

## Об особенностях формирования структуры ударной электромагнитной волны при ее одновременном синхронизме с несколькими волнами в связанных линиях передачи с разными типами дисперсии

© А.Б. Козырев

Институт физики микроструктур РАН,  
603600 Нижний Новгород, Россия  
e-mail: kozyrev@ipm.sci-nnov.ru

(Поступило в Редакцию 20 февраля 2001 г.)

Впервые проведено детальное исследование численными методами особенностей структуры ударной электромагнитной волны в случае, когда ее структура в равной степени определяется двумя или более синхронными волнами на примере предложенной ранее электродинамической системы связанных линий передачи с нормальной и аномальной дисперсией типа связанной коаксиальной линии передачи и штыревой замедляющей системы лестничного типа.

Изучение особенностей неустойчивости фронта ударной электромагнитной волны (УЭМВ), распространяющейся в нелинейных линиях передачи (ЛП) с дисперсией, с точки зрения ее использования для прямого эффективного преобразования видеопульса в радиоимпульс было предметом целого ряда работ [1–3]. Однако во всех этих работах рассмотрение было ограничено случаем, когда доминирующее влияние на параметры УЭМВ (длительность фронта УЭМВ и закон приближения компонент поля к постоянным значениям за фронтом УЭМВ) оказывает одна синхронная волна. В настоящей работе численными методами впервые проведено детальное исследование особенностей структуры УЭМВ в случае, когда ее структура в равной степени определяется двумя или более синхронными волнами на примере предложенной ранее электродинамической системы связанных ЛП с нормальной и аномальной дисперсией типа связанных коаксиальной ЛП и штыревой замедляющей системы лестничного типа (рис. 1) [4].

Как известно, распространение перепада электромагнитного поля в нелинейной ЛП, заполненной ферритом, или в нелинейной ЛП, заполненной средой с нелинейной  $C(V)$ -характеристикой, сопровождается увеличением крутизны фронта волны, приводя к образованию УЭМВ. На спектральном языке нелинейное увеличение крутизны профиля волны означает рождение более высокочастотных спектральных компонент и соответственно перекачку энергии от более низких к более высоким спектральным составляющим. В свою очередь стабилизация длительности фронта УЭМВ означает, что в области высоких частот начинают проявляться некоторые физические процессы, идущие с поглощением энергии, компенсирующие перекачку энергии в более высокочастотные спектральные составляющие, а следовательно, и препятствующие дальнейшему увеличению крутизны фронта УЭМВ. Как правило, определяющую роль в формировании структуры УЭМВ играет наиболее низкочастотный механизм. Однако если характери-

стические частоты различных механизмов близки или наиболее низкочастотный механизм является неэффективным и не может привести к полной стабилизации длительности фронта УЭМВ, то следует ожидать, что структура УЭМВ будет формироваться также и под действием более высокочастотных механизмов стабилизации фронта УЭМВ. В частности, такая ситуация имеет место в связанных ЛП с нормальной и аномальной дисперсией [4], эквивалентная схема которых приведена на рис. 1. В такой системе УЭМВ в определенном диапазоне значений ее скорости одновременно синхронна с двумя нормальными волнами рассматриваемой системы. При этом, как показали результаты численного моделирования, представленные в работе [4], возбуждение низкочастотной волны имеет малую энергетическую эффективность (вследствие слабого проникновения поля УЭМВ в ЛП с аномальной дисперсией) и не приводит к стабилизации фронта УЭМВ. В упомянутой выше работе [4], была рассмотрена достаточно высокочастотная система с  $\omega_c \sim 24.4$  GHz (поскольку целью работы было продвижение рабочей частоты генератора радиоимпульсов на основе ЛП с ферритом в область более высоких частот) и окончательная стабилизация фронта УЭМВ происходила вследствие потерь на некогерентное перемагничивание феррита, а структура УЭМВ определялась только низкочастотной синхронной волной. Возбуждения второй (высокочастотной) синхронной волны не происходило, так как в данном случае это более высокочастотный процесс по сравнению с некогерентным перемагничиванием феррита.

В настоящей работе проведено численное моделирование нелинейных процессов распространения УЭМВ в сравнительно низкочастотной системе (в связанных линиях передачи с критической частотой  $\omega_c \sim 6.24$  GHz), где возбуждение второй синхронной волны является более низкочастотным процессом, чем процесс некогерентного перемагничивания феррита, и стабилизация фронта УЭМВ происходит вследствие возбуждения двух синхронных волн.

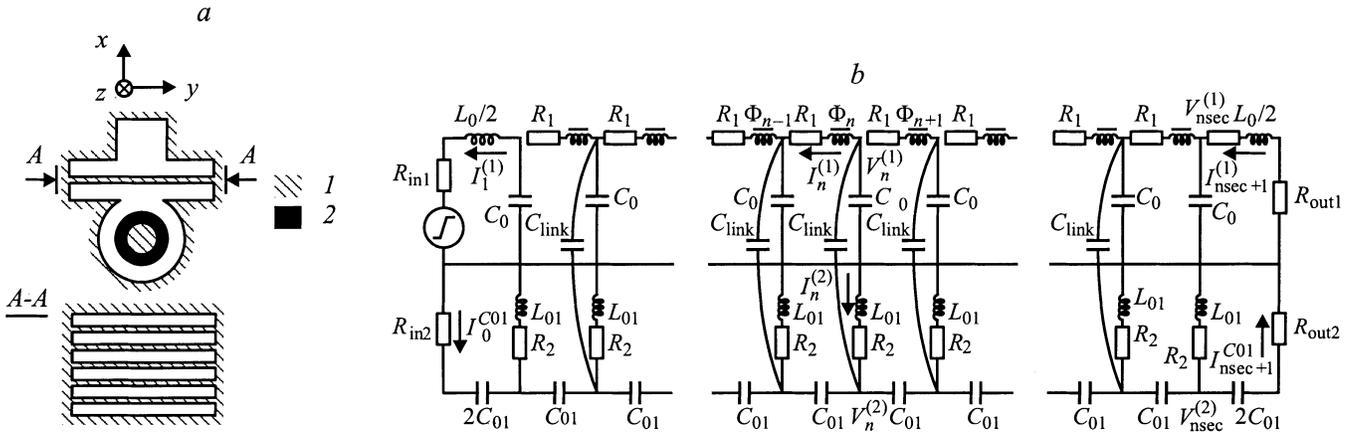


Рис. 1. Конструкция связанных квазиокоаксиальной ЛПП и штыревой замедляющей системы лестничного типа (Т-образный волновод с решеткой; 1 — металл, 2 — феррит) (а) и ее эквивалентная схема (б).

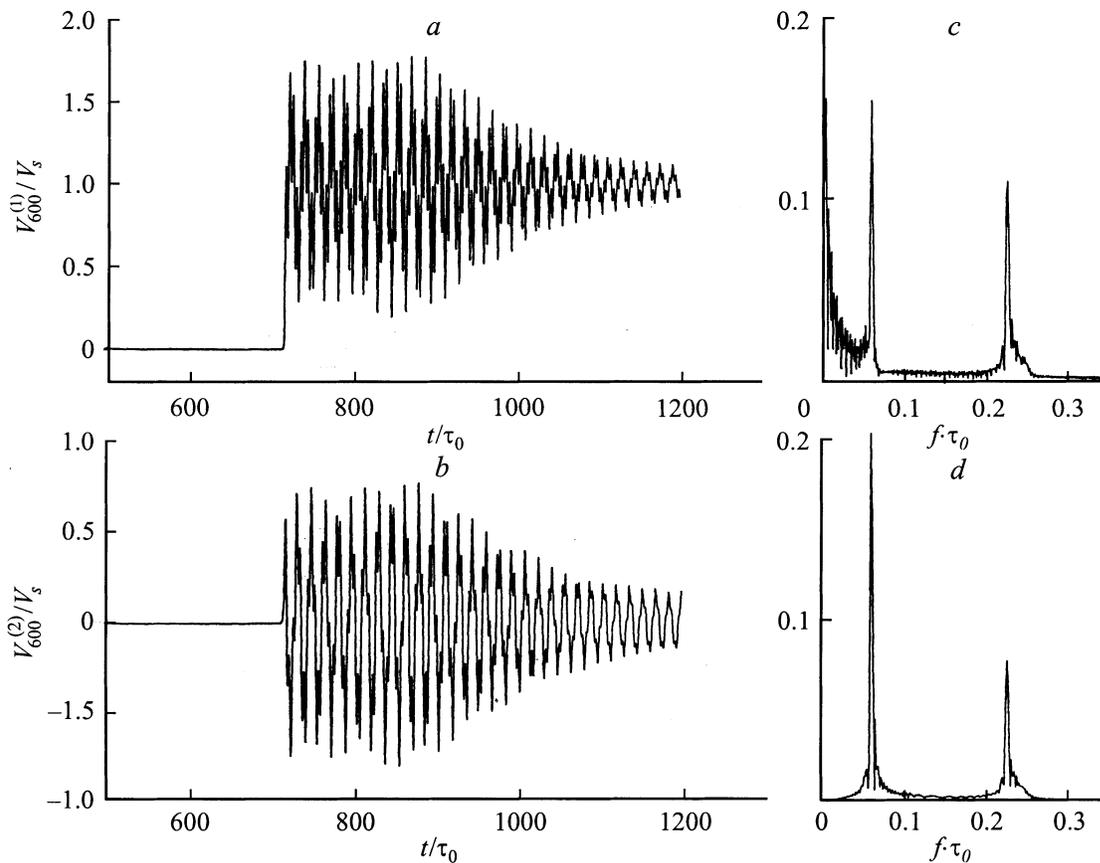


Рис. 2. Осциллограммы напряжения в 600-й ячейке линии с нормальной ( $V_{600}^{(1)}/V_s$ ) и аномальной ( $V_{600}^{(2)}/V_s$ ) дисперсией, нормированные на амплитуду УЭМВ  $V_s = 50 \text{ kV}$  (а, б) и их спектры (с, д) при относительной скорости УЭМВ  $v_s/v_0 = 0.85$  [4]. Параметры эквивалентной схемы:  $\omega_c = 2/\tau_0 = 6.24 \text{ GHz}$  ( $\tau_0 = (L_0 C_0)^{1/2} = 0.32 \text{ ns}$ ),  $Z_0 = \sqrt{L_0/C_0} = 25 \Omega$ ,  $C_{01}/C_0 = 0.1$ ,  $L_{01}/L_0 = 22.5$ ,  $C_{link}/C_0 = 0.16$ .

Эта ситуация проиллюстрирована на рис. 2, где показаны осциллограммы напряжения в 600-й ячейке связанных ЛПП с нормальной и аномальной дисперсией, на входе которых подавался полубесконечный импульс напряжения. В рассматриваемом случае груп-

повые скорости синхронных с фронтом УЭМВ близки и отток энергии генерируемых колебаний происходит с одной и той же скоростью, равной разности скорости УЭМВ и групповой скорости синхронных волн.

Таким образом, осциллограмма за фронтом УЭМВ представляет собой наложение двух радиоимпульсов одинаковой длины, о чем косвенно свидетельствует и одинаковая спектральная ширина пиков в спектрах осциллограмм. Форма спада генерируемого радиоимпульса определяется дисперсией групповых скоростей синхронных волн [3]. Сам фронт теперь имеет достаточно сложную структуру, хотя общая его длительность определяется периодом низкочастотной синхронной волны, на некоторых его участках изменение поля (напряжения) происходит с частотой порядка частоты высокочастотной синхронной волны.

Энергетические эффективности возбуждения синхронных волн (представляющие собой отношение доли мощности, идущей на возбуждение синхронной волны к полной мощности, подводимой к фронту УЭМВ) в рассматриваемом нами случае равны и составляют 0.46 каждая. Суммарная доля энергии, которая идет на генерацию ВЧ колебаний высока и составляет 92%. Оставшаяся доля мощности, подводимой к фронту УЭМВ, идет на некогерентное перемагничивание феррита. Заметим, что в рассмотренной ранее электродинамической системе типа ЛП с перекрестными связями через одно звено [1,2] при определенных параметрах ЛП и определенной величине скорости УЭМВ также можно организовать одновременный синхронизм с двумя волнами (например, с низкочастотной прямой нормальной волной и высокочастотной обратной пространственной гармоникой). Однако в этом случае возбуждение низкочастотной синхронной волны протекает эффективно и приводит к полной стабилизации фронта УЭМВ. Возбуждение двух синхронных волн с одинаковой эффективностью становится невозможным, и в спектре осциллограмм доминирует одна частота.

В случае, для которого приведены осциллограммы на рис. 2, групповые скорости генерируемых синхронных волн направлены в одну сторону (по направлению распространения УЭМВ). Однако, как нетрудно видеть из дисперсионных характеристик рассматриваемой системы связанных ЛП [4], возможна также ситуация, когда групповые скорости направлены в противоположные стороны. При этом цуг генерируемых колебаний также имеет сложную неоднородную двухчастотную структуру, определяемую соотношением и локальной дисперсией групповых скоростей синхронных волн, однако в отличие от предыдущего случая мощности генерируемых колебаний бегут в противоположные стороны и фактически генерируются одновременно два радиоимпульса. Один из них бежит по направлению к нагрузке, включенной на входе линии с аномальной дисперсией, и, может быть, выделяется на включенной там согласованной нагрузке, а другой может быть выделен на нагрузке, включенной на выходе линии с аномальной дисперсией.

В заключение отметим, что по аналогии со связанными ЛП с нормальной и аномальной дисперсией можно предложить многопроводную электродинамическую систему, состоящую из нескольких связанных ЛП, в которой структура УЭМВ будет определяться заданным

числом синхронных волн, эффективностью возбуждения которых можно управлять, меняя связь между ЛП. При этом эффективность возбуждения более высокочастотных волн будет функцией как коэффициентов связи между линиями, так и эффективностей возбуждения более низкочастотных волн, что дает возможность получать радиоимпульсы с многочастотным заполнением и равномерным распределением энергии по частотам. При этом спектром генерируемого радиоимпульса можно управлять электронным образом (изменяя ток начального подмагничивания или амплитуду УЭМВ).

Автор выражает глубокую признательность А.М. Белянцеву за постоянный интерес к работе и ценные замечания.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 99-02-18046).

## Список литературы

- [1] Белянцев А.М., Дубнев А.И., Климин С.Л. и др. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 8. С. 132–142.
- [2] Белянцев А.М., Козырев А.Б. // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 6. С. 78–83.
- [3] Белянцев А.М., Козырев А.Б. // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 1. С. 89–95.
- [4] Белянцев А.М., Козырев А.Б. // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 7. С. 79–82.