

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ (05.09.02)

УДК 625.315.21.001.5

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-2-43-49

Особенности исследования характеристик ленточных высокочастотных проводов, использующих трехпроводную схему передачи сигналов

А.Г. Корякин, Ю.Т. Ларин, В.М. Леонов

Рассмотрены характеристики ленточных проводов, использующих трехпроводную схему передачи сигнала. Теоретические и экспериментальные исследования цепей ленточных проводов основаны на анализе многопроволочных планарных линий связи.

На первом этапе задействован метод моделирования цепей кабельных изделий. Приведен пример модели электромагнитного поля в трехпроводной линии ленточного провода с изоляцией ограниченной толщины. Уточнено, что электромагнитное поле концентрируется не только в плоскости ленточного провода, а частично распространяется в окружающее пространство.

Основой моделирования является аналогия, существующая между электростатическим полем в изоляции провода и стационарным электрическим полем модели. Ее сложность — главное затруднение реализации метода.

Дана модель электрических полей на основе метода «косоугольных квадратов», позволяющая определить значения емкости, защищенности цепей ленточных проводов от взаимного влияния. Электроды в модели расположены с учетом значений относительной диэлектрической проницаемости отдельных слоев изоляции.

Для теоретических расчетов изучена не только структура элементарного магнитного поля изоляции, но и структура электрического поля в проводниках трехпроводной линии. Представлены эпюры распределения плотности тока в сечениях проводников при влиянии поверхностного эффекта.

Приведены формулы расчета коэффициента затухания для одиночной трехпроводной цепи высокочастотного ленточного провода, а также формулы для расчетов электрического сопротивления с учетом поверхностного эффекта и эффекта близости для круглых и прямоугольных жил ленточных проводов и расчет электрической ёмкости при соотношении толщин ленточных проводов.

Дана частотная зависимость коэффициента затухания для трехпроводной кабельной цепи.

Полученные результаты исследования показывают, что при условии идентичности всех остальных факторов, меньшим коэффициентом затухания обладают ленточные провода с жилами прямоугольного сечения. Это объясняется влияниями поверхностного эффекта и эффекта близости на потери в жилах и подтверждается при анализе картин электромагнитных полей цепей ленточных проводов, полученных с помощью моделирования.

Ключевые слова: кабель, ленточные провода, высокочастотный ленточный провод, многопроволочные планарные линии связи, трехпроводная линия, изоляция провода (кабеля), стационарное электрическое поле, электростатическое поле, многоуровневая изоляция, метод «косоугольных квадратов», взаимное влияние, поверхностный эффект, коэффициент затухания, эффект близости.

Для цитирования: Корякин А.Г., Ларин Ю.Т., Леонов В.М. Особенности исследования характеристик ленточных высокочастотных проводов, использующих трехпроводную схему передачи сигналов // Вестник МЭИ. 2019. № 2. С. 43—49. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-2-43-49.

Specific Features to Studying the Characteristics of High-Frequency Tape Conductors Using the Three-Wire Signal Transmission Arrangement

A.G. Koriakin, Yu.T. Larin, V.M. Leonov

The characteristics of tape conductors using the three-wire signal transmission arrangement are considered. The theoretical and experimental studies of tape conductor circuits are based on an analysis of multiwire planar communication lines.

At the first stage of studies the cable article circuits modeling method is used. An example of the electromagnetic field model in the three-wire line of a tape conductor with insulation of limited thickness is given. It is pointed out that the electromagnetic field is concentrated not only in the tape conductor's plane, but partly spreads into the surrounding space.

The modeling is based on the analogy existing between the electrostatic field in the conductor insulation and the stationary electric field of the model. Its complexity is main difficulty in implementing the method.

An electric field model developed using the "oblique squares" method is presented, the use of which makes it possible to determine the tape conductor capacitance and the extent to which the conductor circuits are immune to mutual influence. The electrodes in the model are arranged taking into account the relative permittivity of individual insulation layers.

For theoretical calculations both the electric magnetic field structure in the insulation and the electric field structure in the three-wire line conductors have been studied. The current density profiles in the conductor cross sections determined taking the skin effect into account are presented.

Formulas for calculating the attenuation ratio for the single three-wire circuit of a high-frequency tape conductor are given along with formulas for calculating the electrical resistance taking into account the skin effect and the proximity effect for round and rectangular cores of tape conductors, and for calculating electrical capacitance at certain ratio of tape conductor thicknesses. The frequency dependence of an attenuation ratio for a three-wire cable circuit is given.

The obtained study results show that, all other factors being identical, tape conductors with rectangular-shaped cores have a lower attenuation ratio. This is attributed to the influence of the skin effect and proximity effect on losses in the cores, which is also confirmed from an analysis of the tape conductor circuit electromagnetic field patterns obtained by simulation.

Key words: cable, tape conductors, high-frequency tape conductor, multiwire planar communication lines, three-wire line, wire (cable) insulation, stationary electric field, electrostatic field, multilevel insulation, "oblique squares" method, mutual influence, skin effect, attenuation ratio, proximity effect.

For citation: Koriakin A.G., Larin Yu.T., Leonov V.M. Specific Features to Studying the Characteristics of High-Frequency Tape Conductors Using the Three-Wire Signal Transmission Arrangement. Bulletin of MPEI. 2019;2:43—49. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-2-43-49.

Конструктивные особенности высокочастотных ленточных проводов определяют особенности исследования характеристик передачи данных кабельных изделий, причем теоретические исследования учитывают планарное расположение токопроводящих жил, распространение части электромагнитного поля вне изоляции, преимущественное использование трехпроводной цепи, а экспериментальные — накопленный опыт исследований радиочастотных кабелей и плоских линий передачи.

Данным вопросом в Европе, США и Российской Федерации занимается ограниченный круг специалистов, что объясняет небольшое количество современных публикаций. Но необходимость в таких исследованиях есть.

Теоретические и экспериментальные исследования цепей ленточных проводов базируются на анализе многопроводных планарных линий связи [1, 2]. На первом этапе, а также для решения некоторых задач оптимизации конструкций ленточных проводов значительный интерес представляет метод моделирования цепей исследуемых кабельных изделий [3]. На рисунке 1 показан пример смоделированного на электропроводящей бумаге электромагнитного поля трехпроводной линии ленточного провода с двойной изоляцией. Являясь, как правило, открытыми линиями передачи, ленточные провода характеризуются сложным распределением электромагнитного поля, концентрирующегося не только в изоляции провода, но и частично распространяющегося в окружающем пространстве.

Основа метода моделирования — аналогия, существующая между электростатическим полем в изоляции ленточного провода и стационарным электрическим полем модели (несмотря на то, что физическая

природа, обуславливающая эти поля, различна (связанные заряды, проявляющиеся вследствие поляризации материала изоляции, в первом случае, и стационарные заряды в процессе прохождения тока через модель, во втором). При одинаковых граничных условиях и распределении потенциалов на границах области исследования электрическое поле в диэлектрике и поле тока в проводящей среде совпадают. Соблюдение аналогий граничных условий реальной линии и моделей — одно из главных затруднений при реализации метода. Последовательность измерений и схема установки описаны в [3]. Electrodes в модели необходимо расположить в соответствии со значениями исследуемых ленточных проводов, а учет значений относительной диэлектрической проницаемости отдельных слоев изоляции осуществляется изменением электропроводности соответствующих слоев модели. Картины электрических полей моделей строятся на основе метода «косоугольных квадратов» (рис. 1). Анализ результатов моделирования позволяет определить значение $\epsilon_{\text{экв}}$, емкости, защищенности цепей ленточных проводов от взаимных влияний.

Для теоретических расчетов необходимо изучить структуру электромагнитного поля в изоляции и в проводниках трехпроводной линии [4]. На рисунке 2 изображены эпюры распределения плотности тока в сечениях сигнального и заземленных проводников при влиянии отдельно поверхностного эффекта (σ), эффекта близости (ϵ) и при их суммарном влиянии (δ) [5]. Как видно из эпюр рис. 2, структура электрического поля в проводниках ленточного провода значительно отличается от идеальной, поэтому при расчете активного сопротивления и внутрипроводниковой индуктивности цепей на высоких частотах следует разработать метод

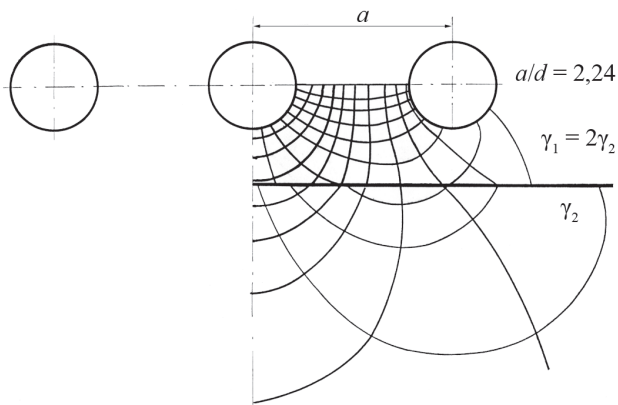


Рис. 1. Электромагнитное поле модели трехпроводной линии ленточного провода с изоляцией ограниченной толщины

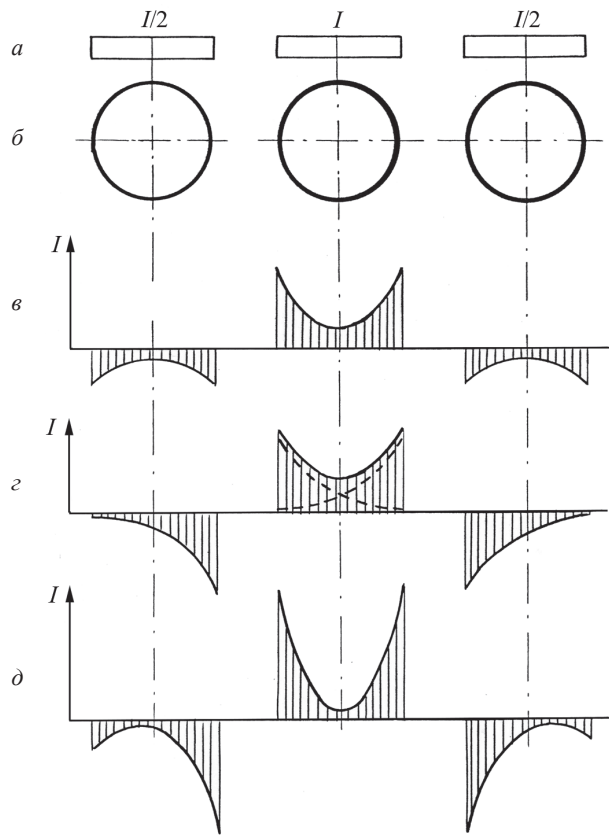


Рис. 2. Отдельное и суммарное (д) влияние поверхностного эффекта (в) и эффекта близости (z) на распределение плотности тока в проводниках прямоугольного (а) и круглого (б) сечения трехпроводной цепи ленточного провода

расчета влияний поверхностного эффекта и эффекта близости.

Учитывая компактность расположения токопроводящих жил в ленточных проводах, следует ожидать значительного влияния конструктивных и технологических неоднородностей в ленточных проводах на характеристики передачи. Значительно влияние неоднородностей волнового сопротивления, возникающих из-за влияния прокладки на открытые линии передачи неэкранированных ленточных проводов. Не-

однородности в цепях носят чаще всего случайный характер, поэтому целесообразно исследовать их влияние на характеристики передачи ленточных проводов методами теории вероятностей.

Коэффициенты распространения цепей ленточных проводов находят как корни системы характеристических уравнений:

$$\begin{vmatrix} |Z_{11}||Y_{11}| - p^2 [1] & |Z_{12}||Y_{12}| & \dots & |Z_{1n}||Y_{1n}| \\ |Z_{21}||Y_{21}| & |Z_{22}||Y_{22}| - p^2 [1] & \dots & |Z_{2n}||Y_{2n}| \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ |Z_{n1}||Y_{n1}| & |Z_{n2}||Y_{n2}| & \dots & |Z_{nn}||Y_{nn}| - p^2 [1] \end{vmatrix} = 0,$$

где [1] — единичная матрица-столбец.

Для одиночной трехпроводной цепи высокочастотного ленточного провода коэффициент затухания можно рассчитать следующим образом:

$$\alpha = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (1)$$

т. е. расчет коэффициента затухания сводится к расчету первичных параметров R, L, C и G кабельной цепи, причем, найти проводимость изоляции ленточного провода можно с помощью выражения:

$$G = \omega C \operatorname{tg} \delta,$$

где $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь материала изоляции.

При инженерных расчетах активного сопротивления в цепях ленточного провода с круглыми токопроводящими жилами лучше пользоваться традиционными формулами [6].

Полное сопротивление сигнального (центрального) проводника z_1 с учетом рис. 2 складывается из сопротивления, обусловленного поверхностным эффектом, и сопротивления за счет эффекта близости:

$$Z_1 = \frac{1}{\pi r^2 \sigma} + \frac{\sqrt{jk}}{2\pi r \sigma} + \frac{1}{4} \frac{\sqrt{jk}}{\pi r \theta} \left(\frac{d}{a}\right)^2,$$

где r, d — радиус и диаметр токопроводящих жил; σ — электропроводность материала жилы; k — коэффициент вихревых токов; a — шаг укладки токопроводящей жилы.

Полное сопротивление заземляющих проводников z_2 учитывает поверхностный эффект и две составляющих эффекта близости (сигнальный–заземляющий и заземляющий–заземляющий проводники):

$$Z_2 = Z_3 = \frac{1}{\pi r^2 \sigma} + \frac{\sqrt{jk}}{2\pi r \sigma} + \frac{\sqrt{jk}}{4\pi r \theta} \left(\frac{d}{a}\right)^2 + \frac{\sqrt{jk}}{4\pi r \theta} \left(\frac{d}{2a}\right)^2.$$

Таким образом, полное сопротивление трехпроводной цепи $z_{3л}$ выглядит как:

$$Z_{3л} = R_{3л} + j\omega L_{3л} = \\ = \frac{3}{2}R_0 + \frac{3\sqrt{2}}{8} \frac{k}{\pi r \sigma} \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{d}{a} \right)^2 - \frac{1}{6} \left(\frac{d}{2a} \right)^2 \right] + \\ + j \frac{3\sqrt{2}}{8} \frac{k}{\pi r \sigma} \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{d}{a} \right)^2 - \frac{1}{6} \left(\frac{d}{2a} \right)^2 \right],$$

где $R_{3л}$, $L_{3л}$ — активное сопротивление и внутренняя индуктивность трехпроводной цепи; R_0 — сопротивление жилы постоянному току.

Для практических расчетов следует учитывать модуль $Z_{3л}$.

Электрическое сопротивление с учетом поверхностного эффекта и эффекта близости для круглых и прямоугольных токопроводящих жил равно:

$$R_f = \frac{\sqrt{\pi f}}{d} 7,975 \cdot 10^{-3}; \\ R_f = \frac{\sqrt{\pi f}}{ab} 3,94 \cdot 10^{-3},$$

где f — частота, МГц; a , b — ширина и толщина прямоугольной жилы, мм.

Для многопроволочных токопроводящих жил при определении активного сопротивления с учетом поверхностного эффекта на единицу длины и внутренней индуктивности проводника обычно рассчитывают сопротивление и индуктивность каждой проволоки и полученный результат делят на число проволок, образующих жилу. При этом необходимо, чтобы все проволоки были идентичны по размерам и характеристикам материала [7].

Полное активное сопротивление трехпроводной цепи в этом случае определяется с учетом того, что два обратных проводника линии включены параллельно:

$$R_{3л} = \frac{3}{2} R_{тж},$$

где $R_{тж}$ — активное сопротивление токопроводящей жилы прямоугольного сечения с учетом поверхностного эффекта.

Электрическая емкость при соотношении толщины ленточного провода к диаметру токопроводящей жилы более 2,5...3,0 мм рассчитывается при помощи выражения емкости трёхпроводной линии [8]:

$$C = \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0}{3 \ln 2h/d} R_{тж}.$$

Для расчета параметров цепи следует вести поправку на эффективную относительную диэлектрическую проницаемость изоляции ленточного провода. Величина $\epsilon_{эфф}$ зависит от геометрических размеров провода, материала изоляции, схемы подключения и, в меньшей степени, от частоты передаваемого сигнала (из-за перераспределения магнитных потоков электромагнит-

ного поля при появлении поверхностного эффекта и эффекта близости). Точный расчет $\epsilon_{эфф}$ затруднен, можно лишь выполнить инженерный расчет с точностью до 10%:

$$\epsilon_{эфф} = 1 + 0,58 \frac{B}{2d} - 0,154 \frac{B^2}{4d^2} + 0,647 \lg \left(\frac{B}{d} \right), \\ \text{для } 0,8 < \frac{B}{2d} < 2 \quad \epsilon_{эфф} = 2,2.$$

В общем случае расчет $\epsilon_{эфф}$ осуществляется методом суперпозиции с учетом бесконечных отражений, а $\epsilon_{эфф}$ конкретной конструкции ленточного провода можно определить методом измерений.

Для расчёта $\epsilon_{эфф}$ ленточного провода используем значение эффективного диаметра жилы:

$$d_{эфф} = \sqrt{\frac{4ab}{\pi}}.$$

Индуктивность L связана с электрической емкостью обратной зависимостью и может быть вычислена для случая однородной среды $\epsilon = 1$:

$$L = \frac{1}{c^2 C_0},$$

где c — скорость света в свободном пространстве, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с; C_0 — емкость системы при $\epsilon = 1$.

Уравнение (1) с учетом предыдущих вариантов запишем в следующем виде:

$$\alpha = \alpha_M + \alpha_{из} = \frac{R}{2z_0} + \frac{\omega}{2} \text{tg} \delta \frac{\sqrt{\epsilon_{эфф}}}{\sqrt{C}},$$

и для трехпроводных цепей оно приобретет вид:

$$\alpha = 0,142 \frac{R_f}{z_0} + 0,0911 \sqrt{\epsilon_{эфф}} f \text{tg} \delta. \quad (2)$$

На рисунке 3 приведена частотная зависимость коэффициента затухания для трехпроводных цепей.

Из уравнения (2) следует, что коэффициент затухания цепей ленточных проводов растет с увеличением $\text{tg} \delta$ изоляции, т. е. для уменьшения коэффициента затухания в цепях ленточных проводов следует выбирать такой тип изоляции, который обеспечивает наименьший $\text{tg} \delta$, причем частотная зависимость $\text{tg} \delta(f)$ должна быть наиболее пологой из всех возможных вариантов.

Интересен также выбор формы сечения проводников ленточного провода для обеспечения минимума коэффициента затухания. Эксперименты, проведенные на ленточных проводах с круглыми и плоскими токопроводящими жилами, показали, что при условии идентичности всех остальных факторов меньшим коэффициентом затухания обладают ленточные провода с жилами прямоугольного сечения. Этот факт объясняется влиянием поверхностного эффекта и эффекта

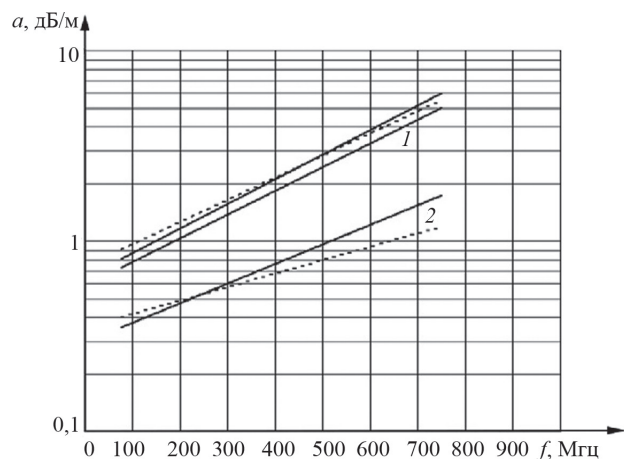


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициента затухания линий передачи для круглого (1) и прямоугольного (2) сечений

близости на потери в жилах. Так называемый «рабочий слой» токопроводящих жил имеет большую площадь для прямоугольного сечения по сравнению с круглыми. Данное явление подтверждает анализ картин электромагнитных полей цепей ленточных проводов, полученных методом моделирования.

Результаты исследований методов минимизации коэффициента затухания в ленточных проводах позволяют предложить ряд рекомендаций для проектирования высокочастотных ленточных проводов:

- цепи стоит организовывать по принципу планарной тройки;
- материал изоляции должен обеспечивать минимальные диэлектрические потери;
- токопроводящие жилы высокочастотных ленточных проводов целесообразно выбирать прямоугольного сечения (рис. 4).

Волновое сопротивление z_0 цепи ленточного провода равно:

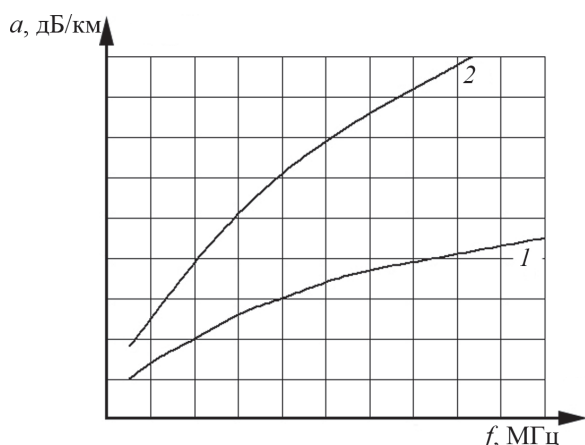


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициента затухания ленточных проводов:

1 — ЛКС 2-2×0,5 (с прямоугольными токопроводящими жилами); 2 — ЛКС 75-10-3×0,3 (с круглыми токопроводящими жилами)

$$z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

При передаче высокой частоты по цепи активными составляющими R и G можно пренебречь, тогда

$$z_0 = \frac{3333 \cdot 10^{-12}}{C_0}$$

Значение волнового сопротивления передающей цепи ленточного провода зависит от конструктивных размеров провода и диэлектрических свойств изоляции. Переходное затухание определяет защищенность линий от внутренних помех. Большинство типов ленточных проводов представляет собой открытые, компактные, многопроводные системы, что и обуславливает особенности взаимных влияний в этих изделиях. Рассматривая расчет характеристик взаимных влияний на примере двух- и трехпроводных цепей передачи, используемых для создания линий связи логических схем вычислительных машин, можно видеть, что напряжение помехи на ближнем конце составляет:

$$U_p(t) = \frac{1}{4T_p} \left(\frac{M}{z_0} + C_p z_0 \right) [U(t) - U(t - 2T_p)],$$

где T_p — время распространения сигнала в цепи; M , C_p — взаимная индуктивность и емкость между двумя цепями; z_0 — волновое сопротивление цепи.

Сигнал, наведенный на дальнем конце линии, подверженной влиянию, может быть рассчитан по формуле:

$$U_T(t) = -\frac{1}{2} \left(\frac{M}{z_0} - C_p z_0 \right) \frac{dU(t)}{dt} \quad (3)$$

Уравнение (3) показывает, что наведенный сигнал помехи на дальнем конце пропорционален длине линии, а его полярность зависит от однородности среды, в которой распространяется сигнал. Для ленточных проводов с незначительной толщиной изоляции значение $U_T(t)$ всегда отрицательное (индуктивная составляющая помехи преобладает), так как только часть электромагнитного поля распространяется в диэлектрике, другая же его часть распространяется в окружающем пространстве. Кроме того, $U_T(t)$ пропорциональна производной $\frac{dU(t)}{dt}$, зависит от крутизны фронтов сигналов и не зависит от их амплитуды.

Сочленение высокочастотных ленточных проводов с приборами осуществляется с помощью специальных переходов на основе полосковых линий. Высокочастотная характеристика перехода при передаче импульсных сигналов должна соответствовать времени нарастания фронтов импульсов передаваемой информации [9]:

$$f = \frac{0,35}{t_\phi}$$

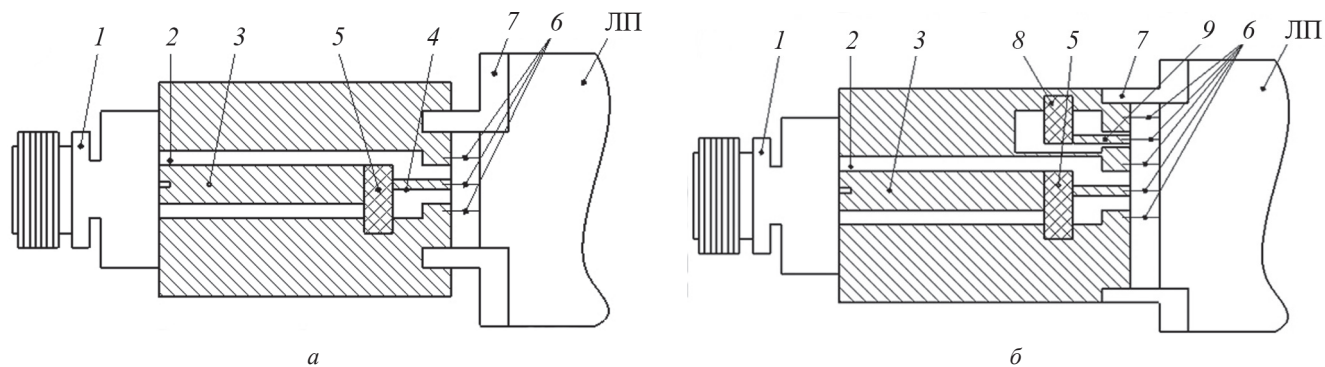


Рис. 5. Схема согласующих переходов типа «ленточный провод – коаксиальный кабель» для измерения затухания (а) и переходных затуханий (б):

1 — стандартный коаксиально-полосковый переход; 2 — плата из фольгированного диэлектрика; 3 — несимметричная полосковая линия с волновым сопротивлением, равным волновому сопротивлению присоединительного тракта; 4 — несимметричная полосковая линия с Z_0 , равным Z_0 ленточного провода (ЛП); 5 — согласующие радиокомпоненты; 6 — места пайки жил ленточного провода; 7 — крепежный элемент; 8 — согласующие радиокомпоненты; 9 — полосковая линия с Z_0 , равным Z_0 ленточного провода

На рисунке 5 в качестве примера представлена схема широкополосного перехода с коаксиального тракта на трехпроводную цепь ленточного провода типа ПВП.

Приведённые в настоящей работе результаты являются итогом работы целого коллектива специалистов, создавших большую группу кабельных изделий — ленточные провода.

Литература

1. Agrawal A.K., Fowles H.M., Scott L.D. Experimental Characterization of Multiconductor Transmission Lines in Inhomogeneous Media Using Time — Domain Techniques // IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility. 1979. V. 21. No. 1. Pp. 20—32.
2. Холодный С.Д., Серебрянников С.В., Боев М.А. Методы испытаний и диагностики в электроизоляционной и кабельной технике. М.: Издат. дом МЭИ, 2009.
3. Емельянов А.Н., Спиридонов В.Н. Оптимизация конструкций ленточных проводов методом моделирования // Электротехническая промышленность. Серия «Кабельная техника». 1980. Вып. 8 (186). С. 4—6.
4. Карякин Р.Н. Нормы устройства сетей заземления. М.: Энергосервис, 2006.
5. Электротехнический справочник / под общ. ред. А.И. Попова. М.: Издат. дом МЭИ, 2009. Т. 3.
6. Орлов С.И. Расчет и конструирование коаксиальных резонаторов. М.: Советское радио, 1980.
7. Пешков И.Б. Кабели и провода. Основы кабельной техники. М.: Энергоатомиздат, 2009.
8. Ларин Ю.Т., Плетнёв И.М. Ленточные провода. М.: Энергоатомиздат, 1982.
9. Глебович Г.В. Переходные характеристики коаксиальных кабелей с учетом потерь в проводниках и диэлектрике // Электросвязь. 1961. № 5. С. 73—75.

References

1. Agrawal A.K., Fowles H.M., Scott L.D. Experimental Characterization of Multiconductor Transmission Lines in Inhomogeneous Media Using Time — Domain Techniques. IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility. 1979;21;1:20—32.
2. Kholodnyy S.D., Serebryannikov S.V., Boev M.A. Metody Ispytaniy i Diagnostiki v Elektroizolyatsionnoy i Kabel'noy Tekhnike. M.: Izdat. Dom MEI, 2009. (in Russian).
3. Emel'yanov A.N., Spiridonov V.N. Optimizatsiya Konstruktsiy Lentochnykh Provodov Metodrom Modelirovaniya. Elektrotekhnicheskaya Promyshlennost'. Seriya «Kabel'naya Tekhnika». 1980;8 (186):4—6. (in Russian).
4. Karyakin R.N. Normy Ustroystva Setey Zazemleniya. M.: Energoservis, 2006. (in Russian).
5. Elektrotekhnicheskiiy Spravochnik / Pod Obshch. Red. A.I. Popova. M.: Izdat. Dom MEI, 2009;3. (in Russian).
6. Orlov S.I. Raschet i Konstruirovaniye Koaksial'nykh Rezonatorov. M.: Sovetskoye Radio, 1980. (in Russian).
7. Peshkov I.B. Kabeli i Provoda. Osnovy Kabel'noy Tekhniki. M.: Energoatomizdat, 2009. (in Russian).
8. Larin Yu.T., Pletnev I.M. Lentochnye Provoda. M.: Energoatomizdat, 1982. (in Russian).
9. Glebovich G.V. Perekhodnye Kharakteristiki Koaksial'nykh Kabeley s Uchetom Poter' v Provodnikakh i Dielektrike. Elektrosvyaz'. 1961;5:73—75. (in Russian).

Сведения об авторах:

Корякин Алексей Григорьевич — ведущий научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского проектно-конструкторского и технологического института кабельной промышленности

Ларин Юрий Тимофеевич — доктор технических наук, главный научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского проектно-конструкторского и технологического института кабельной промышленности

Леонов Вячеслав Михайлович — доцент кафедры физики и технологии электротехнических материалов и компонентов НИУ «МЭИ», e-mail: Leonovvm@mail.ru

Information about authors:

Koriakin Aleksey G. — Leading Researcher of the All-Russian Research Design and Technological Institute of the Cable Industry

Larin Yuriy T. — Dr.Sci. (Techn.), Chief Researcher of the All-Russian Research Design and Technological Institute of the Cable Industry

Leonov Vyacheslav M. — Assistant Professor of Physics and Technologies of Electrical Materials and Components Dept., NRU MPEI, e-mail: Leonovvm@mail.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 27.02.2018

The article received to the editor: 27.02.2018