УДК 621.372.2.052.3.018.78

И.Е. Самотин, А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов, Р.В. Киричек

Использование плоского силового кабеля как защитного устройства от сверхкоротких импульсов

Приведены результаты компьютерного и экспериментального моделирования эффекта модального разложения импульса в плоских силовых кабелях. Исследовано влияние граничных условий на концах пассивного проводника на разложение импульса в многокаскадных структурах. Показана практическая применимость плоских кабелей в качестве защиты от сверхкороткого импульса.

Ключевые слова: модальное разложение импульса, погонная задержка мод, плоский силовой кабель, моделирование, эксперимент.

Для стремительного развития и распространения радиоэлектронных устройств различного применения, наблюдаемого в настоящее время, характерна необходимость обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС). Актуальной задачей ЭМС является защита радиоэлектронных устройств от мощных сверхкоротких импульсов (СКИ) [1].

Известно, что включаемые на входе аппаратуры приборы защиты обладают рядом недостатков (малая мощность, недостаточное быстродействие, паразитные параметры), затрудняющих защиту от мощных СКИ [2]. Эффективная защита в широком диапазоне воздействий требует сложных многоступенчатых устройств. Между тем, наряду с высокими характеристиками, практика требует простоты и дешевизны, так что необходим поиск новых принципов совершенствования защиты.

Один из таких принципов основан на использовании неуравновешенной связи [3], приводящей к эффекту модального разложения импульса в отрезках связанных линий, показанному на примере микрополосковых линий [4, 5], а также в плоском трёхпроводном силовом кабеле [6]. Ряд работ [7–11] свидетельствует о возможности создания устройств защиты за счёт последовательного деления импульсов на импульсы меньшей амплитуды. Такие устройства могут отличаться радиационной стойкостью, малой массой и дешевизной, а в случае кабеля ещё и массовым применением. По существу можно предположить даже возможность использования самого кабеля, например обычного трёхпроводного силового кабеля, наряду с его основной функцией электропитания, ещё и в качестве устройства защиты от помеховых импульсов. Однако применимость силового кабеля для защиты от СКИ на практике требует более детального исследования.

Цель данной работы – показать практическую применимость плоских кабелей в качестве защиты от СКИ. Для этого необходимо: проанализировать влияние особенностей диэлектрического заполнения распространённых плоских кабелей, рассмотреть возможность увеличения коэффициента деления импульсов, исследовать влияние поглощающих нагрузок, выполнить экспериментальное моделирование.

Рассмотрим эффект модального разложения в отрезках плоских кабелей марок ВВГ и ПУГНП, широко применяемых для электропроводки в бытовых и производственных помещениях. По структуре поперечного сечения эти кабели делятся на 2 группы: с воздухом (рис. 1, *а*) и без него (рис. 1, *б*). Их размеры приведены в табл. 1.

а *б*

Рис. 1. Поперечное сечение кабелей: *а* – с воздухом, *б* – без воздуха

Моделирование кабелей выполнено в системе компьютерного моделирования электромагнитной совместимости TALGAT [12]. Сначала полагалось, что потерь и дисперсии нет. Этапы моделирования: 1) построение геометрической модели поперечного сечения структуры и сегментация её границ; 2) вычисление погонных коэффициентов матриц электромагнитной (**L**) и электростатической (**C**) индукции; 3) вычисление коэффициентов матрицы импедансов (**Z**), погонных задержек нечётной (τ_o) и чётной мод (τ_e) и их разности; 4)

вычисление временного отклика. Коэффициенты матрицы **Z**, погонные задержки мод и их разность приведены в табл. 2.

Таблица 1

Размеры кабелей, мм

Марка кабеля	Радиус жил r_1	Радиус изоляции r_2	Радиус оболочки r_3
ВВГ 3Ч1,5*	0,69	1,20	2,06
ВВГ 3Ч2,5*	0,89	1,35	2,16
ВВГ 3Ч4*	1,13	1,83	2,88
ПУГНП 3Ч1,5*	0,69	1,18	1,95
ПУГНП 3Ч2,5**	0,90	1,38	2,00
ПУГНП 3Ч4**	1,13	1,60	2,28

* – кабели с воздухом; ** – кабели без воздуха.

Таблица 2

Вычисленные параметры плоских кабелей

Марка кабеля	Z_{11}, Ом	Z_{12}, Ом	τ_o, нс/м	τ_e, нс/м	$\tau_o-\tau_e$, нс/м
ВВГ 3Ч1,5	92,35	19,60	5,090	4,777	0,313
ВВГ 3Ч2,5	79,86	14,79	4,977	4,676	0,302
ВВГ 3Ч4	85,98	16,87	5,048	4,713	0,335
ПУГНП 3Ч1,5	90,80	18,85	5,063	4,743	0,320
ПУГНП 3Ч2,5	73,79	12,56	5,602	5,063	0,539
ПУГНП 3Ч4	65,44	9,98	5,594	5,073	0,521

Для модального разложения важным параметром является разность погонных задержек мод в линии передачи [4]. У плоских кабелей её величина, как следует из табл. 2, составляет более 0,3; 0,5 нс/м. Причем, при равном сечении жил, у кабелей без воздуха она в 1,6–1,8 раза больше, чем у кабелей с воздухом. Большее значение разности позволяет уменьшить длину структуры для деления заданного импульса, либо поделить импульс большей длительности [4].

Рассмотрим возможность увеличения коэффициента деления. Эффект модального разложения в N отрезках трёхпроводного плоского кабеля (рис. 2) заключается в делении импульса (помехи) на 2^N импульсов с амплитудами в 2^N раз меньшими, чем у исходного [5].

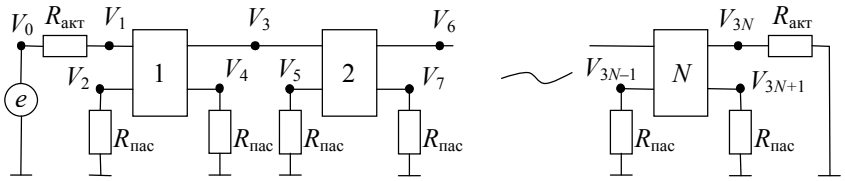


Рис. 2. Схема из N отрезков кабеля для модального разложения импульса

Полное разложение импульса в отрезке пары связанных линий длиной l имеет место, если общая длительность импульса t_Σ меньше разности задержек распространения мод в линии. Для полного разложения в N отрезках минимальная длина k-го отрезка определяется по формуле [5]

$$l_k = l\cdot(2^{k-1}),\ \ k = 1,\ \ldots,\ N$$

при длине структуры из N отрезков

$$L_N = l\cdot(2^N-1).$$

Таким образом, параметры импульса, число и параметры отрезков для его разложения связаны простыми расчётными соотношениями.

Сигнал трапециевидной формы, с фронтами и длительностью плоской вершины по 100 пс, подавался между левым (активным) и центральным (опорным) проводниками кабеля. Правый проводник был без воздействия (пассивным). Отклики вычислялись во всех узлах (V_0–V_{3N+1}) структуры при различных значениях $R_{пас}$, для N = 1, 2, 3.

Для кабеля ПУГНП 3×4 в случае псевдосогласования (термин введён в [13]) структуры ($R_{пас} = R_{акт} = Z_{11} = Z_{22}$) отклики показаны на рис. 3. Видно, что с ростом числа отрезков количество импульсов в конце структуры удваивается, их амплитуды уменьшаются в 2 раза и равны между собой.

Для практической применимости важно упростить и удешевить устройство защиты. Псевдосогласование требует включения резисторов. Рассмотрим замену резисторов в пассивной линии на более простые варианты: короткое замыкание (КЗ) и холостой ход (ХХ).

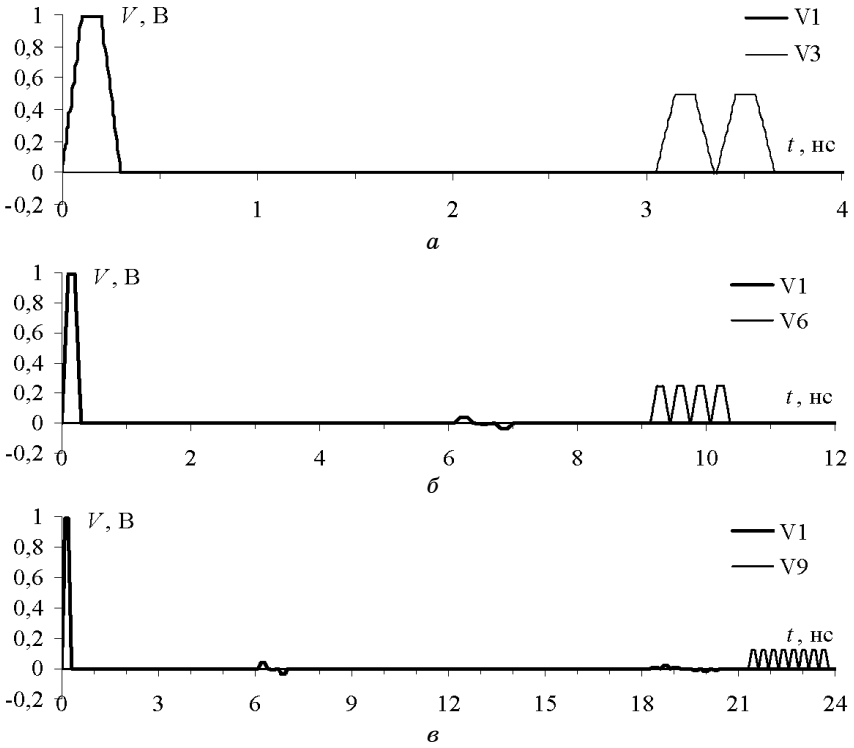


Рис. 3. Сигналы в начале (–) и конце (–) активного проводника псевдосогласованной структуры из кабеля ПУГНП 3×4: *а* – 1 отрезок 0,6 м; *б* – 2 отрезка (0,6+1,2) м; *в* – 3 отрезка (0,6+1,2+2,4) м

На рис. 4 приведены отклики для отрезка кабеля ПУГНП 3×1,5 при различных граничных условиях на концах пассивного проводника, при псевдосогласовании на активном. Видно, что в отличие от псевдосогласования (см. рис. 4, *а*) рассогласование отрезка ведёт к различию амплитуд импульсов: при ХХ амплитуда первого импульса уменьшается, а второго – увеличивается (см. рис. 4, *б*), при КЗ – наоборот (см. рис. 4, *в*). Примечательно, что при КЗ в начале и ХХ в конце (см. рис. 4, *г*), а также при ХХ в начале и КЗ в конце (см. рис. 4, *д*), амплитуды импульсов разложения такие же, как и при псевдосогласовании, что позволяет отказаться от резисторов. Интересно, что существенное различие форм и амплитуд импульсов в конце активной линии, а также отражений в начале активной линии можно использовать в целях модального зондирования [14, 15]. Отметим также, что сравнение рис. 3, *а* и рис. 4, *а* показывает, что полное разложение одного и того же импульса в кабеле с воздухом происходит при большей длине отрезка (0,95 м), чем в отрезке кабеля без воздуха (0,6 м).

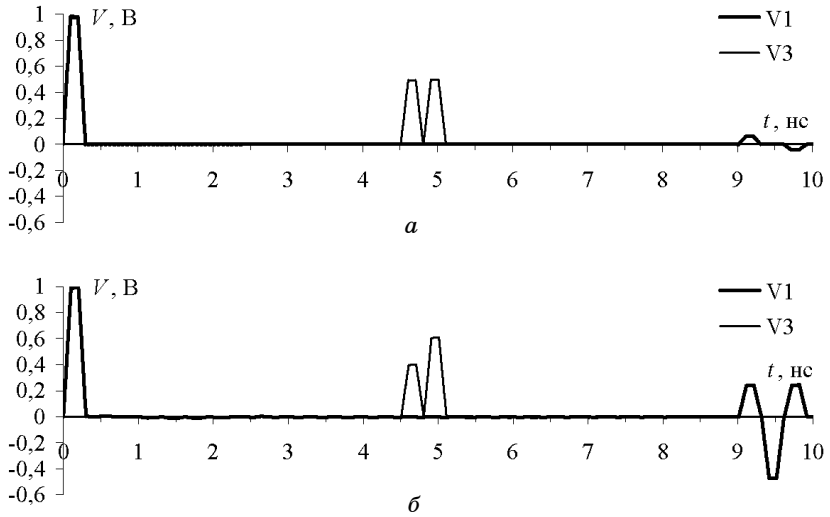


Рис. 4 (начало)

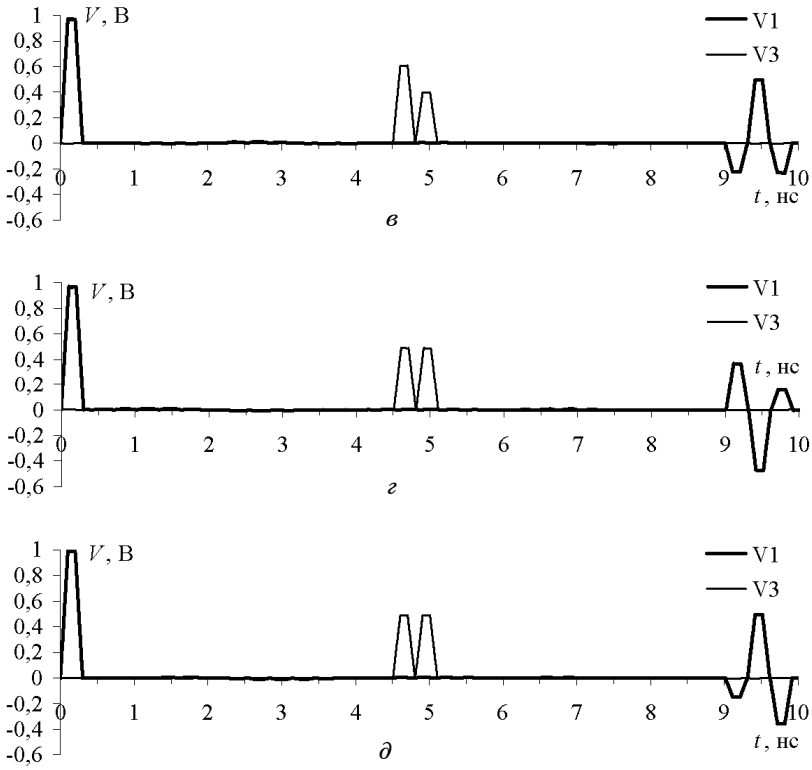
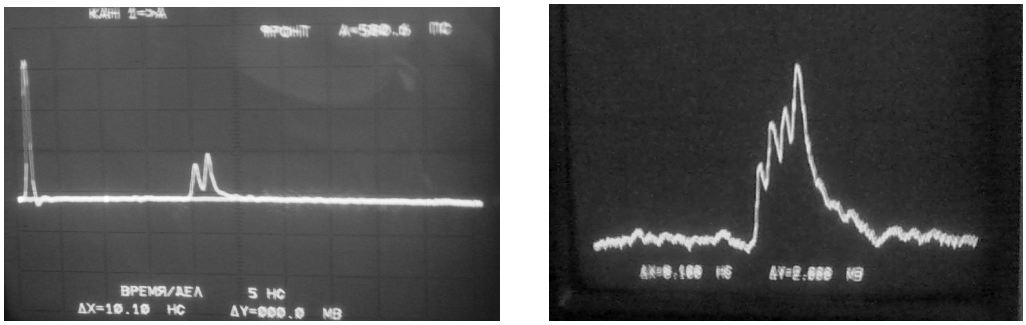


Рис. 4 (продолжение)
Сигналы в начале (–) и конце (–) активного проводника отрезка (0,95 м) кабеля ПУГНП 3×1,5 при разных граничных условиях на концах пассивного проводника:
а – псевдосогласование; *б* – начало и конец – ХХ; *в* – начало и конец – КЗ;
г – начало – КЗ, конец – ХХ; *д* – начало – ХХ, конец – КЗ

Выполнен эксперимент, подтверждающий эффект модального разложения в плоских кабелях и его отсутствие в круглых [16]. На рис. 5, *а* показан исходный импульс и 2 импульса в конце одного отрезка кабеля ПУГНП 3×4 длиной 4,8 м, а на рис. 5, *б* – 4 импульса (с наложением последующих импульсов на растянутые из-за дисперсии спады предыдущих) в конце двух отрезков ПУГНП 3×1,5 длиной 5 и 10 м при ХХ на пассивном проводнике.



а *б*

Рис. 5. Результаты эксперимента: *а* – 1 отрезок, *б* – 2 отрезка

Результаты компьютерного моделирования эксперимента из рис. 5, *а* приведены на рис. 6. Видна сопоставимость результатов моделирования и эксперимента: исходный импульс делится на 2 импульса меньшей амплитуды; при ХХ на пассивном проводнике амплитуда второго импульса больше амплитуды первого. Различие результатов моделирования и эксперимента обусловлено рядом факторов.

Влияние некоторых из них можно выявить моделированием. Так, практически совпадают результаты моделирования отклика на оцифрованный реальный импульс генератора (именно они и показаны) и на трапециевидный импульс (не показаны). Учет потерь (матрицы **R** и **G**, и их частотная зависимость) показывает их сильное влияние (амплитуды уменьшаются в 2 раза, фронты и спады становятся более пологими). Сильное влияние

показывает анализ чувствительности к отклонению параметров от номинальных: например, крайние значения совокупности некоторых из параметров (- -) приводят к уменьшению задержки самой быстрой (четной) моды от 24 до 20 нс. Измеренное время задержки (с учетом предела допускаемой погрешности 7,5% для осциллографа С9–11) составляет 19,9±1,5 нс, давая правую границу задержки в 21,4 нс. Таким образом, можно говорить об удовлетворительном совпадении результатов моделирования и эксперимента. В заключение отметим, что при моделировании не учитывались влияния неоднородностей на стыках кабеля и соединителей, различия значений ε_r и tgδ изоляции жил и оболочки кабеля, а также их частотная зависимость.

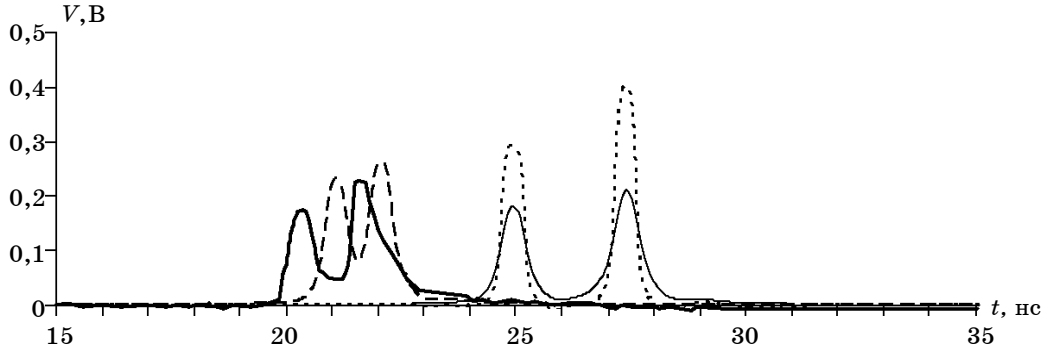


Рис. 6. Формы сигнала в конце пассивного проводника кабеля ПУГНП 3×4. Эксперимент (—), моделирование: без учета потерь (···), с учетом потерь (–), с учетом потерь при отклонениях от номинальных значений (r_1=1,13$^{+0,2}$ мм, r_2=1,6$^{-0,1}$ мм, ε_r=3,10$^{-0,62}$) (- -)

Таким образом, широко распространенные плоские силовые кабели, наряду с их основным назначением, можно использовать в качестве защиты от сверхкоротких импульсов, за счет их деления на импульсы меньшей амплитуды. Например, отрезок кабеля ПУГНП 3Ч4 длиной 10 м благодаря разности погонных задержек мод около 0,5 нс/м позволит поделить пополам импульс длительностью 5 нс и, при необходимости, поделить на большее число импульсов более короткие импульсы. Такое устройство защиты может быть: радиационно стойким, т.к. не требует полупроводниковых приборов; дешевым, т.к., кроме кабеля, может содержать только резисторы; легким и надежным, т.к. вместо резисторов может использоваться даже соединение жил кабеля или разрыв.

Литература

1. Сахаров К.Ю. Исследование функционирования локальной вычислительной сети в условиях воздействия сверхкоротких электромагнитных импульсов / К.Ю. Сахаров, А.А. Соколов, О.В. Михеев и др. // Технологии ЭМС (Москва). – 2006. – №3 (18). – С. 36–45.

2. Messier M.A. Responses of telecom protection to three IEC waveforms / M.A. Messier, K.S. Smith, W.A. Radasky, M.J. Madrid // Proc. of the 15th Int. Zurich Sump. on Electromagnetic Compatibility. Zurich, Switzerland, 2003. – Feb. 18–20, – P. 127–132.

3. Малютин Н.Д. Многосвязные полосковые структуры и устройства на их основе. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1990. – 164 с.

4. Газизов Т.Р. Исследование модальных искажений импульсного сигнала в многопроводных линиях с неоднородным диэлектрическим заполнением / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, О.М. Кузнецова-Таджибаева // Электромагнитные волны и электронные системы (Москва). – 2004. – Т. 11, №11. – С. 18–22.

5. Газизов Т.Р. Модальное разложение импульса в отрезках связанных линий как новый принцип защиты от коротких импульсов / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий // Технологии ЭМС (Москва). – 2006. – №4 (19). – С. 40–44.

6. Заболоцкий А.М. Разложение и восстановление импульса в линиях передачи / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Электромагнитные волны и электронные системы (Москва). – 2006. – Т. 11, №11. – С. 4–7.

7. Заболоцкий А.М. Модальная фильтрация в отрезках кабелей силового питания / А.М. Заболоцкий, И.Е. Самотин // 15-е Туполевские чтения: матер. междунар. молодёжной науч. конф. (Казань), 9–10 ноября 2007 г. – Казань: Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева, 2007. – С. 189–191.

8. Самотин И.Е. Распространение короткого импульса в плоских кабелях силового питания при различных граничных условиях на концах пассивного проводника / И.Е. Самотин, А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Электронные и электромеханические

системы и устройства: тез. докл. науч.-техн. конф. молодых специалистов «НПЦ «Полюс» (Томск), 10–11 апреля 2008 г. – Томск: ОАО «НПЦ «Полюс», 2008. – С. 67–69.

9. Заболоцкий А.М. Защита от короткого импульса в линиях передачи с различными граничными условиями / А.М. Заболоцкий, И.Е. Самотин // 16-е Туполевские чтения: матер. междунар. молодёжной науч. конф. (Казань), 28–29 мая 2008 г. – Казань. Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2008. – С. 243–245.

10. Gazizov T.R. Modal Decomposition of UWB Pulse in Power Cable Structures: Simple Experiment Showing Useful Possible Applications / T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky, I.E. Samotin // Book of abstracts EUROEM 2008 (Lausanne, Switzerland), 21–25 July 2008. – Lausanne, 2008. – P. 62.

11. Самотин И.Е. Разложение короткого импульса в отрезках кабеля силового питания при различных граничных условиях на концах пассивного проводника / И.Е. Самотин, А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Матер. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». Томск, 29–30 сентября 2008 г. – Томск: В-Спектр, 2009. – С. 23–26.

12. Газизов Т.Р. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2009614871. TALGAT 2008. / Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т. и др. – М.: Роспатент, 08.09.2009. – Бюл. – №4. – С. 313.

13. Broyde F. A new method for the reduction of crosstalk and echo in multiconductor interconnections / F Broyde, E Clavelier // IEEE Transactions on circuits and systems. – 2005. – Vol. 52, №2. – P. 405–416.

14. Орлов П.Е. Использование модальных эффектов для диагностики многопроводных соединений / П.Е. Орлов, А.М. Заболоцкий, И.Е. Самотин // Электронные и электромеханические системы и устройства: тез. докл. науч.-техн. конф. молодых специалистов «НПЦ «Полюс». Томск, 10–11 апреля 2008 г. – Томск, 2008. – С. 179–181.

15. Пат. 2 386 964 РФ, МПК G 01 N 27/87. Устройство обнаружения, идентификации и диагностики многопроводных линий передачи / Т.Р. Газизов, А.М. Заболоцкий, П.Е. Орлов и др. – №2 009 108 905 / 28 (011919); заявл. 10.03.2009; опубл. 20.04.2010. – Бюл. – №11. – С. 812–813.

16. Gazizov T.R. Experimental results on ultra wide band pulse propagation in three-conductor power cables of flat and circular cross sections / T.R. Gazizov, A.M. Zabolotsky, I.E. Samotin // Proc. of Int. Siberian conf. on control and communications (SIBCON–2009) (Tomsk). March 27–28, 2009. – Tomsk: The Tomsk IEEE Chapter & Student Branch, 2009. – P. 264–269.

Самотин Иван Евгеньевич
Аспирант каф. телевидения и управления ТУСУРа
Тел.: (382-2) 41-33-68
Эл. почта: iesam_84@mail.ru

Заболоцкий Александр Михайлович
Научный сотрудник каф. телевидения и управления ТУСУРа
Тел.: (382-2) 41-33-68
Эл. почта: zabolotsky_am@mail.ru

Газизов Тальгат Рашитович
Доцент, канд. техн. наук, с.н.с. ТУСУРа
Тел.: (382-2) 41-33-68
Эл. почта: talgat@tu.tusur.ru

Киричек Руслан Валентинович
Научный сотрудник НИИЦ ФГУП «ЦентрИнформ»
Тел.: 812-303-90-20

Samotin I.E., Zabolotsky A.M., Gazizov T.R., Kirichek R.V.

The Usage of flat power cable as a protective device against ultra short pulses

Simulation and experimental results for modal decomposition of a pulse in flat power cables are presented. The effect of boundary conditions at the ends of a passive conductor on pulse decomposition in cascaded structures is investigated. The practical usability of flat cables as a protective device against ultra short pulses is shown.

Keywords: modal decomposition of a pulse, per unit length mode delay, flat power cable, simulation, experiment.