

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ  
В МНОГОПРОВОДНЫХ СТРУКТУРАХ С НЕОДНОРОДНЫМ  
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ЗАПОЛНЕНИЕМ**

*I.G. Bevzenko*

**INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR OF ULTRASHORT PULSES  
IN MULTIWIRE STRUCTURES WITH INHOMOGENEOUS  
DIELECTRIC FILLING**

Представлены результаты исследований поведения сверхкоротких импульсов в многопроводных структурах с неоднородным диэлектрическим заполнением. Исследовано пять вариантов реализации структур, в которых могут появиться модальные явления. Данные явления могут быть причиной несрабатывания защитных приборов, либо наоборот, использоваться в качестве защиты от электромагнитных помех. Исследованы варианты создания модальных антиподов, которые можно получить за счет следующего: изменения расположения проводников на среднем слое многослойной печатной платы; изменения диэлектрической проницаемости окружающей среды; увеличения толщины диэлектрического слоя; заполнения диэлектриком внутренних полостей; изменения расположения проводников в кабеле.

**МОДАЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ; СВЕРХКОРОТКИЕ ИМПУЛЬСЫ; НЕОДНОРОДНОЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ЗАПОЛНЕНИЕ; ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ И КАБЕЛИ; МНОГОПРОВОДНЫЕ СТРУКТУРЫ.**

The paper presents the results of studying the behavior of ultrashort pulses in multiwire structures with inhomogeneous dielectric filling. Five different versions of the structures where the modal phenomena may appear have been investigated. These phenomena may be a reason why the safety devices malfunction, or, on the contrary, can be used as a protection against electromagnetic interference. Several variants of creating the modal antipodes have been studied. This may be achieved by the following: changing the location of the conductors in the middle layer of the multilayer printed circuit board; changing the permittivity of the environment; increasing the dielectric layer thickness; filling the internal cavities with the dielectric; changing the location of the conductors in the cable.

**MODAL PHENOMENA; ULTRASHORT PULSES; INHOMOGENEOUS DIELECTRIC FILLING; PRINTED CIRCUIT BOARDS AND CABLES; MULTIPLE STRUCTURES**

Развитие и широкое распространение электронных устройств различного назначения требует обеспечения их электромагнитной совместимости (ЭМС). Элементы вычислительной техники и систем управле-

ния связаны между собой межконтактными электрическими соединениями, или межсоединениями (interconnects). В настоящее время широко используются многопроводные межсоединения с неоднородным диэ-

лектрическим заполнением. Импульсные сигналы, распространяющиеся в них, можно разделить на два вида: полезные сигналы, используемые для передачи информации, и нежелательные сигналы, появившиеся в результате непреднамеренных и преднамеренных электромагнитных помех.

Часто помехи передаются по проводникам, что приводит к нарушению нормального функционирования систем телекоммуникаций. Особенно опасны сверхкороткие импульсы, способные вывести аппаратуру из строя. Это создает потребность в разработке специальных устройств защиты, основанных на новых технических принципах [1].

В печатных платах (ПП) могут возникать модальные искажения [2], которые применимы для защиты [3–5] от опасных сверхкоротких импульсов высокого напряжения [6]. Отсутствие срабатывания защитных устройств из-за возможности модального разложения и последующего восстановления импульса (РПВИ) в структурах с модальными антиподами [7] (отрезки трехпроводных связанных линий, у которых разницы задержек синфазной и дифференциальной мод противоположны по знаку) может усугубить эту проблему [8–11].

Цель данной статьи – представить результаты исследований поведения сверхкоротких импульсов в многопроводных структурах с неоднородным диэлектрическим заполнением.

#### **Исследование модальных явлений, возникающих при расположении проводников на среднем слое в многослойной печатной плате (МПП)**

В работе [12] показан стек исследуемой МПП и ее параметры. В данном разделе приведены результаты моделирования структуры с проводниками на среднем слое (рис. 1 а) при разных значениях разноса  $s$  между проводниками, и ширинами проводников 1 и 2 ( $w_1$  и  $w_2$ ). Расстояние от края структуры до проводника  $d = 2w_1$ .

Компьютерное моделирование выполнялось в системе квазистатического анализа TALGAT [13], потери, дисперсия и высшие типы волн не учитывались. В работе

[9] представлено сравнение результатов вычислений в программах CST MWS (электродинамический анализ с потерями и без) и TALGAT (квазистатический анализ без потерь). Анализ и обработка полученных числовых и графических данных позволяют заключить, что результаты вычислительного эксперимента, полученные в CST MWS и TALGAT, для плоского кабеля с различным числом проводников и для одиночной линии и пары связанных линий согласуются между собой. Поэтому достаточно проводить квазистатический анализ в TALGAT и обойтись без электродинамического анализа CST MWS при исследовании погонных задержек мод в печатных платах и кабелях.

В самом общем случае распространение электрических сигналов в межсоединениях описывается уравнениями Максвелла. Поэтому строгое решение задачи вычислительного моделирования межсоединений требует численного решения уравнений Максвелла для граничных условий, определяемых конфигурацией межсоединений, при начальных значениях, задаваемых электрическими сигналами в межсоединениях. Однако необходимые для этого вычислительные затраты оказываются крайне высокими даже для относительно простых конфигураций. Поэтому такой анализ, называемый электродинамическим или полноволновым (поскольку он учитывает все типы волн, возникающих в межсоединениях), используется при анализе межсоединений, как правило, только на частотах в десятки и сотни гигагерц.

При статическом подходе делается упрощающее предположение, что в межсоединениях отсутствуют потери, дисперсия и высшие типы волн, и может распространяться только основная, поперечная волна. Это сводит уравнения Максвелла к телеграфным уравнениям, решение которых значительно проще, но весьма точно для большинства практических межсоединений. При допущении распространения только поперечной волны получаются точные результаты даже при наличии небольших потерь в межсоединениях. Этот случай известен как квазистатический подход. При нём произвольная схема межсоедине-

ний представляется обобщенной схемной моделью, напряжения и токи в любой точке которой определяются из телеграфных уравнений для каждого отрезка многопроводной линии передач (МПЛП) с учётом граничных условий на концах отрезка, задаваемых окончаниями.

На рис. 2 представлены зависимости  $\tau_e$

и  $\tau_o$  от  $s$  с шагом 0,1 мм, при  $w_1 = w_2 = 0,5...2$  мм. Видно, что при изменении  $s$  на графиках  $\tau_e$  и  $\tau_o$  появляются максимумы и минимумы. Есть значение  $s$ , при котором  $\Delta\tau = 0$ . На рис. 1 б) представлена аналогичная зависимость, но для  $\Delta\tau$ . Видно, что есть области, где  $\Delta\tau$  имеет разные знаки, и чем больше значение  $w$ , тем меньше значение

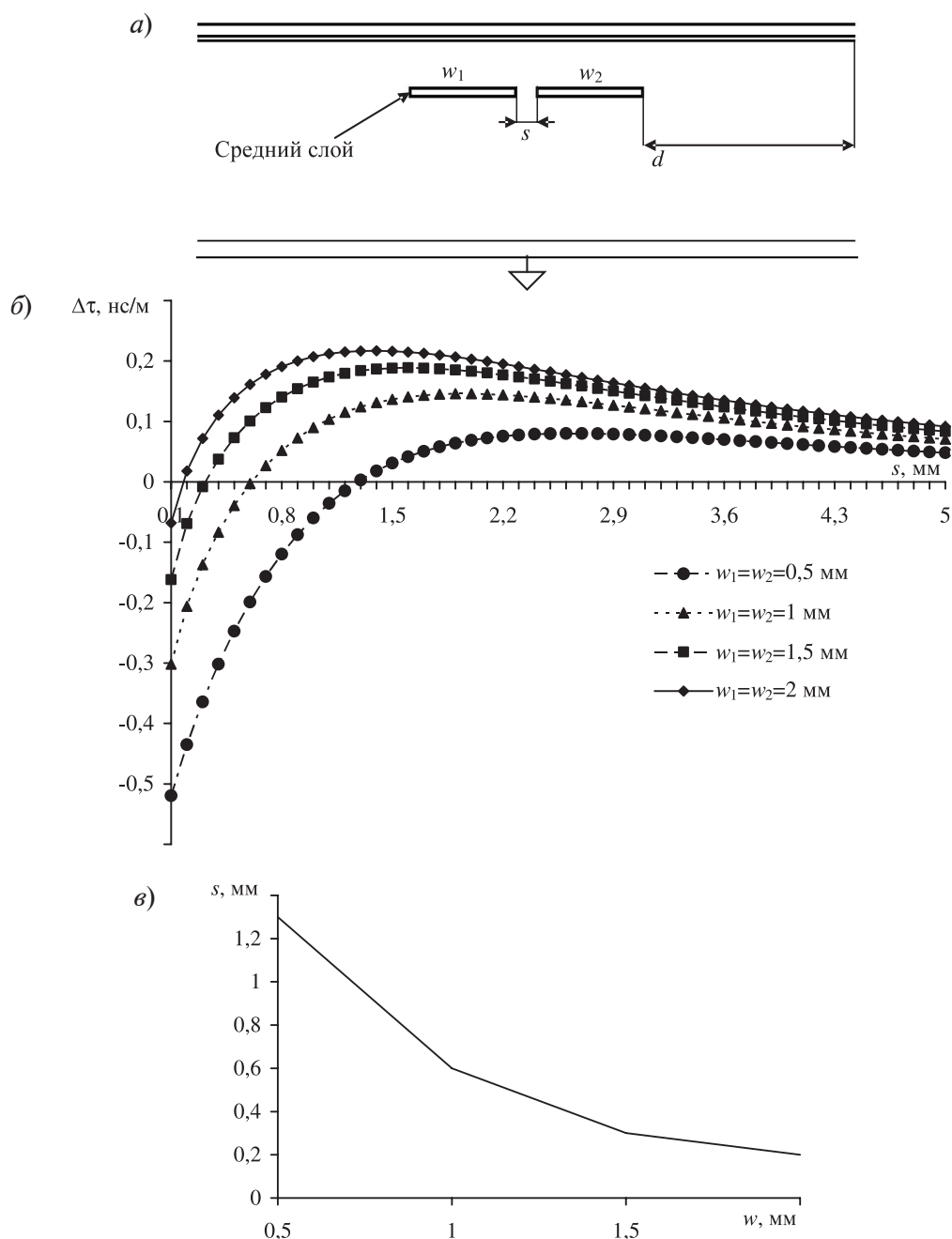


Рис. 1. Поперечное сечение исследуемой структуры при  $s = 0,1$  мм,  $w_1 = w_2 = 0,5$  мм (а); зависимость  $\Delta\tau$  от  $s$  при  $w_1 = w_2 = 0,5...2$  мм (б); зависимость  $s$ , при котором  $\Delta\tau = 0$ , от  $w$  (в)

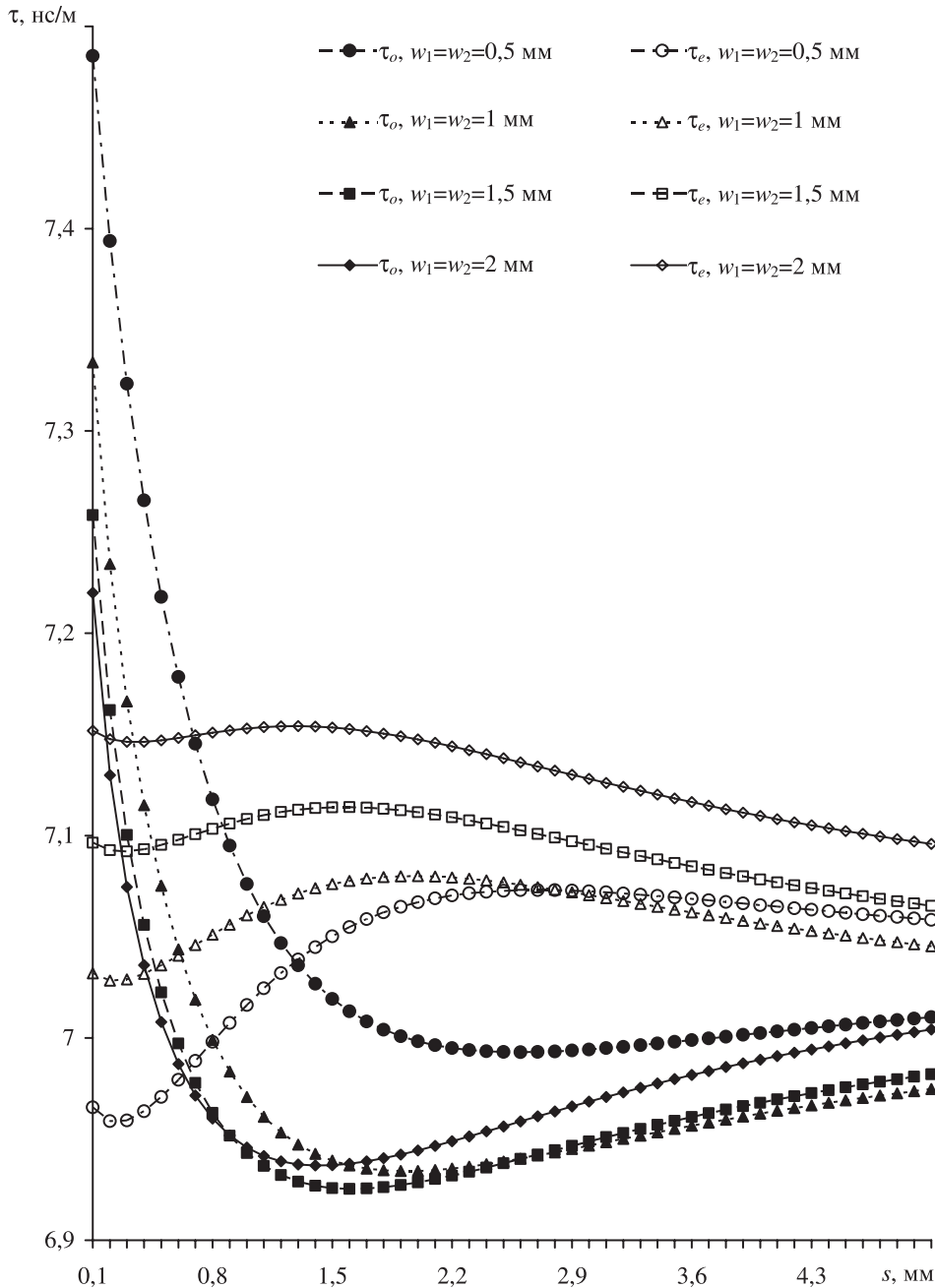


Рис. 2. Зависимости  $\tau_e$  и  $\tau_o$  от  $s$  при  $w_1 = w_2 = 0,5...2$  мм

$s$ , при котором  $\Delta\tau = 0$ . На рис. 1 в показана зависимость  $s$ , при котором  $\Delta\tau = 0$ , от  $w$ . Видно, что чем больше  $s$ , тем меньше  $w$ . Следовательно, получить антипод с наименьшим разносом проводников можно, увеличивая ширину.

Из данного раздела видно, что увеличение значений  $s$  и  $w$  влияет на такие параметры,

как  $\tau_e$ ,  $\tau_o$ ,  $\Delta\tau$ . Из всех рассмотренных структур в данном разделе, минимальное значение  $\Delta\tau$  в структуре при  $w_1 = w_2 = 0,5$  мм и  $s = 0,1$  мм ( $\Delta\tau_{\min} = -0,51976$  нс/м), а максимальное — при  $w_1 = w_2 = 2$  мм и  $s = 1,4$  мм ( $\Delta\tau_{\max} = 0,21701$  нс/м). Результаты моделирования показывают, что антипод для структуры из двух отрезков может

возникнуть если, например, отрезки 1 и 2 имеют одинаковый разнос, но разную ширину проводников.

#### **Исследование изменения значения диэлектрической проницаемости проводниковой структуры**

В данном разделе представлены результаты моделирования варианта модального антипода кабеля АППВ-3×6, полученного погружением отрезка кабеля в среду с относительной диэлектрической проницаемостью большей, чем у его изоляции [14].

В качестве исходной структуры выбран кабель марки АППВ-3×6, который широко используется в бытовых и промышленных сетях. Его поперечное сечение построено в системе TALGAT (рис. 3 а). Разность погонных задержек мод, при материале оболочки кабеля из ПВХ ( $\epsilon_{r1} = 3$ ), составляет 0,337 нс/м.

Можно полагать, что самый простой вариант реализации антипода заданному кабелю – помещение его в среду с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_{r2}$  большей, чем у изоляции кабеля  $\epsilon_{r1}$ . Для проверки этого предположения выполнено вычисление погонных задержек мод кабеля для  $\epsilon_{r2} = 1, 2, \dots, 10$  (рис. 3 б).

Из рис. 3 б видно, что значения погонных задержек при увеличении  $\epsilon_{r2}$  от 1 до 3 сближаются. При  $\epsilon_{r2} = 3$  они становятся равными, поскольку вся среда вокруг проводников становится однородной. При  $\epsilon_{r2} > 3$  разность погонных задержек мод меняет свой знак на противоположный, поскольку  $\tau_e$  становится меньше  $\tau_o$ . Дальнейший рост  $\epsilon_{r2}$  увеличивает разность погонных задержек.

Зависимость модуля разности погонных задержек мод  $|\Delta\tau| = |\tau_e - \tau_o|$  от  $\epsilon_{r2}$  представлена на рис. 3 в. Видно, что при увеличении  $\epsilon_{r2}$  от 1 до 3 значение  $|\Delta\tau|$  уменьшается до нуля, а при  $\epsilon_{r2} > 3$  возрастает и примерно при  $\epsilon_{r2} = 5,25$  становится равным исходному значению 0,33 нс/м. Дальнейший рост  $\epsilon_{r2}$  увеличивает  $|\Delta\tau|$  до 0,9 нс/м при  $\epsilon_{r2} = 10$ .

Таким образом, модальный антипод такого кабеля можно получить погружением его в среду с относительной диэлектрической проницаемостью большей, чем у его

изоляции (такой средой может быть, например, вода). Можно полагать, что чем больше  $|\Delta\tau|$  модального антипода, тем меньшая длина отрезка кабеля антипода понадобится для реализации явления разложения и последующего восстановления импульса.

#### **Исследование зависимости модуля разности погонных задержек мод от параметров дополнительного диэлектрического слоя проводниковой структуры**

В данном разделе сведены результаты, показывающие влияние параметров (в более широком диапазоне  $\epsilon_{r2}$ ) дополнительного диэлектрического слоя на разность погонных задержек для кабеля марки АППВ-3×6. Продемонстрирован выбор параметров модальных антиподов, полученных добавлением слоя внешнего диэлектрика, для этого кабеля.

На рис. 4 а показано поперечное сечение антипода для кабеля марки АППВ-3×6 с дополнительным диэлектрическим слоем  $\epsilon_{r2}$  толщиной  $2H$ . Область внешнего диэлектрического заполнения – воздух ( $\epsilon_{r3} = 1$ ).

Модули разностей погонных задержек мод  $|\Delta\tau|$  в зависимости от  $\epsilon_{r2}$  для разных значений  $H$  представлены на рис. 4 б. Видно, что при увеличении толщины антипода  $\Delta\tau$  меняет свой знак на противоположный при меньшем  $\epsilon_{r2}$ . Отметим, что, чем больше толщина диэлектрического слоя антипода, тем меньшая длина отрезка-антипода понадобится для реализации явления РПВИ. Данный вариант реализации антипода представляется довольно практичным, поскольку его можно получить, например, простым наматыванием изолирующей ленты на кабель.

#### **Исследование увеличения толщины воздушных промежутков между слоями изоляции проводниковой структуры**

В данном разделе исследована возможность создания модального антипода за счет заполнения диэлектриком внутренних полостей [15].

Кабель марки ВВГп-3×1,5 имеет воздушные промежутки ( $\epsilon_{r4}$ ) между слоями изоляции кабеля и проводников (рис. 5 а).

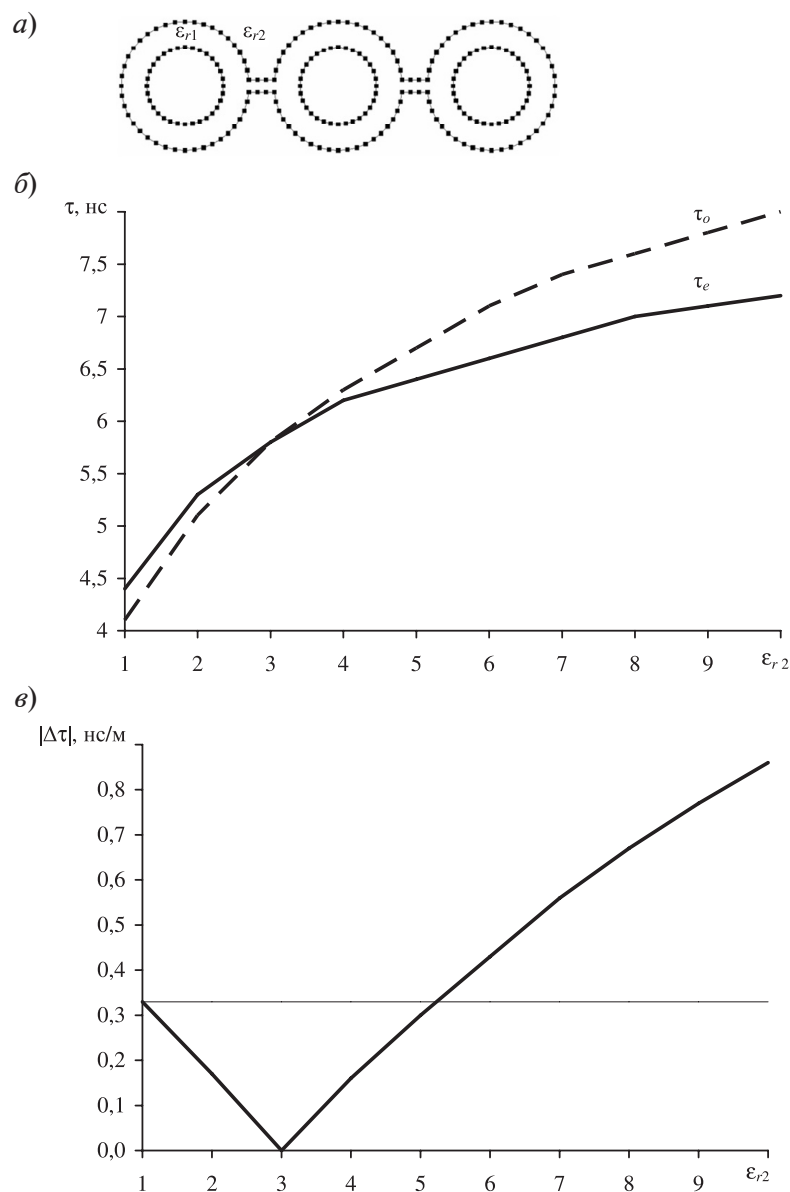


Рис. 3. Поперечное сечение кабеля марки АППВ-3×6 (а); зависимость погонных задержек мод от  $\epsilon_{r2}$ :  $\tau_o$  (---),  $\tau_e$  (—) (б) зависимость  $|\Delta\tau|$  от  $\epsilon_{r2}$  (в)

Если заполнить воздушные промежутки средой с относительной диэлектрической проницаемостью большей, чем у изоляции кабеля, то может получиться скрытый антипод, который трудно обнаружить, т. к. он находится под внешней оболочкой кабеля.

При моделировании полагалось, что  $\epsilon_{r1} = 1$ ,  $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 3$ , а значение  $\epsilon_{r4}$  менялось от 1 до 82 с шагом 1,5. При заполнении кабеля может появиться (по крайней мере, гипотетически) зазор между оболочкой кабеля

и проводниками. Для оценки его влияния вычислены зависимости разности задержек мод для  $H = 1,2$  мм (зазор отсутствует),  $H = 1,22$  мм (зазор 0,02 мм),  $H = 1,4$  мм (зазор 0,2 мм). На рис. 5 б показан увеличенный фрагмент зазора при толщине  $H = 1,22$  мм, а вычисленные зависимости модуля разности задержек мод  $|\Delta\tau|$  от  $\epsilon_{r4}$  для разных  $H$  представлены на рис. 5 в.

Из рис. 5 в видно, что при  $H = 1,2$  мм  $|\Delta\tau|$  увеличивается от 0,32 нс/м при  $\epsilon_{r4} = 1$

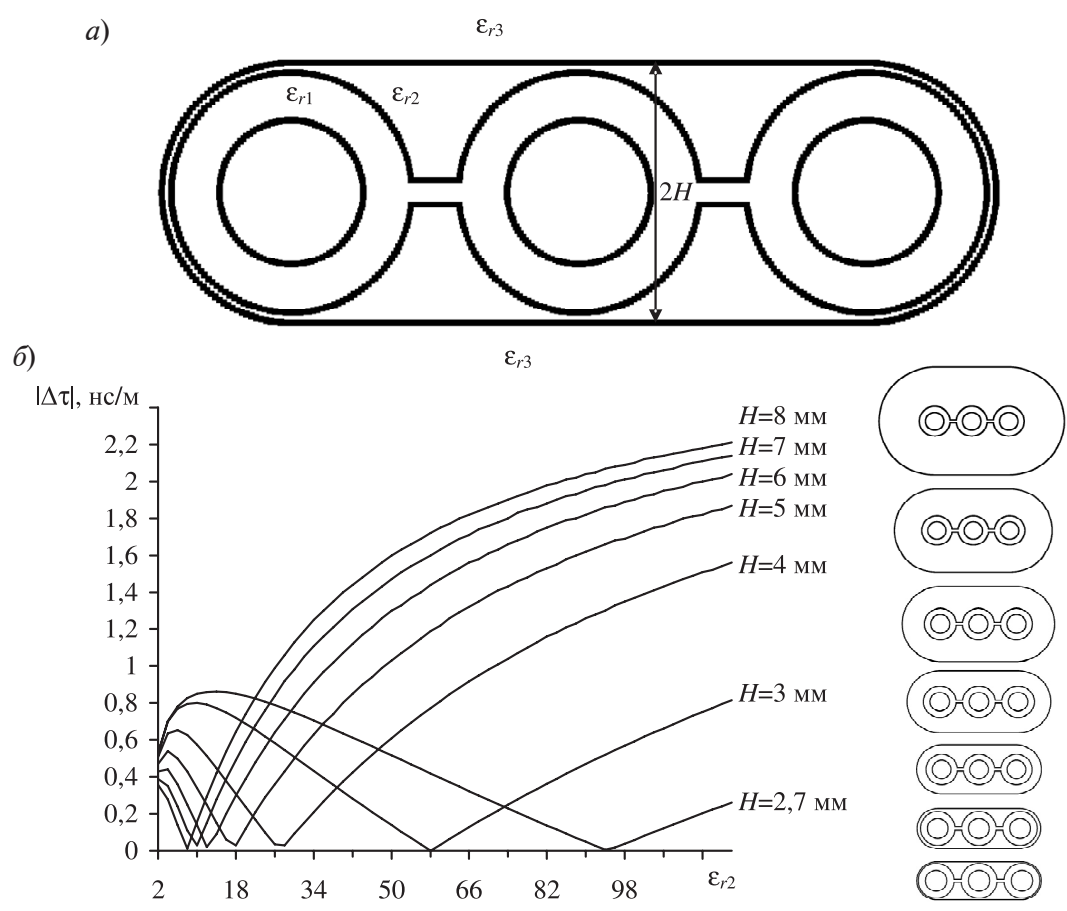


Рис. 4. Поперечное сечение антипода для кабеля марки АППВ-3×6 (а); зависимость  $|\Delta\tau|$  от  $\epsilon_{r2}$  и поперечные сечения структур при изменении  $H$  (б)

до 0,6 нс/м при  $\epsilon_{r4} = 15$ , затем уменьшается во всем диапазоне  $\epsilon_{r4} = 15, \dots, 82$ , однако до нуля так и не доходит, поскольку заполнение воздушных зазоров почти одинаково влияет на обе моды ( $\tau_e$  и  $\tau_o$ ). Следовательно, антипода из данной структуры (какая она есть, без зазора) получить нельзя, и интересно оценить влияние зазора. При  $H = 1,22$  мм  $|\Delta\tau|$  увеличивается до 0,57 нс/м при  $\epsilon_{r4} = 10$  и уменьшается до нуля к концу диапазона  $\epsilon_{r4} = 10, \dots, 75$ . Как видно, наличие малого зазора дает возможность получить антипод, однако данный антипод сделать трудно т. к. нужны значения  $\epsilon_{r4} > 75$  для последующего восстановления импульса. При  $H = 1,4$  мм  $|\Delta\tau|$  увеличивается до 0,53 нс/м при  $\epsilon_{r4} = 5$ , затем уменьшается до нуля к концу диапазона  $\epsilon_{r4} = 5, \dots, 35$ . При  $\epsilon_{r4} > 35$  значение  $\Delta\tau$  меняет свой знак на противоположный, а примерно при

$\epsilon_{r4} = 50$  становится равной по модулю исходному  $|\Delta\tau|$ . Дальнейший рост  $\epsilon_{r4}$  увеличивает  $|\Delta\tau|$ . Это наилучший вариант антипода из рассмотренных. Как видно, увеличение зазора облегчает получение антипода.

Следовательно, создать антипод для кабеля ВВГп-3×1,5 без зазоров между слоями изоляции при  $\epsilon_{r4} \leq 82$  нельзя. Чтобы получить скрытый модальный антипод для такого кабеля, нужно увеличить толщину воздушных промежутков между слоями изоляции и заполнить их, например, водой. Однако на практике получить это сложно.

#### Исследование изменения геометрической формы проводниковой структуры

В данном разделе показана возможность создания антипода за счет изменения расположения проводников на примере кабеля марки АПВ 4. Вычислительный экспери-



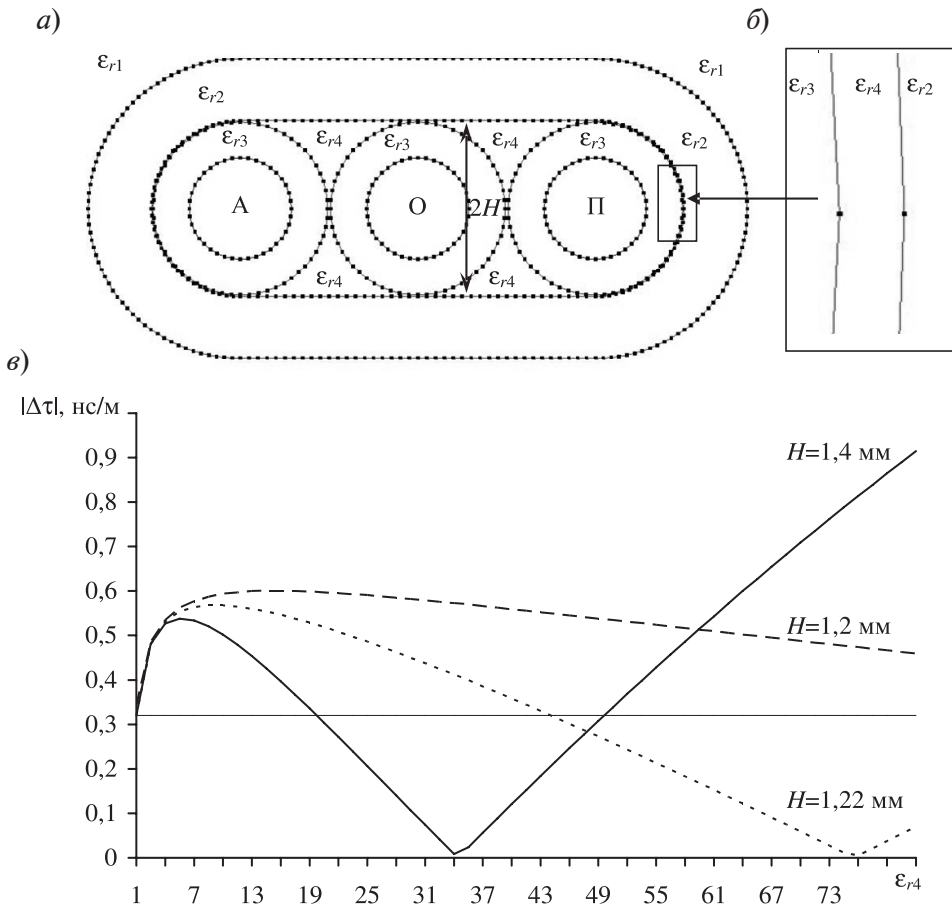


Рис. 5. Поперечное сечение кабеля марки ВВГп-3×1,5 (а); увеличенный фрагмент зазора (б); зависимость  $|\Delta\tau|$  от  $\epsilon_{r4}$  для разных  $H$  (в)

мент на кабеле марки АПВ 4 выполнялся последовательно в три этапа, чтобы показать значение разности погонных задержек мод ( $\Delta\tau = \tau_e - \tau_o$ ) одного знака, уменьшение  $\Delta\tau$  до нуля и уменьшение  $\Delta\tau$  со сменой знака [16].

Для этого изменялись параметры расположения проводников в исследуемом отрезке от плоской структуры (рис. 6 а) к центрально симметричной (рис. 6 б) и к структуре с двумя сближенными проводниками вдали от опорного (рис. 6 в).

Исследуемая конфигурация состоит из трех кабелей марки АПВ 4, расположенных так, что по форме они похожи на плоский трехпроводный кабель (рис. 6 а). В системе TALGAT построено поперечное сечение трех кабелей марки АПВ 4 (рис. 6 б, где  $s$  – расстояние между краями активного А и пассивного П проводников;  $h$  – высота,

на которую отодвигались вверх относительно опорного О активный и пассивный проводники. Диаметр проводника кабеля  $d_1 = 2,2$  мм, диаметр кабеля (включая изолирующий слой) –  $d_2 = 4$  мм.

Сначала исследовалось влияние изменения высоты  $h$  на  $\tau_e$ ,  $\tau_o$ ,  $\Delta\tau$ . Далее исследовалось влияние изменения расстояния  $s$  на  $\tau_e$ ,  $\tau_o$ ,  $\Delta\tau$ . В таблицах 1–3 представлены следующие результаты: зависимость  $\tau_e$ ,  $\tau_o$ ,  $\Delta\tau$  от  $h$  при  $s = 4$  мм; зависимость  $\tau_e$ ,  $\tau_o$ ,  $\Delta\tau$  от  $s$  при  $h = 3,46$  мм; зависимость  $\tau_e$ ,  $\tau_o$  от  $h$  при  $s = 0$  мм.

Анализ и обработка полученных числовых данных позволяют заключить следующее.

1. С увеличением значения  $h$  уменьшаются  $\tau_e$ ,  $\tau_o$ ,  $\Delta\tau$ .
2. Уменьшение  $s$  увеличивает  $\tau_e$ ,  $\tau_o$ , однако  $\Delta\tau$  стремится к нулю (но из-за погреш-



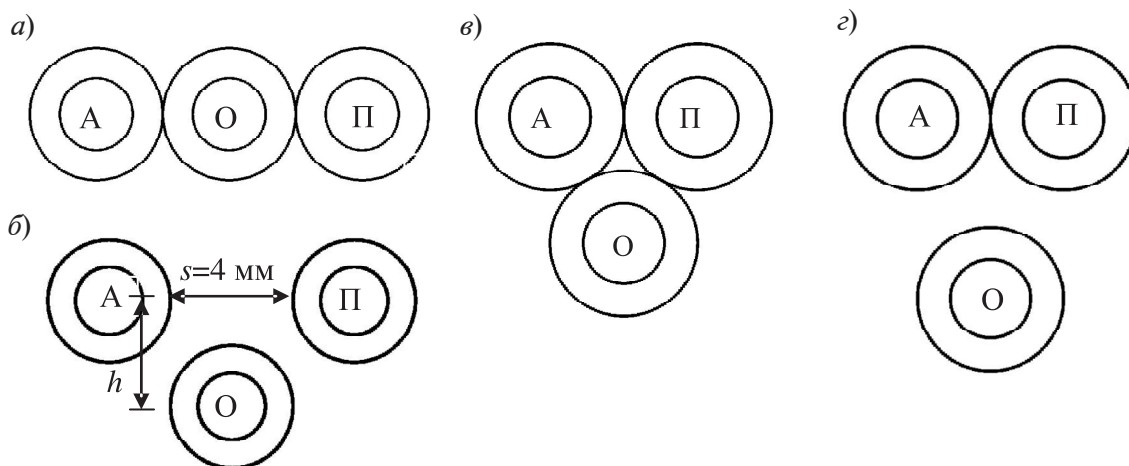


Рис. 6. Поперечное сечение отрезка из трех кабелей АПВ 4: при  $s = 4$  мм,  $h = 0$  мм (а); при  $s = 4$  мм,  $h = 3,46$  мм (б); при  $s = 0$  мм,  $h = 3,46$  мм (в); при  $s = 0$  мм,  $h = 5$  мм (г)

Таблица 1

Зависимость  $\tau_e$ ,  $\tau_o$ ,  $\Delta\tau$  от  $h$  при  $s = 4$  мм

Параметры	Значения						
	$h$ , мм	0	0,7	1,4	2,1	2,8	3,5
$\tau_e$ , нс/м		4,86419	4,78134	4,59907	4,40848	4,24725	4,12
$\tau_o$ , нс/м		4,39457	4,33293	4,20084	4,07145	3,97364	3,90766
$\Delta\tau$ , нс/м		0,46962	0,44841	0,39823	0,33703	0,27361	0,21234

Таблица 2

Зависимость  $\tau_e$ ,  $\tau_o$ ,  $\Delta\tau$  от  $s$  при  $h = 3,46$  мм

Параметры	Значения						
	$s$ , мм	4	3,2	2,4	1,6	0,8	0
$\tau_e$ , нс/м		4,11841	4,19616	4,29623	4,42904	4,61263	4,88272
$\tau_o$ , нс/м		3,90232	3,96504	4,04971	4,17223	4,37561	4,87929
$\Delta\tau$ , нс/м		0,21609	0,23112	0,24652	0,25681	0,23702	0,00343

Таблица 3

Зависимость  $\tau_e$ ,  $\tau_o$ ,  $\Delta\tau$  от  $h$  при  $s = 0$  мм

Параметры	Значения								
	$h$ , мм	3,46	3,48	3,5	3,52	3,54	5	10	40
$\tau_e$ , нс/м		4,88272	4,85456	4,82744	4,80158	4,77687	4,05252	3,69144	3,52285
$\tau_o$ , нс/м		4,87929	4,8697	4,86089	4,85261	4,84482	4,68033	4,65386	4,65262
$\Delta\tau$ , нс/м		0,00343	-0,01514	-0,0335	-0,05103	-0,06795	-0,62781	-0,96242	-1,12977

ности вычислений  $\Delta\tau = 0,00343$  нс/м).

3. Увеличение  $h$  уменьшает  $\tau_e$ ,  $\tau_o$ , однако  $\Delta\tau$  меняет свой знак на отрицательный.

Таким образом, при расположении ка-

белей по прямой  $\Delta\tau \approx 0,5$  нс/м, центрально симметричном —  $\Delta\tau \approx 0$  нс/м, при активном и пассивном вдалеке от опорного  $\Delta\tau \approx -1$  нс/м.

Таким образом, исследовано пять вариантов реализации модальных антиподов за счет следующего.

1. Изменение расположения проводников на среднем слое МПП.
2. Изменение диэлектрической проницаемости окружающей среды.
3. Увеличение толщины диэлектрического слоя.
4. Заполнение диэлектриком внутренних полостей.
5. Изменение расположения проводников.

Ниже перечислены основные выводы по каждому из вариантов.

Модальный антипод можно получить, изменяя расположение проводников на среднем слое в МПП. Антипод для структуры из двух отрезков может возникнуть если, например, отрезки 1 и 2 имеют одинаковый разнос, но разную ширину проводников. Также антипод можно получить, если проводники отрезков будут иметь одинаковую ширину 1 и 2, но разный разнос.

Модальный антипод за счет изменения диэлектрической проницаемости окружающей среды для кабеля АППВ-3×6 можно получить погружением его в среду с относительной диэлектрической проницаемостью большей, чем у его изоляции (такой средой может быть, например, вода).

Модальный антипод за счет увели-

чения толщины диэлектрического слоя можно получить простым наматыванием изолирующей ленты на кабель. При увеличении толщины антипода  $\Delta t$  меняет свой знак при меньшем значении  $\epsilon_r$  ленты. Чем больше толщина диэлектрического слоя антипода, тем меньшая длина отрезка-антипода понадобится для РПВИ. При этом существуют структуры антиподов, где зависимость  $\Delta t$  от  $\epsilon_r$  ленты имеет максимум. Чем больше толщина, тем менее выражен этот максимум. Это позволяет при синтезе определенной структуры получить более высокое значение  $|\Delta t|$  при меньшей толщине слоя диэлектрика.

Модальный антипод за счет заполнения диэлектриком внутренних полостей можно получить, заполнив воздушные промежутки (находящиеся под внешней оболочкой изолирующего слоя) средой с  $\epsilon_r$  большей, чем у изоляции рассматриваемого кабеля.

Модальный антипод можно получить за счет изменения расположения проводников кабеля. Для этого нужно изменять параметры расположения проводников в исследуемом отрезке от плоской структуры к центрально симметричной, а затем к структуре с двумя сближенными проводниками вдали от опорного.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту № 16-38-00179.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Газизов Т.Р. Совершенствование межсоединений монтажных плат: Дис. ... канд. техн. наук. Томск: ТУСУР, 1998. 164 с.
2. Газизов Т.Р. и др. Исследование модальных искажений импульсного сигнала в многопроводных линиях с неоднородным диэлектрическим заполнением // Электромагнитные волны и электронные системы. 2004. № 11. С. 18–22.
3. Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М., Бевзенко И.Г., Самотин И.Е., Орлов П.Е., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Костарев И.С. Модальный фильтр. Патент РФ № 79355. Приоритет 07.07.2008. Оpubл. 27.12.2008. Бюл. № 36.
4. Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М., Бевзенко И.Г., Самотин И.Е., Орлов П.Е., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куксенко С.П., Костарев И.С. Устройство защиты от импульсных сигналов. Патент РФ № 2431912. Приоритет 09.03.2010. Оpubл. 20.10.2011. Бюл. № 29.
5. Бевзенко И.Г. Среднеслойный фильтр. Патент РФ №147789. Приоритет 17.02.2014.
6. Сахаров К.Ю. и др. Исследование функционирования локальной вычислительной сети в условиях воздействия сверхкоротких электромагнитных импульсов // Технологии ЭМС. 2006. № 3(18). С. 36–45.
7. Бевзенко И.Г., Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М. Модальные антиподы плоских трехпроводных кабелей // Электромагнитные волны и электронные системы. 2011. № 11. С. 71–74.
8. Бевзенко И.Г., Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М. Экспериментальные исследования раз-

ложения и восстановления электрических импульсов в структурах с различными модальными антиподами // Известия вузов. Физика. 2011. Т. 54. № 10/2. С. 17–24.

9. **Бевзенко И.Г.** Методика защиты электронных устройств от сверхкоротких импульсов при их модальном разложении в соединительных линиях: Дис. ... канд. техн. наук. Томск: ТУСУР, 2012. 229 с.

10. **Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М., Бевзенко И.Г., Самотин И.Е., Орлов П.Е., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куksenко С.П., Костарев И.С.** Устройство воздействия на аппаратуру. Патент РФ № 79213. Приоритет 07.07.2008. Оpubл. 20.12.2008. Бюл. № 35.

11. **Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М., Бевзенко И.Г., Самотин И.Е., Орлов П.Е., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куksenко С.П., Костарев И.С.** Устройство для нарушения работы аппаратуры за счет разложения и восстановления импульсов. Патент РФ № 2431897. Приоритет 09.03.2010. Оpubл. 20.10.2011. Бюл. № 29.

12. **Бевзенко И.Г.** Исследование модальных явлений на верхнем слое многослойной печатной платы // XV Междунар. науч.-практ.

конф. Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. СПб., 2016. Т. 1. С. 135–140.

13. **Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Куksenко С.П., Заболоцкий А.М., Аширбакиев Р.И., Вершинин Е.А., Салов В.К., Лежнин Е.В., Орлов П.Е., Бевзенко И.Г., Калимулин И.Ф.** Св. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2012610712. TALGAT 2010. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 13.01.2012.

14. **Бевзенко И.Г., Заболоцкий А.М., Газизов Т.Р.** Вариант антипода для кабеля марки АППВ-36 // Науч.-техн. конф. молодых специалистов Электронные и электромеханические системы и устройства. 2008. С. 69–71.

15. **Бевзенко И.Г.** Возможность создания скрытого модального антипода кабеля марки ВВГп-3×1,5 // VI Междунар. науч.-практ. конф. Электронные средства и системы управления. Томск, 2010. Т. 2. С. 27–30.

16. **Кокнаев М.В., Бевзенко И.Г.** Создание антипода за счет изменения расположения проводников на примере кабелей марки КГхЛ 1×2,5 и АПВ 4 // SIBCON – 2011, Красноярск, 2011. С. 399–402.

## REFERENCES

1. **Gazizov T.R.** *Improving interconnect circuit boards: the dissertation of PhD.* Tomsk: TUSUR Publ., 1998, 164 p. (rus)

2. **Gazizov T.R., et al.** Study of modal pulse signal distortions in multi-wire lines with inhomogeneous dielectric filling, *Electromagnetic waves and electronic systemy*, 2004, No. 11, Pp. 18–22. (rus)

3. **Gazizov T.R., Zabolochiy A.M., Bevzenko I.G., Samotino I.E., P.E. Orlov, Melkozerov A.O., Gazizov T.T., Kuksenko S.P., Kostarev I.S.** *Modal filter.* Russian Federation utility model patent No. 79355, The priority of the utility model 07.07.2008, Publ. on 27.12.2008, Bull. No. 36. (rus)

4. **Gazizov T.R., Zabolochiy A.M., Bevzenko I.G., Samotino I.E., P.E. Orlov, Melkozerov A.O., Gazizov T.T., Kuksenko S.P., Kostarev I.S.** *Protection unit pulse signals.* Russian Federation patent for invention No. 2431912, The priority of invention 09.03.2010, Publ. on 20.10.2011, Bull. No. 29. (rus)

5. **Bevzenko I.G.** *Average layer filter.* Russian utility model patent No. 147789. The priority of the utility model 17.02.2014. (rus)

6. **Sakharov K.Y., et al.** Study the functioning of the local area network under the action of ultrashort electromagnetic pulse, *EMC Technology*, 2006, No. 3(18), Pp. 36–45. (rus)

7. **Bevzenko I.G., Gazizov T.R., Zabolochiy**

**A.M.** Modal antipodes flat three-wire cables, *Electromagnetic waves and electronic systems*. 2011, No. 11, Pp. 71–74. (rus)

8. **Bevzenko I.G., Gazizov T.R., Zabolochiy A.M.** Experimental studies of decomposition and recovery of electrical impulses in the structures with different modal antipodes, *Proceedings of the universities. Physics*, 2011, Vol. 54, No. 10(2), Pp. 17–24. (rus)

9. **Bevzenko I.G.** *Methods of protecting electronic devices from the ultrashort pulses in their modal decomposition in the connection lines: the dissertation of PhD.* Tomsk: TUSUR Publ., 2012, 229 p. (rus)

10. **Gazizov T.R., Zabolochiy A.M., Bevzenko I.G., Samotino I.E., Orlov P.E., Melkozerov A.O., Gazizov T.T., Kuksenko S.P., Kostarev I.S.** *The unit impact on the equipment.* Russian Federation utility model patent No. 79355, The priority of the utility model 07.07.2008, Publ. 20.12.2008, Bull. No. 35. (rus)

11. **Gazizov T.R., Zabolochiy A.M., Bevzenko I.G., Samotino I.E., Orlov P.E., Melkozerov A.O., Gazizov T.T., Kuksenko S.P., Kostarev I.S.** *Device malfunction of equipment due to the decomposition and recovery pulse.* Russian Federation patent No. 2431897, The priority of invention 09.03.2010, Publ. on 20.10.2011, Bull. No. 29. (rus)

12. **Bevzenko I.G.** Investigation of modal phenomena in the upper layer of the multilayer

printed circuit board, *XV International Scientific and Practical Conference Fundamental and applied research in the modern world*, St. Petersburg, 2016, Vol. 1, Pp 135–140. (rus)

13. **Gazizov T.R., Melkozerov A.O., Gazizov T.T., Kuksenko S.P., Zabolochiy A.M., Ashirbakiev R.I., Vershinin E.A., Salov V.K., Lezhnin E.V., Orlov P.E., Bevzenko I.G., Kalimulin I.F.** *Certificate of state registration of the computer No. 2012610712. TALGAT 2010*. 26.09.2011. (rus)

14. **Bevzenko I.G., Zabolochiy A.M., Gazizov T.R.** Option antipode of the brand of cable APPV-36. *Scientific and technical conference of young*

*specialists Electronic and electromechanical systems and devices*, 2008, Pp 69–71. (rus)

15. **Bevzenko I.G.** Ability to create hidden modal brand VVGp antipode cable 3×1,5, *VI International Scientific and Practical Conference Electronic instrumentation and control systems*. Tomsk, 2010, Vol. 2, Pp. 27–30. (rus)

16. **Koknaev M.V., Bevzenko I.G.** Creating antipode by changing the arrangement of the conductors in the cable brand KGhL 1×2.5 and APV 4. *Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON – 2011)*, Krasnoyarsk, 2011, Pp. 399–402. (rus)

---

**БЕВЗЕНКО Иван Геннадьевич** – старший научный сотрудник Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, кандидат технических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: ivan-bevzenko@yandex.ru

**BEVZENKO Ivan G.** *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: ivan-bevzenko@yandex.ru