ISSN 0002-306X. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2002. Т. LV, № 2.

УДК 621.315.2 ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Ж.М. МИРЗАБЕКЯН

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕНТОЧНЫХ ЛИНИЙ

Приводится теоретическое обоснование и расчетное определение разницы между первичными и вторичными параметрами передачи различных конструкций проводов с плоскими и круглыми токопроводящими жилами, особенно, если они находятся в разных плоскостях. Даются окончательные формулы для определения зависимости емкости и активного сопротивления ленточных линий от частоты и конструктивных размеров.

Ключевые слова: напряженность электрического поля, емкость, активное сопротивление, экран, эллиптические функции.

Ленточные (полосковые) линии отличаются от других типов тем, что они имеют в сечении плоскую конструкцию, компактны, обладают большой теплоотдачей, малогабаритны и удобны в производстве.

Цель данной статьи – теоретическое обоснование и расчетное определение разницы между первичными и вторичными параметрами передачи различных конструкций проводов с плоскими и круглыми токопроводящими жилами, особенно, если они находятся в разных плоскостях. При этом влияние электромагнитных полей друг на друга наибольшее, появляются сильные краевые эффекты, которые нежелательны, особенно при передаче токов высокой частоты. Поэтому расчетные параметры плоских кабелей при нахождении жил в одной плоскости сопоставляются с ленточными линиями с круглыми токопроводящими жилами.

Как известно, при прохождении тока высокой частоты наибольший интерес представляют емкость цепи, активное сопротивление и коэффициент затухания, от которых зависят расход диэлектрических материалов и цветных металлов, передаваемая мощность и качество передачи. Остальные параметры (проводимость диэлектрика, скорость прохождения волны, фазовые искажения и волновое сопротивление) зависят от первых трех. При расчете напряженности электрического поля и емкости кабеля с ленточными жилами (рис.1) с достаточной точностью можно предположить, что толщина провода равна нулю. В этом случае пренебрегается электрическое поле в области 1 (рис.2), где объем диэлектрика предполагается намного меньше общего объема. Для плоских конструкций [1] отмечается, что на границе проводника диэлектрика можно считать, что $E_t=0$, где E_t - касательная составляющая поля E.

Напряженность электрического поля экранированного кабеля с плоскими токопроводящими жилами определяется по формуле [1]

$$E = C\frac{\theta_2(v)\theta_3(v)}{\sqrt{\theta_1\left(\frac{z-il}{2B}\right)\theta_1\left(\frac{z-ia-il}{2B}\right)\theta_1\left(\frac{z+il}{2B}\right)\theta_1\left(\frac{z+ia+il}{2B}\right)}}, \qquad (1)$$

где константа C характеризует полный заряд единицы длины кабеля; θ_1, θ_2, θ_3 - эллиптические функции, которые выражаются через тета-функции [4];

v=z/2B.

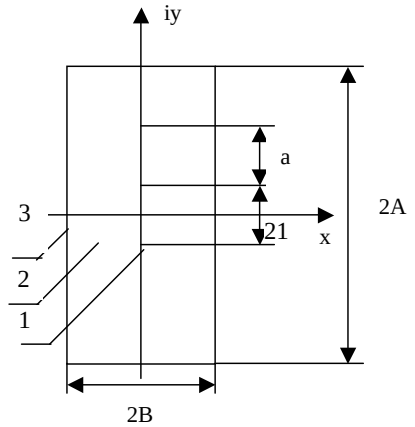

Рис. 1. К расчету рабочей емкости экранированной пары с прямоугольными токопроводящими жилами: 1 - токопроводящая жила; 2 - диэлектрик; 3 - экран

Путем вычисления заряда провода по скачку поля E рассчитывается емкость ленточного кабеля для различных сечений (табл.). Полученные емкости сопоставляются с емкостью ленточной линии с круглыми токопроводящими жилами при одинаковом расходе материалов.

Электрическая емкость полосковой линии с круглыми жилами обычно определяется по формуле [2]

$$C = \frac{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_{r_2}}{\ln 2h/d}, \qquad (2)$$

где h - расстояние между центрами круглых жил; ε_0 - диэлектрическая постоянная; ε_{r2} - диэлектрическая проницаемость изоляции.

Данные табл.1 показывают, что емкость линий с круглыми жилами больше емкости плоских жил на 8...22%. При этом медная лента толщиной 0,14 *мм*, шириной 10 *мм* и толщиной полиэтиленовой изоляции 1 *м* соответствует полосковой линии с круглыми жилами диаметром 0,69 *мм* и 2,87 *мм* по изоляции.

Необходимо отметить, что для предотвращения потерь от поверхностного эффекта и при максимальной передаваемой частоте для этих линий, т.е. в пределах 120 *кГц*, толщина ленты должна быть не больше глубины проникновения тока. Эта глубина составляет

$$\theta = \sqrt{2/k}, \qquad (3)$$

где k - коэффициент вихревых токов ($k=\omega\mu\gamma$).

Для определения активного сопротивления ленточных экранированных проводников с плоскими токопроводящими жилами можно без существенной ошибки принять, что магнитное поле H на экране параллельно экрану (рис.2). Поэтому это поле может быть продолжено симметрично относительно экрана во всех направлениях. В результате многократного повторения операции придем к периодической картине с тем же полем, но без экрана.

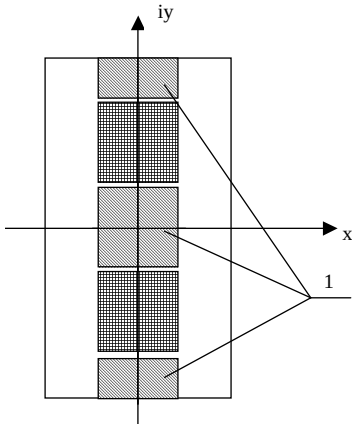

Рис.2. Область диэлектрика, в которой электрическое поле пренебрегается

В этом случае

$$\delta_j(Q)+\frac{ik^2}{2\pi}\int\limits_{-b/2}^{b/2}\int\limits_{S_j}(k_0-\lambda)\delta_1(M)dx_M dy_M = C_1\,, \qquad (4)$$

где ($_j$(Q) - плотность тока в точке Q проводника S_j (j=1,…,n);

$$k(x,y)=\ln\left|\theta_1\left(\tfrac{x+iy}{4B}\right)\right|;$$

$$\theta_1(v)=\sum_{n=-\infty}^{\infty}(-1)^n q^{n(n-1)}e^{i\pi(2n-1)v}\,;\quad q=e^{\pi A/2B}\,;$$

$$k_0=\ln\left|\frac{\theta_2\frac{(x_a-x_M)+i(y_a-y_M)}{4B}}{\theta_1\frac{(x_a-x_M)+i(y_a+y_M)}{4B}}\right|+\ln\left|\frac{\theta_1\frac{(x_Q-x_M)+i(y_Q+y_M)}{4B}}{\theta_2\frac{(x_Q-x_M)+i(y_Q+y_M)}{4B}}\right|;$$

$$\lambda=\frac{1}{a^2b^2}\int\limits_{S_1}\int k_0 dx_M dy_M dx_Q dy_Q\,;$$

$$\theta_2\left(v_1+\tfrac{1}{2}\right)=-\theta_1(v_1)\,;\quad v_1=iy/2B\,;$$

$$x = 0, \quad 1 < y < 1 + a.$$

Так как нас интересует лишь распределение тока $\delta_j(Q)$, то можно принять, что $C_1=1$. Выбирая соответствующую схему решения $\delta_j(Q)$, можно определить активное сопротивление полосковой линии с ленточными токопроводящими жилами. Результаты решения при частотах 10, 70 и 120 *кГц* приведены в таблице.

Таблица

Результаты расчетных величин параметров передачи полосковых линий с плоскими и круглыми токопроводящими жилами

N	Исходные данные							
	S, *мм*^{2}	a, *мм*	b, *мм*	A, *мм*	B, *мм*	d, *мм*	D, *мм*	D/d, *мм*
1	0,38	3,8	0,1	10	6	0,69	8,72	12,6
2	1,13	3,8	0,3	10	6	1,98	8,62	7,24
3	2,5	8,3	0,3	10	6	1,78	8,74	4,9

Продолжение табл.

Результаты расчетов							
Емк.пров.с круг. жил., *нФ/км*	Емк. пров.с плоск. жил., *нФ* 1 / *км*	Активное сопротивление, *кГц*					
		при частоте			при частоте		
		10	70	120	10	70	120
16	17,8	94	101	109	94	220	318
22	28	31	47	49	34	50	74
47	50	14	22	28	12,5	21,7	31,5

Для сопоставления этих результатов с результатами активного сопротивления полосковой линии с круглыми токопроводящими жилами необходимо определить R_N для соответствующих диаметров круглых проволок по формуле [3]

$$R = 2R_0\chi\left[1 + F(kr) + \frac{PG(kr)(d/a)^2}{1 - H(kr)(d/a)^2}\right], \qquad (5)$$

где R_0 - активное сопротивление постоянному току, *Ом/км*; χ – коэффициент укрутки; F (kr) – табулированное значение бесселевых функций, учитывающее зависимость активного сопротивления проводника за счет поверхностного эффекта; P - поправочный коэффициент, учитывающий тип скрутки; G (kr) и H (kr) – функции, учитывающие зависимость активного сопротивления от эффекта близости; d - диаметр проволоки; a – расстояние между жилами.

Сравнивая расчетные значения емкости, сопротивления и коэффициента затухания ленточных линий, можно констатировать, что емкость полосковых проводов с плоскими жилами меньше емкости проводов с

круглыми жилами на 8...22%, а активное сопротивление на 10%...30%. При этом соответственно разница коэффициентов затухания между этими конструкциями также ощутима.

По результатам расчетных величин определения первичных и вторичных параметров кабеля с плоскими токопроводящими жилами построены кривые зависимости этих параметров от конструктивных размеров и частоты тока (рис. 3, 4).

Рис. 3. Зависимость емкости кабельной цепи от сечений проводника
А=10 *мм*; В = 6 *мм*

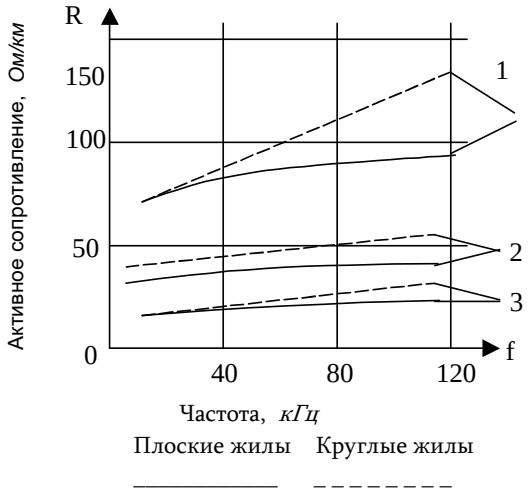

Рис.4. Зависимость активного сопротивления от частоты тока
1 - S=0,38 *мм*², 2 - S = 1,13 *мм*², 3 - S = 2,50 *мм*²

Таким образом, анализ и сопоставление результатов расчетных величин электромагнитных параметров ленточных линий с плоскими и круглыми токопроводящими жилами показывает, что применение плоских жил дает возможность существенно снизить параметры передачи высокочастотной кабельной цепи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мирзабекян Ж.М.** Теория определения электромагнитных параметров спиральных, ленточных и транспонированных проводников / ГИУА. - Ереван, 1998. - 137с.
2. **Ларин Ю.Т., Плетнева И.М.** Ленточные провода. - М.: Энергоиздат, 1982.
3. **Гроднев И.И.** Кабели связи . - М.: Энергия, 1976.
4. **Бейтман Г., Эрдейн А.** Высшие трансцендентные функции. - М.: Наука, 1996. - 295 с.
5. **Барс Л., Джон Ф., Шахтер М.** Элементы функционального анализа. – М.: Наука, 1965.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 19.01.2000.

Ժ.Մ. ՄԻՐԶԱԲԵԿՅԱՆ

ԺԱՊԱՎԵՆԱՅԻՆ ԳԾԵՐԻ ՕՊՏԻՄԱԼ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԻ ՏԵՍԱԿԱՆ ԵՎ ՀԱՇՎԱՐԿԱՅԻՆ ՀԻՄՆԱՎՈՐՈՒՄ

Բերված է կլոր և հարթ հատույթներով բարձր հաճախության հոսանքատար լարերի առաջնային և երկրորդական պարամետրերի տարբերությունը, երբ հոսանքատարները գտնվում են տարբեր հարթություններում: Տրվում են վերջնական բանաձևեր՝ ակտիվ դիմադրության և ունակության որոշման համար, ըստ հաճախության և կառուցվածքի:

ZH. M. MIRZABEKYAN

THEORETICAL AND DESIGN GROUNDING FOR OPTIMAL CONSTRUCTION CHOICE OF TAPE LINES

Theoretical grounding and design determination of difference between primary and secondary parameters for transmission of different wire constructions with flat and circular current leading veins, especially, if they are in different planes, are presented. A final formula for specifying capacity dependence and active resistance of tape lines on frequency and constructive dimensions, is given.