

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭКРАННЫХ СВОЙСТВ ЭКРАНИРУЮЩИХ ОБОЛОЧЕК

Н. А. Прудкой, И. А. Куприянов, Л. И. Чиркова

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Для обеспечения защиты от электромагнитных воздействий при проектировании аппаратуры реализуются мероприятия по обеспечению экранирования проводных линий, соединяющих блоки аппаратуры между собой и с внешними системами.

В изделиях РФЯЦ-ВНИИЭФ по условиям эксплуатации в качестве экранов линий связи применяются гибкие металлические оболочки (плетенки). В настоящее время отечественной промышленностью наряду с традиционными плетенками (ПМЛ) выпускается много новых типов экранирующих материалов, предназначенных для экранирования линий связи. В технической документации, как правило, характеристики защитных свойств экранов, применяемых для защиты линий связи, отсутствуют или приведены в виде, неприемлемом для оценки их эффективности применительно к защищаемым объектам. Имеющиеся теоретические модели позволяют предсказывать экранные свойства традиционных плетенок из металлических проволок, однако точность этих моделей невысока. Задача расчета защитных свойств экранных оболочек с более сложной структурой (многослойные экраны, объемные экранирующие оболочки) на сегодняшний день пока не решена и вряд ли будет решена в обозримом будущем из-за сложности и многофакторности задачи. Также отсутствуют методы расчетной оценки экранных свойств соединителей в экранированном исполнении. Поэтому единственный надежный источник достоверных данных о характеристиках экранирующей оболочки – экспериментальные исследования.

Для обеспечения возможности выбора оптимальных по защитным свойствам и массогабаритным характеристикам экранирующих оболочек была разработана методика измерения сопротивления связи, ориентированная на применение анализаторов цепей.

О сопротивлении связи и его теоретических моделях

Традиционно в аппаратуре для экранирования линий связи используются металлические плетенки. В качестве количественной меры защищенности экранированных кабелей будем использовать сопротивление связи. Сопротивление связи Z_{coup} для кабеля определяется через соотношение:

$$Z_{coup} = \varepsilon_{\Delta x} / I_{sc} \Delta x, \quad (1)$$

где I_{sc} – ток, протекающий в экране; $\varepsilon_{\Delta x}$ – напряжение, создаваемое этим током на бесконечно малом участке внутреннего проводника Δx .

Сопротивление связи содержит составляющую, которая связывает ток экрана с продольным электрическим полем внутри экрана (диффузионная составляющая), а также составляющую, обусловленную взаимной индуктивностью, между экраном и жилой. Поэтому для полного сопротивления связи можем записать:

$$Z_{coup} = R_d + Z_h. \quad (2)$$

где R_d – диффузионная составляющая сопротивления связи; Z_h – индуктивная составляющая.

Аналитическое выражение для R_d может быть получено в предположении, что экран ведет себя как сплошная труба, имеющая то же погонное сопротивление, что и плетенка:

$$R_d = R_0 \frac{t \cdot \sqrt{\frac{i2\pi f \mu_{sc} \mu_0}{\rho_{sc}}}}{\operatorname{sh} \left(t \cdot \sqrt{\frac{i2\pi f \mu_{sc} \mu_0}{\rho_{sc}}} \right)}, \quad (3)$$

где t – толщина эквивалентного трубчатого экрана; f – частота; ρ_{sc} – удельное сопротивление материала экрана; μ_{sc} – удельная относительная магнитная проницаемость материала экрана; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; R_0 – сопротивление экрана постоянному току; $t = \frac{0,67d}{\sqrt{\cos \alpha}}$, d – диаметр экрана, α – угол плетения плетенки.

Для того чтобы записать (3) в компактном виде, введем обозначение:

$$\eta = t \sqrt{\frac{2\pi \mu_{sc} \mu_0}{\rho_{sc}}}, \quad (4)$$

тогда

$$R_d = R_0 \frac{\eta \sqrt{if}}{\operatorname{sh}(\eta \sqrt{if})}. \quad (5)$$

Что касается индуктивной составляющей сопротивления связи, на сегодняшний день известно две основные теоретические модели. Первая разработана Венсом [2].

В модели Венса:

$$Z_h = i2\pi f M_c, \quad (6)$$

где M_c – постоянная величина, которая называется индуктивность связи.

Согласно модели Венса, на низких частотах доминирует диффузионная составляющая и сопротивление связи падает с частотой. С некоторой частоты преобладающей становится индуктивная составляющая и сопротивление связи растет пропорционально частоте. Типовая частотная зависимость сопротивления связи по Венсу представлена на рис. 1. Однако согласно экспериментальным данным, для многих кабелей фактическая частотная зависимость на высоких частотах лежит в диапазоне между $\propto \sqrt{f}$ и $\propto f$, т. е. сопротивление связи растет медленнее, чем предсказывает теория Венса. Рядом исследователей было предпринято попытки модернизировать модель Венса, чтобы добиться лучшего соответствия теории и эксперимента.

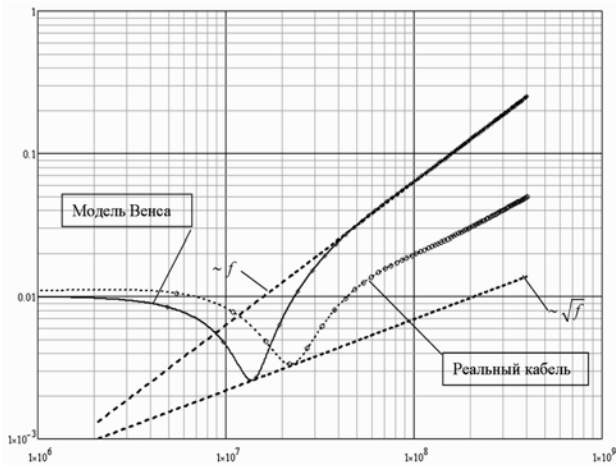


Рис. 1. Характерные зависимости сопротивления связи от частоты

Итогом этих попыток стала теория Клейна, который предложил следующее выражение для индуктивной составляющей сопротивления связи [3]:

$$Z_h = i2\pi f M_c + e^{i\frac{3}{4}\pi} 2\pi f L_s(f), \quad (7)$$

где $L_s(f) = a/\sqrt{f}$ – так называемая скин-индуктивность, обусловленная той частью магнитного потока, которая проникает внутрь плетенки через материал экрана; a – постоянная величина, определяемая конструктивными параметрами экрана.

Методика измерения сопротивления связи

Измерения сопротивления связи проводят на специальных образцах, изготовленных из радиочастотного кабеля. Для этого у кабеля удаляется защитная диэлектрическая оболочка, а штатная оплетка заменяется плетенкой, свойства которой подлежат исследованию. Часть подготовленного для исследований образца помещают в триаксиальную линию. Устройство триаксиальной линии, рекомендованной МЭК [4], поясняет рис. 2.

Металлическая труба и кабель с исследуемой плетенкой образуют систему двух связанных линий «экран – труба» и «экран – жила». Линия «экран – труба» является короткозамкнутой на одном конце. Электромагнитная волна, бегущая со стороны генераторного порта анализатора, отражается от места короткого замыкания, и в линии «экран – труба» образуется стоячая волна. Поместим начало отсчета координат в месте короткого замыкания этой линии. Тогда ток стоячей волны можно описать уравнением:

$$I_{sc}(x) = I_m \cos(\beta_{sc} \cdot x), \quad (8)$$

где I_m – действующее значение тока в пучности;

$\beta_{sc} = i\sqrt{\epsilon_{sc}} \frac{\omega}{c}$ – фазовая постоянная линии «экран – труба»; ϵ_{sc} – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции линии «экран–труба»; x – расстояние от точки короткого замыкания до точки наблюдения.

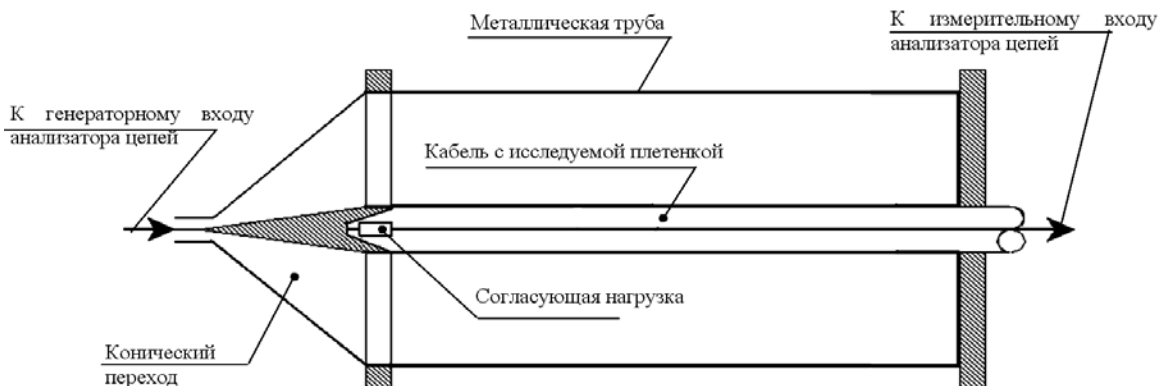


Рис. 2. Схематическое изображение триаксиальной линии

Под действием тока, текущего в линии «экран – труба» в линии «жила – экран» возникает распределенный источник ЭДС $\varepsilon_w(x) = I_{sc}(x)Z_{coup}$.

Воспользуемся обобщенной теоремой об эквивалентных источниках и на участке связи линию «экран – жила» представим в виде эквивалентной схемы рис. 3.

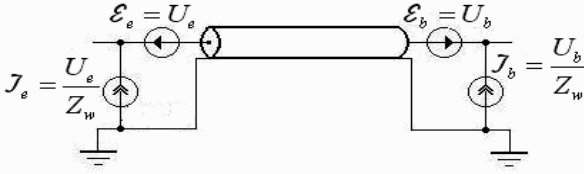


Рис. 3. Эквивалентная расчетная схема линии «жила – экран»

Напряжения (U_b, U_e) на согласованных концах линии «жила – экран», определяющие эквивалентные источники тока и напряжения, можно найти по формулам:

$$U_b = \frac{I_m Z_{coup}}{2} A, \quad (9)$$

$$U_e = -\frac{I_m Z_{coup}}{2} e^{-i\beta_w l_w} B, \quad (10)$$

$$A = \int_0^{l_w} \cos(\beta_{sc} x) e^{-i\beta_w x} dx, \quad (11)$$

$$B = \int_0^{l_w} \cos(\beta_{sc} x) e^{i\beta_w x} dx, \quad (12)$$

где $\beta_{wc} = i\sqrt{\varepsilon_w} \frac{\omega}{c}$ – фазовая постоянная линии «жила–экран»; ε_w – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции линии «жила – экран».

Как следует из (9, 10), потенциально сопротивление связи может быть определено по измерениям напряжения на ближнем или дальнем конце. Введем для определяемого по измерениям напряжения на ближнем конце сопротивления связи обозначение Zb_{coup} , а сопротивление связи, определяемое по измерениям на дальнем конце, обозначим Ze_{coup} .

$$Zb_{coup} = \frac{2U_b}{I_m A}. \quad (13)$$

$$Ze_{coup} = \frac{2U_e}{I_m B}. \quad (14)$$

При помощи триаксиальной линии, рекомендованной МЭК, определяется сопротивление связи по измерениям на ближнем конце Zb_{coup} , так как отсутствует физическая возможность измерения напряжения на дальнем конце. Нами предложена аль-

тернативная методика, в основе которой лежит определение напряжения на согласованных концах линии «жила – экран» путем пересчета результатов измерений напряжения на ближнем конце линии «жила – экран» в опытах короткого замыкания и холостого хода на дальнем конце этой линии. Для этого вместо согласующей нагрузки на дальнем конце линии с исследуемой плетенкой устанавливается коммутатор, позволяющий менять режим работы линии. Наша методика позволяет одновременно определять Zb_{coup} и Ze_{coup} . Идеи, заложенные в основу предложенной методики, поясняет рис. 4.

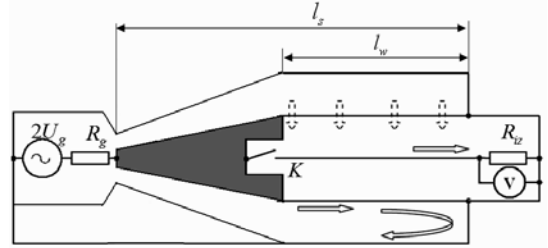


Рис. 4. Эквивалентная схема измерения сопротивления связи экранирующей оболочки при помощи триаксиальной линии.

U_g – напряжение на согласованном генераторном порте анализатора; R_g – собственное сопротивление генераторного порта анализатора; R_{iz} – собственное сопротивление измерительного порта анализатора; K – ключ, меняющий режим работы кабеля; l_w – длина участка, на котором линии «экран–труба» и «экран–жила» имеют электромагнитную связь; l_s – общая длина линии «экран – труба»

Как следует из эквивалентной расчетной схемы линии «жила – экран», при закороченном дальнем конце напряжение на согласованном ближнем конце равно:

$$U_{ccb} = U_b - U_e e^{-i\beta_w l_w}. \quad (15)$$

Если исследуемый кабель разомкнут на дальнем конце, напряжение на согласованном ближнем конце равно:

$$U_{ocb} = U_b + U_e e^{-i\beta_w l_w}. \quad (16)$$

Если сложить результаты измерений при закороченном и разомкнутом конце, имеем:

$$U_{ccb} + U_{ocb} = 2U_b; \quad (17)$$

$$Zb_{coup} = \frac{U_{ccb} + U_{ocb}}{I_m A}. \quad (18)$$

Если вычесть результаты измерений при закороченном и разомкнутом дальнем конце, получаем:

$$U_{ocb} - U_{ccb} = 2U_e; \quad (19)$$

$$Ze_{coup} = \frac{U_{ccb} - U_{ocb}}{I_m e^{-i2\beta_w l_w} B}. \quad (20)$$

Величину тока в пучности найдем из уравнений линии для закороченной на конце линии «экран – труба»:

$$\begin{aligned} 2U_g - R_g I_g &= iI_m Z_{sc} \sin(\gamma_{sc} l_s); \\ I_g &= I_m \cos(\beta_{sc} l_s). \end{aligned} \quad (21)$$

Из этих уравнений следует:

$$I_m = \frac{2U_g}{[iZ_{sc} \sin(\beta_{sc} l_s) + R_g \cos(\beta_{sc} l_s)]}. \quad (22)$$

Таким образом, получаем следующие расчетные соотношения для определения сопротивлений связи по результатам измерений:

$$\begin{aligned} Z_{b_{coup}} &= \frac{S_{cc} + S_{oc}}{2A} \times \\ &\times [iZ_{sc} \sin(\beta_{sc} l_s) + Z_0 \cos(\beta_{sc} l_s)]; \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} Z_{e_{coup}} &= \frac{S_{cc} - S_{oc}}{2Be^{-i2\beta_w l}} \times \\ &\times [iZ_{sc} \sin(\beta_{sc} l_s) + Z_0 \cos(\beta_{sc} l_s)], \end{aligned} \quad (24)$$

где S_{cc}, S_{oc} – коэффициенты передачи между генераторным и измерительным соединителями триаксиальной линии в режимах короткого замыкания и холостого хода дальнего конца линии, соответственно «жила–экран»; β_w, β_{sc} – фазовые постоянные линий «жила–

экран» и «экран – труба», соответственно; $Z_0 = 50 \text{ Ом}$ – волновое сопротивление портов анализатора.

В идеале сопротивления связи на ближнем и дальнем концах должны быть одинаковыми. Однако на практике они различаются. Это различие определяется: наличием неучитываемого канала передачи энергии из линии «экран – труба» в линию «жила – экран» из-за емкостной связи; неоднородностью исследуемой оболочки; неточностями изготовления триаксиальной линии; погрешностями анализатора цепей. Поэтому по результатам измерений подбирается аппроксимирующая функция в виде огибающей по большим значениям $Z_{b_{coup}}$ и $Z_{e_{coup}}$, а разность $Z_{b_{coup}} - Z_{e_{coup}}$ используется в качестве критерия корректности проводимых измерений.

Примеры применения разработанной методики

На рис. 5 представлена установка для измерения сопротивления связи на которой была реализована данная методика. В качестве примеров ее применения на рис. 6 и рис. 7 приведены полученные с ее помощью частные зависимости сопротивлений связи и их аппроксимации по Клейну двух современных типов экранирующих плетенок. Аппроксимирующая функция подбиралась в виде огибающей для $Z_{b_{coup}}$ и $Z_{e_{coup}}$ одновременно.

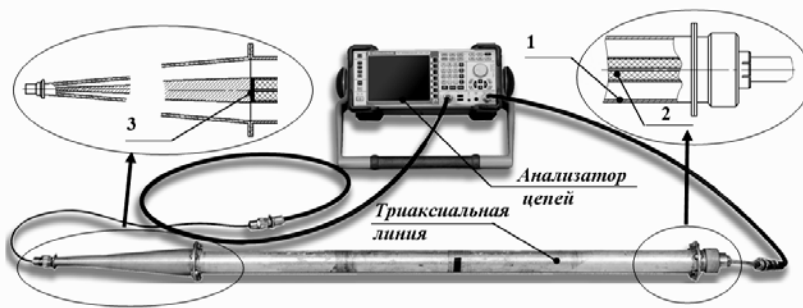


Рис. 5. Внешний вид установки для измерения сопротивления связи и устройство «триаксиальной линии»: 1 – металлическая труба; 2 – кабель с исследуемой плетенкой; 3 – коммутатор.

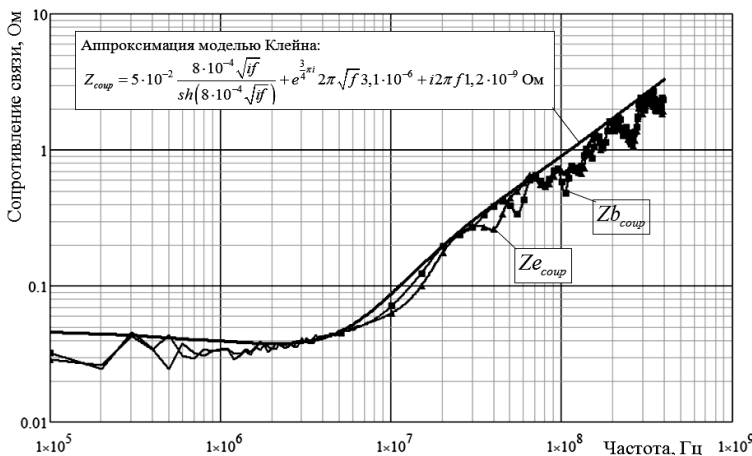


Рис. 6. Результаты измерения сопротивления связи плетенки ПЭМ МС 6-0,06 (ТУ 4833-004-66158671-2011)

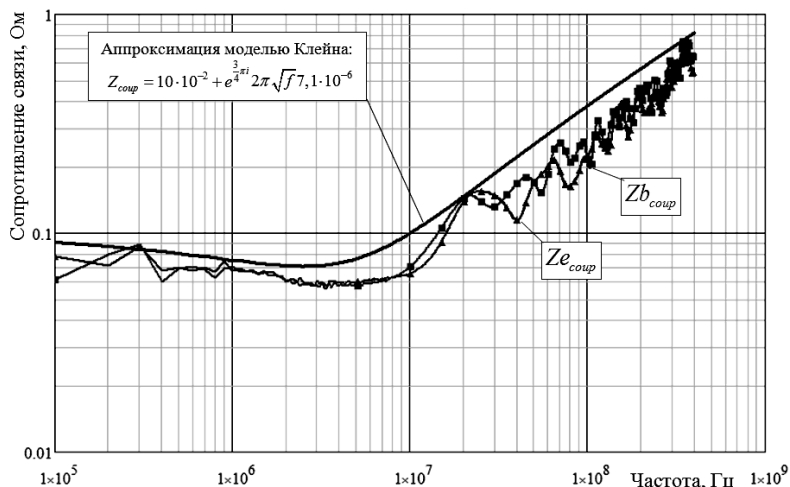


Рис. 7. Результаты измерения сопротивления связи плетенки ПЭМ Н 6-0,1 (ТУ 4833-004-66158671-2011)

Выводы

Разработана методика измерений сопротивления связи экранирующих оболочек кабельных линий с помощью триаксиальной линии и анализатора цепей. Методика позволяет получать частотные зависимости сопротивления связи, по которым можно оценить защитное действие экранирующих оболочек различных типов с целью выдачи рекомендаций по их дальнейшему применению.

В качестве примера применения разработанной методики в докладе представлены результаты экспериментальных исследований сопротивления связи плетенок ПЭМ МС 6-0,06 (ТУ 4833-004-66158671-2011) и ПЭМ Н 6-0,1 (ТУ 4833-004-66158671-2011).

Литература

1. Broyde F. Comparison of Coupling Mechanisms on Multiconductor Cables, IEEE Trans. EMC, Vol. 35, No 41, 1993, P/ 409–416.
2. Vance E. Shielding effectiveness of braided-wire shields, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. EMC-17, P. 71–77, May 1975.
3. Kley T. Optimized single-braided cable shields, IEEE Trans. EMC, Vol. 35, No 1, 1993, P. 1–9.
4. IEC-Standard 1196-1 (1995-05), 12. Screening effectiveness.