малых значениях амплитуды напряжения возбуждаемый солитоном ток в линии имеет такую же форму и полярность. Солитон меньшей амплитуды имеет большую ширину и распространяется вдоль линии с меньшей скоростью. Более детальный анализ свойств солитона тока в нелинейной линии без диссипации может быть выполнен в рамках модели Кортеве-

га – де Фриза, что является развитием существующей теории для солитонов напряжения и основой для будущих работ.

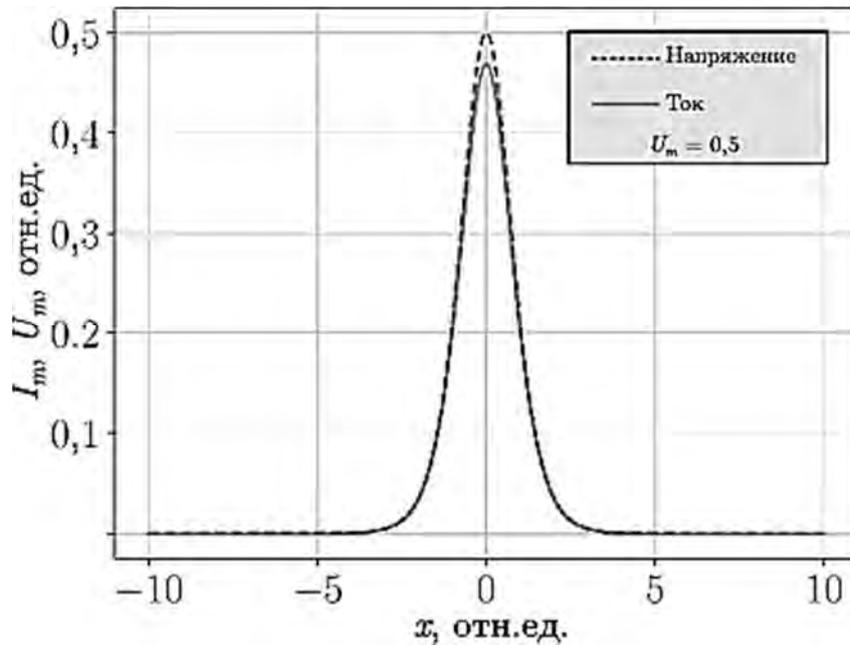


Рис. 1. Профили солитона тока и напряжения в линии электропередач с нелинейной емкостью

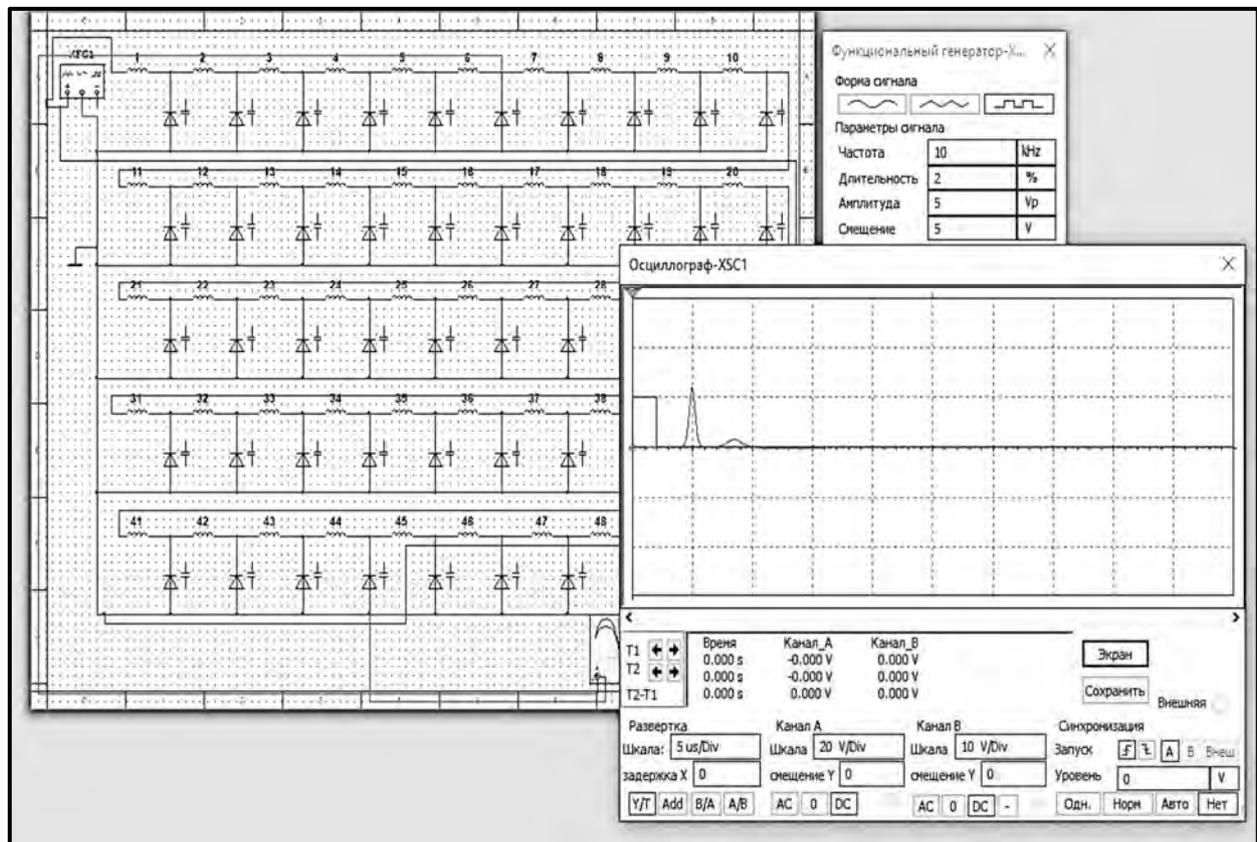


Рис. 2. Модель нелинейной линии электропередач в среде Multisim 11, осциллограмма сигнала на 6-м сегменте линии

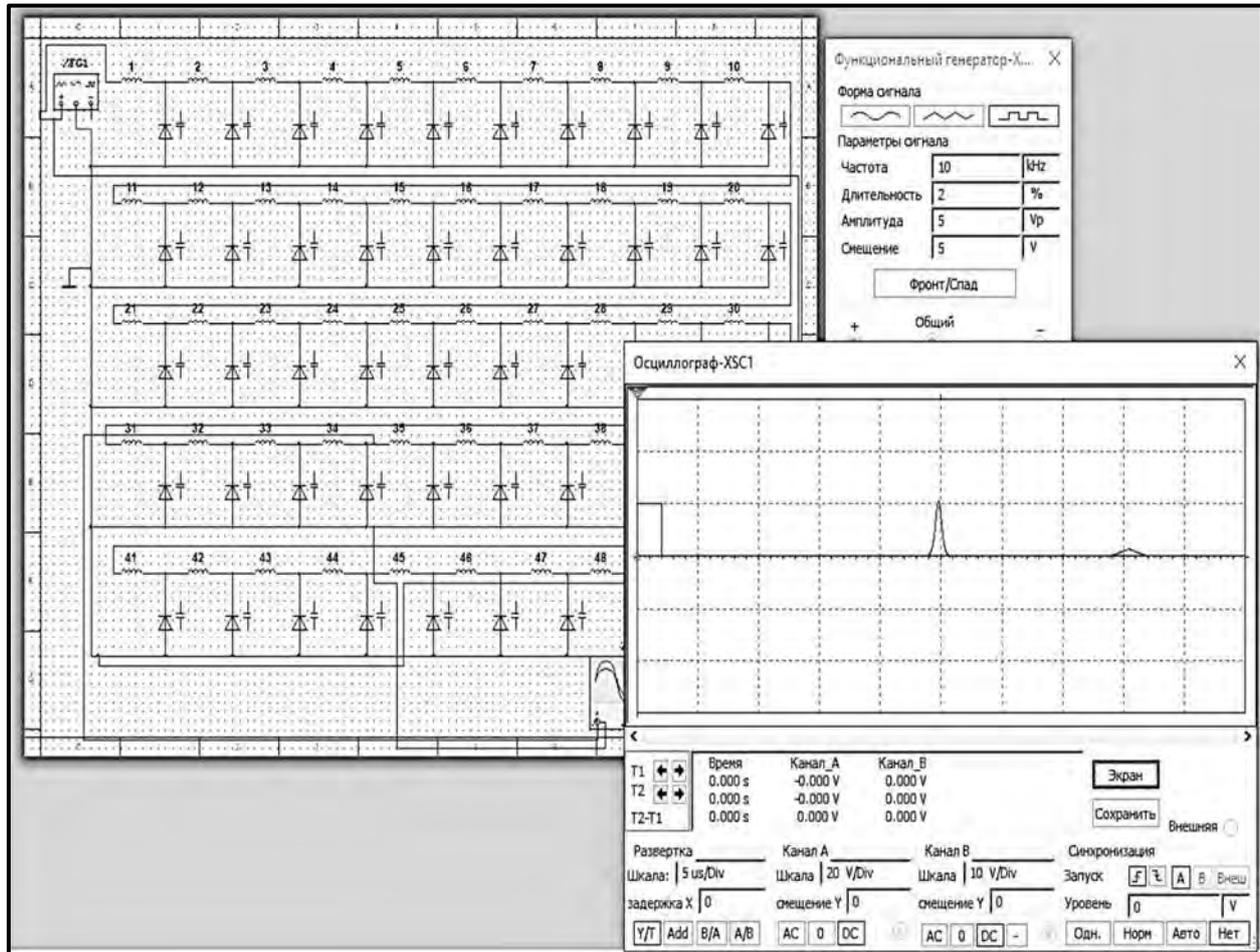


Рис. 3. Модель нелинейной линии электропередач в среде Multisim 11, осциллограмма сигнала на 34-м сегменте линии

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Russell, J. S.** Report on Waves, Published in the York 1844 / J. S. Russell // BA Reports. – 1844.
2. Unidirectional transport of ions and perturbation of plasma distribution functions by ion-acoustic solitons: Numerical simulation and analytical solution / F. M. Trukhachev [et al.] // Physics of Plasmas. – 2023. – Vol. 30.
3. **Ким, Д. Ч.** Видеосолитоны в дисперсной линии передачи с нелинейной емкостью р–п-перехода / Д. Ч. Ким // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83.