

09;12

Генерация высокочастотных колебаний фронтом ударной электромагнитной волны в связанных линиях передачи с аномальной и нормальной дисперсией

© А.М. Белянцев, А.Б. Козырев

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

(Поступило в Редакцию 1 июня 2000 г. В окончательной редакции 10 ноября 2000 г.)

Рассмотрена генерация высокочастотных колебаний ударной электромагнитной волной при ее синхронизме с обратной волной связанных линий передачи с нормальной и аномальной дисперсией и нелинейностью на основе ферритов. Показана возможность значительного снижения затухания генерируемых колебаний за счет увеличения доли потока высокочастотной энергии в линии передачи с аномальной дисперсией, где высокочастотные потери относительно малы.

В работе [1] была показана возможность генерации высокочастотных (ВЧ) колебаний за фронтом ударной электромагнитной волны (УЭМВ), распространяющейся в нелинейной линии передачи (ЛП) с пространственной дисперсией, вследствие неустойчивости УЭМВ по отношению к синхронной с ней волной (возможность прямого эффективного преобразования видеоимпульса в радиоимпульс). Как отмечалось в этой работе, длительность генерируемого радиоимпульса и частота заполнения ограничены ВЧ потерями в ЛП. В работе [2] была показана возможность снижения влияния ВЧ потерь на затухание осцилляций в генерируемом УЭМВ радиоимпульсе за счет быстрого оттока ВЧ энергии от фронта УЭМВ при синхронном возбуждении обратных волн (обратных пространственных гармоник), следовательно и возможность генерации более протяженных радиоимпульсов.

В том случае, когда основные ВЧ потери в ЛП происходят в насыщенной нелинейной среде (например, в феррите), имеется, очевидно, и иная (дополнительная) возможность снижения влияния ВЧ потерь на затухание осцилляций в генерируемом УЭМВ радиоимпульсе за счет понижения доли потока энергии в области с ВЧ потерями. В настоящей работе показано, что эта возможность может быть реализована, в частности, в электродинамической системе в виде связанных ЛП с нормальной и аномальной дисперсией при синхронном возбуждении фронтом УЭМВ обратных волн.

Вариант связанных ЛП, а именно квазиоаксиальная ЛП электродинамически связанная через электрическое поле в щели со штыревой замедляющей системой лестничного типа [3], показана на рис. 1, *a*. Дисперсионные характеристики такой системы, рассчитанные с использованием эквивалентной схемы [3] с сосредоточенными параметрами (рис. 1 *b*), представлены на рис. 2, *a*. Зависимость частоты от волнового числа состоит из двух ветвей, низкочастотной и высокочастотной, разделенных полосой непрозрачности.

Было проведено численное интегрирование методом Рунге–Кутты системы дифференциально-разностных уравнений Кирхгоффа для токов и напряжений в связанных ЛП с эквивалентной схемой, приведенной на рис. 1, *b*. Результаты численного моделирования показали, что передний фронт подаваемого на вход ЛП с нормальной дисперсией видеоимпульса по мере распространения в ЛП трансформируется в фронт УЭМВ [1], за которым возникают колебания на частоте синхронной волны ($\nu_s = \nu_p(\omega)$), число которых растет пропорционально пройденному им расстоянию. Возникшие колебания бегут от фронта УЭМВ по направлению к входу ЛП и выделяются на включенной там согласованной нагрузке $R_m^{(2)}$ (рис. 1, *b*). Нелинейность за фронтом УЭМВ насыщается, и распространение колебаний за фронтом происходит, как в линейной среде. Типичные осциллограммы напряжения в 100-й ячейке ЛП с нормальной дисперсией $V_{100}^{(1)}/V_s$ и аномальной дисперсией $V_{100}^{(2)}/V_s$ (нормированные на амплитуду УЭМВ V_s) представлены на рис. 3. В осциллограммах напряжения в обеих линиях помимо колебаний на частоте синхронной обратной волны присутствуют незначительные колебания на более высокой частоте вследствие наличия синхронизма с прямой волной высокочастотной ветви дисперсионной кривой.

Структуру поля ВЧ волны, распространяющейся в связанных ЛП (а в конечном итоге в перекрытие поля УЭМВ и поля, генерируемой ей ВЧ волны), удобно характеризовать отношением $V_\omega^{(2)}/V_\omega^{(1)}$ ($V_\omega^{(1)}$ и $V_\omega^{(2)}$ суть амплитуды ВЧ колебаний в узлах ЛП с нормальной и аномальной дисперсией). На рис. 2, *b* приведена зависимость отношения $V_\omega^{(2)}/V_\omega^{(1)}$ от волнового числа φ , рассчитанная для нескольких значений коэффициента связи C_{link}/C_0 . Главная особенность осциллограмм напряжения в связанных ЛП состоит в том, что источник излучения (фронт УЭМВ) бежит в ЛП с нормальной дисперсией (квазиоаксиальная ЛП заполненная ферритом), а основной поток мощности генерируемой им синхрон-

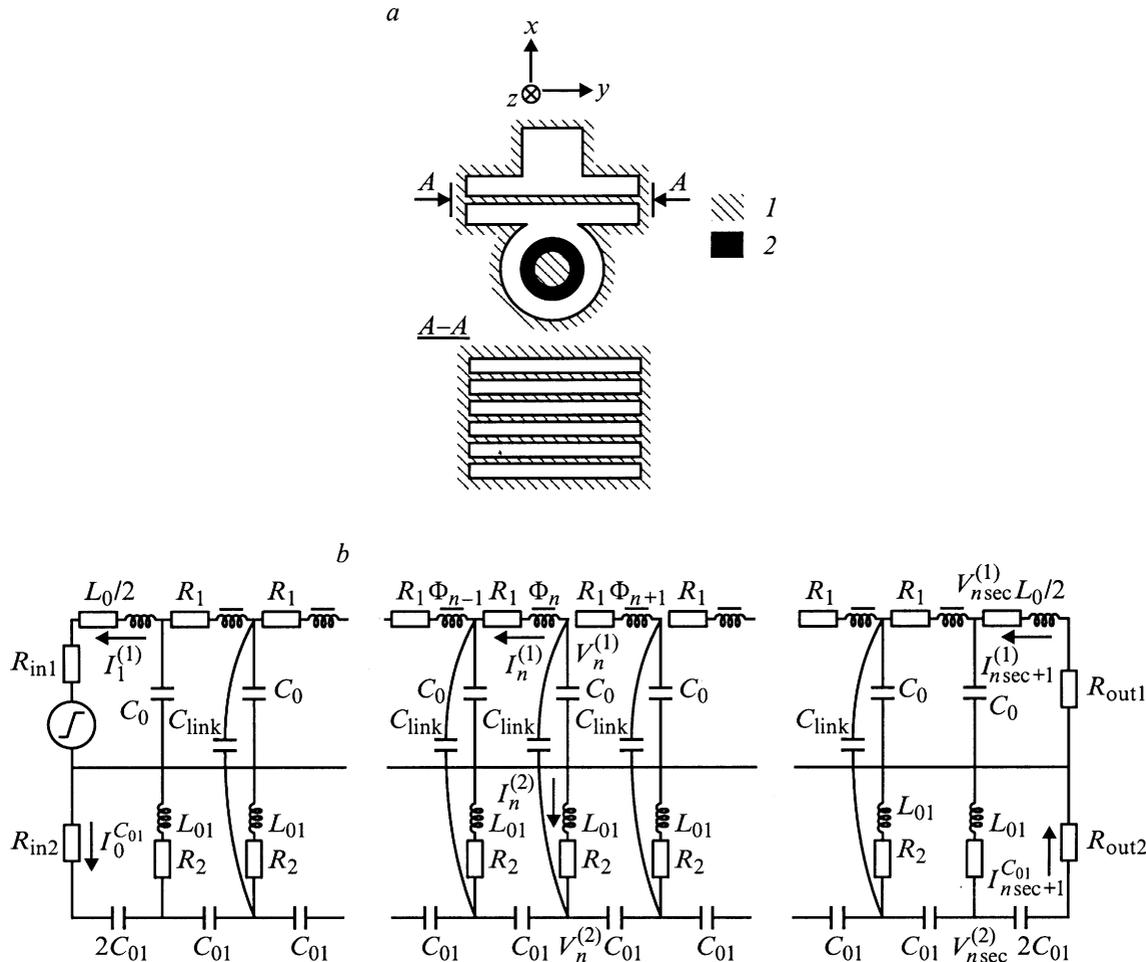


Рис. 1. Конструкция связанных квази coaxialной ЛПП и штыревой замедляющей системы лестничного типа (Т-образный волновод с решеткой) (а: 1 — металл, 2 — феррит) и ее эквивалентная схема (б).

ной волны — в ЛПП с аномальной дисперсией. Поскольку в связанных ЛПП, одна из которых заполнена ферритом, основное затухание волн в диапазоне 500–1000 МГц связано с ВЧ диэлектрическими потерями в намагниченном феррите, а потери из-за скин-эффекта относительно малы, то затухание колебаний в генерируемой волне оказывается на порядок меньше, чем в случае синхронизма УЭМВ с обратной пространственной гармоникой нелинейной ЛПП с перекрестными емкостными связями через одно звено [2] при одинаковой величине потерь в феррите. На рис. 2, с показана рассчитанная зависимость относительной длины затухания (число ВЧ колебаний N_e амплитуда которых затухает в e раз) от действительной части волнового числа в структуре УЭМВ формируемой в связанных ЛПП с нормальной и аномальной дисперсией. Рост N_e с уменьшением коэффициента связи C_{link}/C_0 полностью коррелирует с уменьшением отношения $V_{\omega}^{(2)}/V_{\omega}^{(1)}$.

Следует также отметить, что возможность пространственного разделения мощности возбуждающей УЭМВ и генерируемой обратной волны позволяет существенно

упростить проблему вывода колебаний, так как удается развязать источник входного видеоимпульса (включенный на входе ЛПП с нормальной дисперсией) и ”приемник” колебаний (резистивная нагрузка включенная на входе ЛПП с аномальной дисперсией).

Важной характеристикой, описывающей процесс генерации ВЧ колебаний в связанных ЛПП, является энергетическая эффективность генерации представляющая собой отношение доли мощности, идущей на генерацию ВЧ колебаний, к полной мощности, подводимой к фронту УЭМВ. Как показали расчеты, энергетическая эффективность генерации определяется не только скоростью процесса перемагничивания феррита (как в обсуждавшихся ранее ЛПП с перекрестными связями через одно звено [1,2]), но и структурой полей генерируемой ВЧ волны и поля УЭМВ (они определяют эффективность взаимодействия этих волн, которое тем больше, чем сильнее поле синхронной ВЧ волны проникает в линию с нормальной дисперсией). Как показали численные расчеты, если параметры системы таковы, что в области обратной волны $V_{\omega}^{(2)}/V_{\omega}^{(1)} \sim 1-10$, то зависимость для

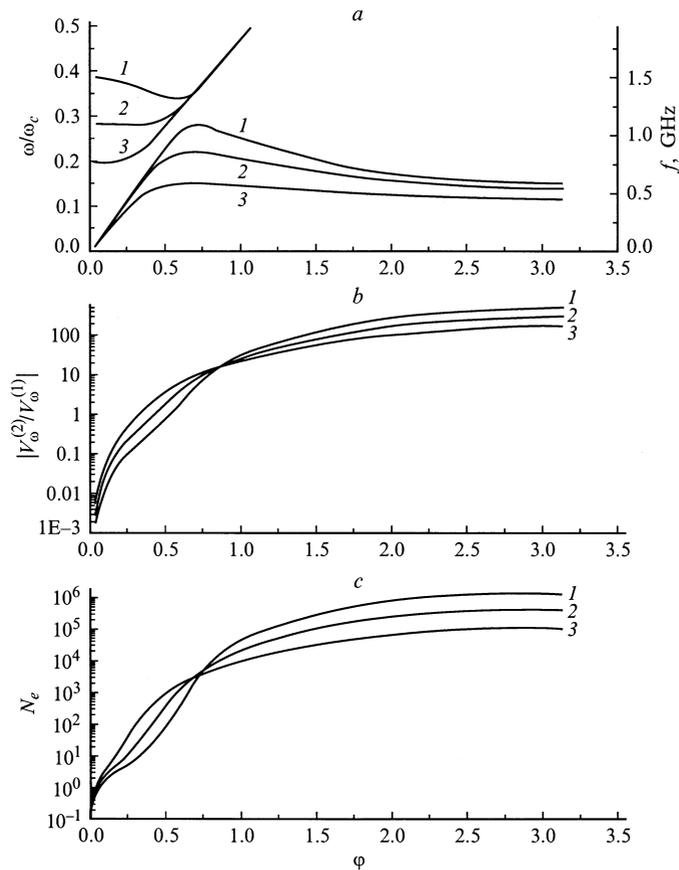


Рис. 2. Зависимость относительной частоты ω/ω_c (a), отношения амплитуды ВЧ колебаний в линии с аномальной дисперсией к амплитуде ВЧ колебаний в линии с нормальной дисперсией $V_{\omega}^{(2)}/V_{\omega}^{(1)}$ (b) и эффективной длительности генерируемого радиоимпульса N_e (c) от волнового числа φ для трех значений емкости связи: 1 — $C_{link}/C_0 = 0.08$, 2 — $C_{link}/C_0 = 0.16$, 3 — $C_{link}/C_0 = 0.4$. Параметры эквивалентной схемы: $\omega_c = 2/(L_0C_0)^{1/2} = 2.44 \cdot 10^{10}$ Hz, $L_{01}/L_0 = 22.5$, $C_{01}/C_0 = 0.1$ (L_0 — индуктивность элементарной ячейки при насыщенной нелинейности).

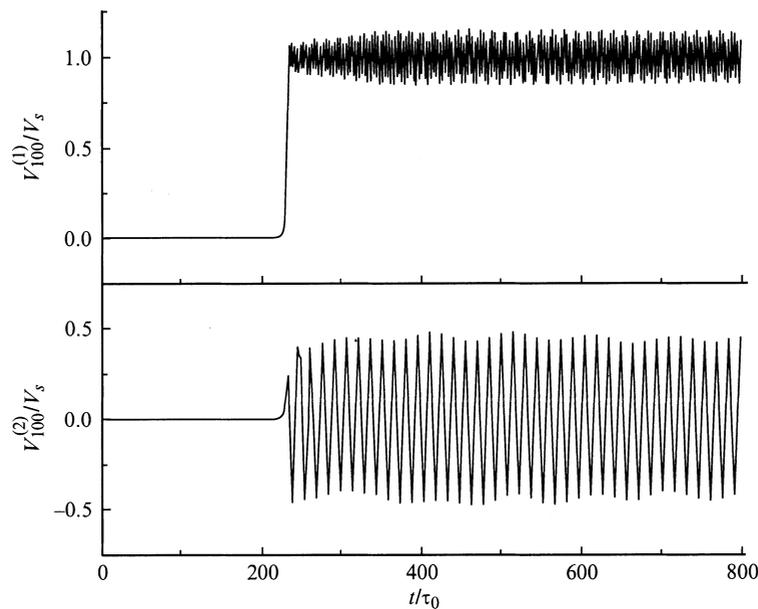


Рис. 3. Осциллограммы напряжения в 100-й ячейке линии с нормальной ($V_{100}^{(1)}/V_s$) и аномальной ($V_{100}^{(2)}/V_s$) дисперсией, нормированные на амплитуду УЭМВ. Параметры эквивалентной схемы: $q_0 = \alpha\gamma\tau_0/(1 + \alpha^2) = 0.256$, $\eta = 0.8$, $m_0 = -0.5$, $V_s p/Z_0 M = 8.63905$, $L_{01}/L_0 = 22.5$, $C_{01}/C_0 = 0.1$, $C_{link}/C_0 = 0.16$.

энергетической эффективности имеет вид

$$\eta_{\text{эф}} \sim \left(1 - \frac{\tau_f}{T}\right) \frac{1}{1 + V_{\omega}^{(2)}/V_{\omega}^{(1)}}.$$

Здесь τ_f — длительность фронта УЭМВ в среде без дисперсии [4]. Проведенное численное моделирование показало, что значение энергетической эффективности генерации обратной волны при синхронизме, соответствующем минимуму групповой скорости, составляет порядка 10%, т.е. значительно ниже, чем в случае синхронизма с обратной пространственной гармоникой ЛП с перекрестными емкостными связями [2].

Резюмируя, можно сказать, что при синхронизме фронта УЭМВ с обратной волной в связанных ЛП (лестничная система и квазикоаксиал), когда основной поток мощности генерируемой волны идет вне области, заполненной ферритом, возможно значительное снижение затухания ВЧ колебаний по сравнению с рассмотренными ранее случаями синхронизма УЭМВ с прямой волной [1] или обратной пространственной гармоникой [2]. Это обстоятельство делает рассмотренную в настоящей работе систему весьма перспективной для создания на ее основе генератора мощных (50–100 MW) радиоимпульсов длительностью порядка 10^3 периодов колебаний с частотой заполнения в диапазоне 500–1000 МГц. При этом, как и в случае возбуждения фронтом УЭМВ синхронных прямых волн в ЛП с ферритом [1], сохраняется возможность широкой электронной перестройки частоты заполнения радиоимпульса.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 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., Гапонов А.В. // Изв. вузов. РнЭ. 1964. № 7. С. 1188–1197.
- [4] Белянцев А.М., Гапонов А.В., Фрейдман Г.И. // ЖТФ. 1965. Т. 35. Вып. 4. С. 678–689.