

УДК 681.5

ФОРМИРОВАНИЕ ДОПУСКОВ ДИАМЕТРА ИЗОЛИРОВАННОЙ ЖИЛЫ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ГАРАНТИРОВАННОЕ ДОСТИЖЕНИЕ ТРЕБУЕМЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА СИММЕТРИЧНОГО КАБЕЛЯ СВЯЗИ (LAN-КАБЕЛЯ)**В.Ю. Денисов**АО «РКЦ «Прогресс»
Россия, 443009, г. Самара, ул. Земеца, 18

Аннотация. В качестве объекта исследований рассматривался LAN-кабель. Приведено математическое описание взаимного влияния на дальний и ближний конец в симметричных кабелях связи. Выдвинуто предположение, что ужесточение допуска на диаметр изолированной жилы будет обеспечивать гарантированное достижение требуемых показателей качества симметричного кабеля связи. Приведен алгоритм расчета взаимного влияния между двумя и четырьмя цепями. Получено математическое описание и построена имитационная модель взаимного влияния на ближний и дальний конец для двух витых пар с учетом длины цепи и частоты передаваемого сигнала. Проведены компьютерные исследования при варьировании диаметрами изолированных жил LAN-кабеля с учетом его длины, взаимного влияния на ближний конец коэффициентов емкостной связи и переходного затухания на ближнем конце. Полученные результаты подтвердили выдвинутое предположение и являются основой для синтеза систем автоматического управления технологическим процессом изготовления LAN-кабеля.

Ключевые слова: LAN-кабель, изолированная жила, переходное затухание, допуск на диаметр.

Введение

В [1] рассматривалась задача расчета взаимного влияния в симметричной цепи между витыми парами, проводками витых пар и четырьмя витыми парами по расположению жил пучка в поперечном сечении. В частности, расчета рабочих и взаимных емкостей и емкостных связей. Но не рассматривался расчет влияний на дальний и ближний конец.

Известно из [2, 3, 4], что если положение проводов является функцией длины, как это, например, имеет место у кабелей звездной скрутки и у линий с двумя скрученными цепями, то возможно получить распределение связей по всей длине. Нужно вычислить по распределению связей напряжения в начале и в конце линии, подверженной влиянию, расчетом переходных затуханий на ближнем и дальнем концах.

Данные величины можно определить из рис. 1, на котором показаны влияющая цепь 1 и подверженная влиянию цепь 2; остальные, как их принято называть, третьи цепи не показаны на рисунке. Цепи 1 и 2 замкнуты на свои волновые сопротивления Z_1 и Z_2 . Напряжение U_{20} на ближнем к передатчику конце линии, подверженной влиянию, называется напряжением влияния на ближний конец, а напряжение U_{2l} – на дальний конец [2, 3].

В зависимости от того, в какой точке цепи определяется переходный разговор, различают переходное затухание при влиянии на ближний и дальний концы. Если рассматривается влияние между концами взаимовлияющих цепей, находящихся в одном пункте, то говорят о переходном затухании при влиянии на ближний конец b_N . Когда же рассматривают влияние между концами влияющей цепи и цепи, подверженной влиянию, находящимися в разных пунктах, то говорят о переходном затухании при влиянии на дальний конец b_F [5].

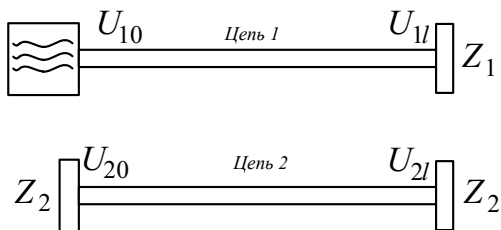


Рис. 1. Схема для определения влияния на дальний и ближний концы

Определить взаимные влияния на ближнем конце можно по формуле

$$N_{12} = \frac{U_{20}}{U_{10}} \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}}, \quad (1)$$

где U_{20} и U_{10} – напряжение влияния на ближний конец;

Z_1 и Z_2 – волновые сопротивления.

На дальнем конце:

$$F_{12} = \frac{U_{2l}}{U_{1l}} \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}}, \quad (2)$$

где U_{2l} и U_{1l} – напряжение влияния на дальний конец.

Или, выражая через соответствующие переходные затухания:

$$b_N \equiv -\ln|N_{12}| = \ln \left| \frac{U_{20}}{U_{10}} \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} \right|; \quad (3)$$

$$b_F \equiv -\ln|F_{12}| = \ln \left| \frac{U_{2l}}{U_{1l}} \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} \right|. \quad (4)$$

У высокочастотных цепей влияние на ближний конец, как правило, значительно больше, чем на дальний. Поэтому на практике при любых обстоятельствах стараются избегать влияния на ближний конец. Но вследствие отражений (неудовлетворительное согласование нагрузочного сопротивления с волновым сопротивлением или скачки волнового сопротивления) направление волн может измениться на обратное, в результате чего энергия пойдет к дальнему концу цепи, подверженной влиянию. Следовательно, в результате отражений и влияний на ближний конец возникает дополнительное влияние на дальний конец. Но эту часть вли-

яния мы учитывать не будем, так как при эксплуатации и настройке можно обеспечить хорошее согласование и эта составляющая не будет играть ощутимой роли [2]. Также будем пренебрегать неоднородностями волновых сопротивлений и неоднородностью диэлектрика.

Взаимное влияние в пучке z вызывается электрическими и магнитными полями, а описывается это влияние обобщенными телеграфными уравнениями для связанных цепей (3, 4):

$$-U_k = \frac{1}{j\omega} \left(K_{1k} \frac{dI_1}{dx} + K_{2k} \frac{dI_2}{dx} + \dots \right) \quad \begin{matrix} \text{Л} \\ \text{ах} \end{matrix} \quad \dots \quad \begin{matrix} \text{Л} \\ \text{ах} \end{matrix} \quad \backslash \quad (5)$$

$$\frac{-dU_k}{dx} = j\omega (L_{1k} I_1 + L_{2k} I_2 + \dots) \quad \dots \quad \dots \quad (6)$$

где U_k – напряжение k -й цепи;

I_k – ток k -й цепи;

L_k, L_{zk} – индуктивность k -й; z и k -й цепи;

K_k, K_{zk} – потенциальный коэффициент k -й; z и k -й цепи.

Эти уравнения называют еще основными уравнениями теории влияния.

Постановка задачи

Для гарантированного обеспечения требуемых параметров качества изготавливаемого кабеля необходимо изготавливать изолированную жилу с диаметром

$$D = D_u + X,$$

где $X = +X_B$ или $X = -X_H$;

$+X_B$ – верхний предел допуска;

$-X_H$ – нижний предел допуска.

Выдвинем предположение, что ужесточение допуска на диаметр изолированной жилы гарантированно обеспечит требуемые показатели качества LAN-кабеля. Одним из таких показателей является переходное затухание.

Зададимся следующими начальными условиями.

В качестве объекта исследования рассмотрим LAN – кабель категории 5е, на рис. 2 представлены его характеристики. Данный кабель, ССА-UU004-5E-PVC-GY, содержит 4 витые пары сплошных алюминиевых проводников, лакированных чистой медью (ССА). Кабель выполнен в неэкранированном исполнении и является экономичным решением, при этом полностью соответствует заявленной категории 5е и скорости передачи в 1Гбит/с и используемой для внутренней прокладки [6].

Введем ограничения:

- цепи будут нескрещенные параллельные;

- цепи имеют пренебрежимо малую внутреннюю индуктивность.

Рассмотрим частные случаи получения взаимного влияния на дальний и ближний конец для двух и четырех цепей. Найдем доказательство выдвинутого предположения.

Артикул	ССА-UU004-5E-PVC-GY
Категория	5е
Полоса пропускания, МГц	100
Тип	УТР
Количество пар	4
Материал проводников	Плакированный медью алюминий (ССА)
Тип проводников	Одножильный
Диаметр проводников, мм	0,50±0,005
Материал изоляции проводников	Полиэтилен высокой плотности (HDPE)
Толщина изоляции проводников, мм	0,2±0,02
Внешний диаметр изоляции проводников, мм	0,9±0,02
Материал внешней оболочки	Поливинилхлорид (PVC)
Применение	Для внутренней прокладки
Толщина оболочки, мм	0,55±0,02
Внешний диаметр оболочки, мм	5,2±0,2
Цвет оболочки	Серый
Защитная пленка	-
Разрывная нить	Есть
Погонная масса, кг/км	20,6
Радиус изгиба при прокладке, D	Не менее 8
Радиус изгиба при эксплуатации, D	Не менее 4
Растягивающее усилие, Н	Не более 80
Прочность на разрыв, Н	Не более 400
Волновое сопротивление, Ом	100±15
Погонное сопротивление по постоянному току, Ом/км	180

Рис.2. Характеристики кабеля ССА-UU004-5E-PVC-GY

Математическое описание взаимного влияния на ближний и дальний конец в симметричных кабелях связи

Для доказательства выдвинутого предположения обратимся к теории расчета взаимного влияния по связям. Решение систем уравнений (5 и 6) достаточно сложное, поэтому сделаны ограничения:

– для цепей с пренебрежимо малой внутренней индуктивностью справедливо уравнение

$$L_{ik} = \frac{1}{\upsilon^2} K_{ik}, \quad (7)$$

где L_{ik} – индуктивность i -й и k -й цепи;

– нескрещенные параллельные цепи, у которых L и K не зависят от x .

В итоге для k -й цепи получаем следующее дифференциальное уравнение 2-го порядка с постоянными коэффициентами:

$$\frac{d^2 U_k}{dx^2} + \frac{\omega^2}{\upsilon^2} U_k = 0. \quad (8)$$

Общее решение примет вид

$$U_k = A_k e^{-\gamma x} + B_k e^{+\gamma x}, \quad (9)$$

где A_k и B_k – постоянные интегрирования.

Чтобы определить постоянную распространения всех волн, нужно подставить (9) в (8), в итоге получим

$$\gamma = j \frac{\omega}{\upsilon}, \quad (10)$$

где γ – постоянная распространения волн;

ω – круговая частота;

v – скорость распространения сигнала во всех цепях.

Подставляя уравнение (9) в уравнение (6), получим токи во всех z цепях на основании системы z уравнений. Для наглядности приведем k -е уравнение [2]:

$$L_{1k}I_1 + L_{2k}I_2 + \dots \quad \dots \quad \frac{1}{v} \left(A_k e^{-\gamma x} - B_k e^{+\gamma x} \right). \quad (11)$$

Постоянные A_k и B_k определяются из граничных условий в начале и в конце каждой цепи, все цепи должны быть замкнуты обоими концами на свои волновые сопротивления [2]:

$$Z_k = \sqrt{L_k K_k}. \quad (12)$$

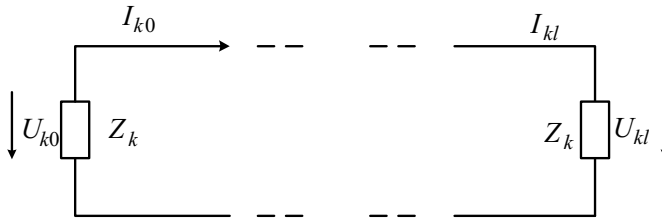


Рис. 3. Схема для определения знака тока I_{k0} в начале и конце цепи I_{kl}

Согласно обозначениям, приведенным на рис. 3, и направлениям токов, указанным стрелками, согласно закону Ома получим:

$$U_{kl} = I_{kl} Z_k \quad (k = 1, 2, 3, \dots) \quad (13)$$

$$U_{k0} = -I_{k0} Z_k \quad (k = 2, 3, 4, \dots) \quad (14)$$

Взаимное влияние между двумя цепями

Влияющую цепь обозначим 1, подверженную влиянию – 3. Для цепи 1 получим только одну волну (15) с учетом сделанных допущений: согласование на конце цепи и пренебрежение обратным влиянием цепи, подверженной влиянию.

$$U_1 = U_{10} e^{-\gamma x}; \quad (15)$$

$$I_1 = \frac{U_{10}}{Z_1} e^{-\gamma x}. \quad (16)$$

Уравнения (9) и (11) при $k = 3$ примут следующий вид:

$$U_3 = A_3 e^{-\gamma x} + B_3 e^{+\gamma x}; \quad (17)$$

$$L_{13}I_1 + L_{33}I_3 = \frac{1}{v} \left(A_3 e^{-\gamma x} - B_3 e^{+\gamma x} \right). \quad (18)$$

Для нахождения постоянных A_3 и B_3 нужно воспользоваться граничными условиями в начале и в конце цепи.

В начале определим постоянную A_3 . Для этого из уравнения (17) выразим B_3 и подставим в уравнение (16), получим:

$$L_{13}I_1 + L_{33}I_3 = \frac{1}{\upsilon} \left(A_3 e^{-\gamma x} - U_3 + A_3 e^{-\gamma x} \right). \quad (19)$$

С учетом того, что $x=0$, (14) примет вид: $U_{30} = -I_{30}Z_3$; также учитывая $Z_1 = L_{11}\upsilon$ и уравнения (15, 16), получим:

$$\frac{L_{13}U_{10}}{\upsilon L_{11}} + L_{33}I_3 + U_3 = \frac{1}{\upsilon} 2A_3. \quad (20)$$

Учитывая, что $L_{33} = \frac{z_3}{\upsilon}$ и $I_3 = \frac{U_3}{z_3}$, уравнение (20) примет вид:

$$A_3 = \frac{L_{13}U_{10}}{2L_{11}} + U_3. \quad (21)$$

Теперь найдем постоянную B_3 , для этого приравняем $x = l$, формула (13) примет вид $U_{3l} = I_{3l}Z_3$. Теперь выразим из (17) постоянную A_3 и подставим в уравнение (18), получим:

$$L_{13}I_1 + L_{33}I_3 = \frac{1}{\upsilon} \left(U_3 - B_3 e^{+\gamma l} - B_3 e^{+\gamma l} \right), \quad (22)$$

где l – длина цепи.

Учитывая вышеописанные выражения для L_{33} , L_{11} и I_3 , подставим их в (22) и выразим B_3 :

$$B_3 = -\frac{L_{13}U_{10}}{2L_{11}} e^{-2\gamma l}. \quad (23)$$

Подставим полученные выражения для постоянных (21) и (23) в (17), тем самым получим уравнение для U_3 :

$$U_3 = \frac{L_{13}U_{10}}{2L_{11}} e^{-\gamma x} \left(1 - e^{-2\gamma(l-x)} \right) = -I_3 Z_3. \quad (24)$$

Введем нормированные величины для напряжения U и тока I :

$$u_3 = \frac{U_3}{\sqrt{Z_3}}; \quad (25)$$

$$i_3 = \frac{I_3}{\sqrt{Z_3}}. \quad (26)$$

Используя нормированные величины и вводя коэффициент связи, получим:

$$\chi_{13} = \frac{L_{13}}{\sqrt{L_{11}L_{33}}} = \frac{K_{13}}{\sqrt{K_{11}K_{33}}}. \quad (27)$$

С учетом (27) выражение (24) примет следующий вид:

$$u_3 = -i_3 = \frac{1}{2} u_{10} \chi_{13} e^{-2\gamma x} \left(1 - e^{-2\gamma(l-x)} \right). \quad (28)$$

Это уравнение напряжения в любой точке цепи 3. Рассмотрев алгоритм получения постоянных A_3 , B_3 и нахождения уравнения напряжения для любой точки определенной цепи, рассмотрим более сложный пример – взаимное влияние между четырьмя цепями.

Взаимное влияние между четырьмя цепями

Вывод уравнений взаимного влияния между четырьмя цепями сводится к нахождению напряжений и токов «третьих» цепях – в данном случае это цепи 3 и 4. Влияние на цепь 2 будет суммой всех влияний цепей 1, 3 и 4 соответственно.

При условии пренебрежения обратным влиянием уравнения (9) и (11) при $k = 2$ для случая взаимного влияния четырех цепей будут выглядеть следующим образом:

$$U_2 = A_2 e^{-\gamma x} + B_2 e^{+\gamma x}; \quad (29)$$

$$L_{12}I_1 + L_{22}I_2 + L_{32}I_3 + L_{42}I_4 = \frac{1}{\nu} \left(A_2 e^{-\gamma x} - B_2 e^{+\gamma x} \right). \quad (30)$$

Величины I_3 и I_4 можно найти из уравнения (24); учитывая, что $L_{33} = \frac{Z_3}{\nu}$ и $L_{44} = \frac{Z_4}{\nu}$, получим:

$$I_3 = -\frac{U_3}{Z_3} = -\frac{L_{13}U_{10}}{2L_{11}L_{33}\nu} e^{-\gamma x} (1 - e^{-2\gamma(l-x)}); \quad (31)$$

$$I_4 = -\frac{U_4}{Z_4} = -\frac{L_{14}U_{10}}{2L_{11}L_{44}\nu} e^{-\gamma x} (1 - e^{-2\gamma(l-x)}). \quad (32)$$

Подставив в уравнение (30) уравнения (16, 31 и 32) и выразив из уравнения (29) постоянную $B_2 e^{+\gamma x}$, а также учитывая, что $x = 0$, получим постоянную A_2 :

$$A_2 = \frac{L_{12}U_{10}}{2L_{11}} - \frac{L_{32}L_{13}U_{10}}{4L_{11}L_{33}} (1 - e^{-2\gamma l}) - \frac{L_{42}L_{14}U_{10}}{4L_{11}L_{44}} (1 - e^{-2\gamma l}). \quad (33)$$

Выразив из уравнения (29) постоянную $A_2 e^{-\gamma x}$ и учитывая, что $x = l$, и подставив в уравнение (30) уравнения (16, 31 и 32), получим постоянную B_2 :

$$B_2 = e^{-\gamma l} \left(-\frac{L_{12}U_{10}}{2L_{11}} + \frac{L_{32}L_{13}U_{10}}{4L_{11}L_{33}} + \frac{L_{42}L_{14}U_{10}}{4L_{11}L_{44}} \right). \quad (34)$$

После подстановки в уравнение (29) уравнения полученных постоянных (33) и (34) получим окончательное решение для U_2 в виде

$$U_2 = U_{10} e^{-\gamma x} \left(\frac{L_{12}}{2L_{11}} (1 - e^{-2\gamma(l-x)}) - \frac{L_{32}L_{13}}{4L_{11}L_{33}} (1 - e^{-2\gamma l}) - \frac{L_{42}L_{14}}{4L_{11}L_{44}} (1 - e^{-2\gamma l}) \right). \quad (35)$$

Вводим нормированные величины для напряжения U :

$$u_2 = \frac{U_2}{\sqrt{Z_2}}. \quad (36)$$

Коэффициенты связи согласно [2] будут равны:

$$\begin{aligned} \chi_{12} &= \frac{L_{12}}{\sqrt{L_{11}L_{22}}} = \frac{K_{12}}{\sqrt{K_{11}K_{22}}}; \\ \chi_{32} &= \frac{L_{32}}{\sqrt{L_{33}L_{22}}} = \frac{K_{32}}{\sqrt{K_{33}K_{22}}}; \\ \chi_{42} &= \frac{L_{42}}{\sqrt{L_{44}L_{22}}} = \frac{K_{42}}{\sqrt{K_{44}K_{22}}}; \\ \chi_{14} &= \frac{L_{14}}{\sqrt{L_{11}L_{44}}} = \frac{K_{14}}{\sqrt{K_{11}K_{44}}}. \end{aligned} \quad (37)$$

Учитывая выражение (27) для коэффициента связи χ_{13} , получим уравнение для u_2 :

$$u_2 = u_{10}e^{-\gamma x} \left(\frac{\chi_{12}}{2} (1 - e^{-2\gamma(l-x)}) - \frac{\chi_{32}\chi_{13}}{4} (1 - e^{-2\gamma l}) - \frac{\chi_{42}\chi_{14}}{4} (1 - e^{-2\gamma l}) \right). \quad (38)$$

Из уравнения (38) получим уравнения для влияния на ближний конец:

$$N_{12} = \frac{u_{20}}{u_{10}} = \left(\frac{\chi_{12}}{2} - \frac{\chi_{32}\chi_{13}}{4} - \frac{\chi_{42}\chi_{14}}{4} \right) (1 - e^{-2\gamma l}) \quad (39)$$

и на дальний конец:

$$F_{12} = \frac{u_{2l}}{u_{1l}} = \left(-\frac{\chi_{32}\chi_{13}}{4} - \frac{\chi_{42}\chi_{14}}{4} \right) (1 - e^{-2\gamma l}). \quad (40)$$

Соответственно переходное затухание на ближнем конце согласно [5] будет равно

$$A_0 = 20 \lg \left(\frac{2}{N_{12}} \right); \quad (41)$$

на дальнем конце:

$$A_l = 20 \lg \left(\frac{2}{F_{12}} \right). \quad (42)$$

Определение взаимного влияния на дальний и ближний конец для двух витых пар

Уравнения (39) и (40) являются конечным результатом для влияния в пучке из идеальных цепей с учетом того, что все они замкнуты на свои волновые сопротивления.

Для нахождения коэффициентов $K_{12}, K_{32}, K_{42}, K_{14}, K_{13}, K_{11}, K_{22}, K_{33}, K_{44}$ из выражений (25, 37), нужно найти значения матрицы

$$K = C. \quad (43)$$

Матрица C_L из четырех цепей будет выглядеть следующим образом [2]:

$$C_L = \begin{pmatrix} C_{II} & C_{III} & C_{IV} & C_{IV} \\ C_{II} & C_{II} & C_{II} & C_{II} \\ C_{III} & C_{III} & C_{III} & C_{III} \\ C_{IV} & C_{IV} & C_{IV} & C_{IV} \end{pmatrix}, \quad (44)$$

где с учетом того, что $C_{ik} = C_{ki}$,

$C_{II}, C_{II}, C_{III}, C_{IV}$ – рабочие емкости;

$C_{II}, C_{III}, C_{IV}, C_{II}, C_{II}, C_{III}$ – взаимные емкости.

Так как вычисление обратной матрицы C_L вручную представляет собой громоздкие расчеты, используем ПО MathCad [7]. Согласно выражениям (25, 37) нас интересуют коэффициенты $K_{12}, K_{32}, K_{42}, K_{14}, K_{13}, K_{11}, K_{22}, K_{33}, K_{44}$, которые соотносятся с элементами матрицы K_L ; учитывая, что $K_{ik} = K_{ki}$, получим:

$$\begin{aligned} K_{12} &= K_{II}; & K_{32} &= K_{III}; & K_{42} &= K_{IV}; & K_{14} &= K_{IV}; & K_{13} &= K_{III}; \\ K_{11} &= K_{II}; & K_{22} &= K_{II}; & K_{33} &= K_{III}; & K_{44} &= K_{IV}. \end{aligned} \quad (45)$$

Значения элементов матрицы (45) легко получить с помощью ПО MathCad и соответственно получить значения коэффициентов связи (25, 37), но этот алгоритм можно использовать, если известны рабочие и взаимные емкости в матрице (44). Так как данные значения можно получить только экспериментальным путем, то в выражении (39) множитель, учитывающий длину цепи, примем равным единице, а N_{12} выразим из формулы (41). Согласно [8] минимальное переходное затухание для LAN-кабеля категории 5е на ближнем конце $A_0 = 35,3$ дБ/100 м. Примем $A_0 = 45$ дБ/100 м из расчета того, что при максимальном значении множителя $(1 - e^{-2\gamma l})$ переходное затухание будет не менее 35,3 дБ/100м. Получим следующее соотношение:

$$\begin{aligned} A_0 &= 20\lg(2) - 20\lg(N_{12}); \\ 20\lg(N_{12}) &= 20\lg(2) - 45; \\ N_{12} &= 10^{-1,948} = 0.01127. \end{aligned} \quad (46)$$

Чтобы рассчитать влияние и переходное затухание на ближнем конце, учитывая длину цепи и частоту передаваемого сигнала, нужно знать значение множителя $(1 - e^{-2\gamma l})$ в выражении (39). Данный множитель согласно [2] для длин меньше 1 км имеет вид

$$|1 - e^{-2\gamma l}| \approx \sqrt{\left(1 - \cos 2\frac{\omega l}{v}\right)^2 + \left(\sin 2\frac{\omega l}{v}\right)^2} = \sqrt{2 - 2\cos\left(\frac{\pi l}{\lambda/4}\right)}. \quad (47)$$

С учетом того, что $\lambda = \frac{2\pi v}{\omega}$, формула (47) примет вид

$$|1 - e^{-2\gamma l}| = \sqrt{2 - 2\cos\left(\frac{2\omega l}{v}\right)}, \quad (48)$$

где v – скорость распространения сигнала;

λ – длина волны;

γ – постоянная распространения волн;

π – число ПИ.

Скорость распространения сигнала для кабелей в диапазоне высоких частот находится по следующей формуле [9]:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (49)$$

где L – индуктивность кабеля;

C – емкость цепи.

Индуктивность находится по формуле [9]

$$L = \left[4 \cdot \ln \frac{a-r}{r} + \mu Q(kr) \right] \cdot 10^{-4}, \quad (50)$$

где a – расстояние между жилами;

r – радиус жилы;

μ – относительная магнитная проницаемость металла, из которого изготовлена жила;

$Q(kr)$ – табулированное значение бесселевой функции.

Значение бесселевой функции определяется по формуле [9]

$$Q(kr) = \sqrt{\mu_a \omega \sigma} \cdot r, \quad (51)$$

где σ – проводимость материала;

μ_a – абсолютная магнитная проницаемость материала.

В свою очередь, круговая частота находится по формуле [9]

$$\omega = 2\pi f, \quad (52)$$

где f – частота передаваемого сигнала.

Абсолютная магнитная проницаемость материала рассчитывается по формуле [9]

$$\mu_a = \mu_0 \mu, \quad (53)$$

где μ_0 – постоянная магнитная проницаемость материала.

Емкость цепи определяется по формуле [10]

$$C = \frac{\chi_{ук} \varepsilon \cdot 10^{-6}}{36 \ln \left(\frac{a}{r} \psi \right)}, \quad (54)$$

где $\chi_{ук}$ – коэффициент укрутки;

ε – эффективная диэлектрическая проницаемость изоляции;

ψ – поправочный коэффициент, учитывающий близость жил.

Поправочный коэффициент, учитывающий близость жил, в нашем случае для двойной парной скрутки, находится по формуле [9]

$$\psi = \frac{\left[(0.65d + d - d) - a \right]}{\left[(0.65d + d - d) + a \right]}, \quad (55)$$

где $d_{ДП}$ – диаметр двойной парной скрутки;

d – диаметр жилы;

d_1 – диаметр изолированной жилы.

Диаметр двойной парной скрутки определяется по формуле

$$d_{ДП} = D_{u1} + D_{u2}, \quad (56)$$

где D_{u1}, D_{u2} – диаметры изолированных жил в паре.

Расстояние между жилами находится по следующей формуле:

$$a = \frac{D_{u1} + D_{u2}}{2}. \quad (57)$$

Для связи коэффициентов K_1, K_2, K_3 с диаметром изоляции нужно выразить данные коэффициенты через межосевые расстояния жил в четверке d_{ij} . Согласно [1, 10, 11, 12, 13] коэффициенты емкостной связи будут равны

$$\begin{aligned} K_1 &= K_c (d_{13} - d_{23} - d_{14} + d_{24}); \\ K_2 &= K_c (d_{13} - d_{23} + d_{14} - d_{24}); \\ K_3 &= K_c (d_{13} + d_{23} - d_{14} - d_{24}). \end{aligned} \quad (58)$$

Константа K_c согласно [10] равна $15 \cdot 10^{-12}$ Ф.

Для связи межосевых расстояний и соответствующих диаметров изоляции воспользуемся следующей функциональной схемой (рис. 4). Из нее не составит труда вывести выражения зависимости диаметра изоляции от межосевого расстояния:

$$\begin{aligned} d_{12} &= \frac{D_{u1} + D_{u2}}{2}; \quad d_{13} = \frac{D_{u1} + D_{u3}}{2}; \\ d_{34} &= \frac{D_{u3} + D_{u4}}{2}; \quad d_{24} = \frac{D_{u2} + D_{u4}}{2}, \end{aligned} \quad (59)$$

где D_{un} – диаметр изолированной жилы ($n = 1 \dots 4$).

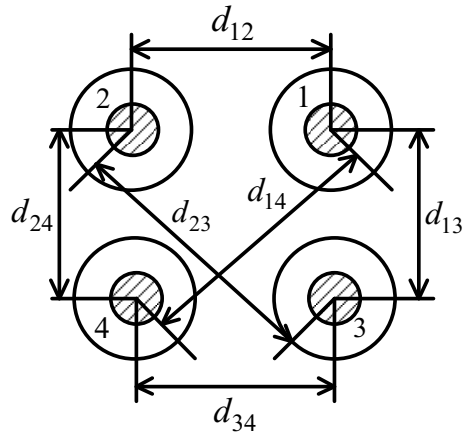


Рис. 4. Схема разреза двух витых пар с обозначенными межосевыми расстояниями: d_{13} – межосевое расстояние между жилами 1 и 3; d_{14} – межосевое расстояние между жилами 1 и 4; d_{12} – межосевое расстояние между жилами 1 и 2; d_{24} – межосевое расстояние между жилами 2 и 4; d_{34} – межосевое расстояние между жилами 3 и 4; d_{23} – межосевое расстояние между жилами 2 и 3

Для определения межосевых расстояний d_{23} и d_{14} построим следующую схему (рис. 5).

Согласно рис. 4 для нахождения межосевых расстояний d_{23} и d_{14} нужно воспользоваться следующими формулами [14]:

$$\begin{aligned} d_{23} &= \sqrt{d_{34}^2 + d_{24}^2 - 2d_{34}d_{24}\cos D_4}; \\ d_{14} &= \sqrt{d_{13}^2 + d_{34}^2 - 2d_{13}d_{34}\cos D_3}. \end{aligned} \quad (60)$$

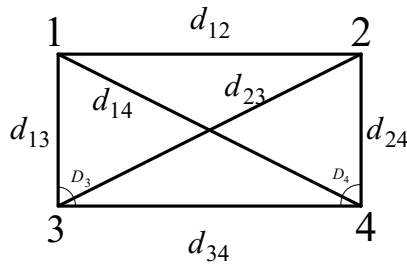


Рис. 5. Схема разреза двух витых пар с обозначенными межосевыми расстояниями: d_{23} и d_{14} – межосевое расстояние между жилами; 1, 2, 3, 4 – жилы; D_3 и D_4 – углы между межосевыми расстояниями d_{13}, d_{34} и d_{24}, d_{34} соответственно

Как видно из выражений (59, 60), в идеальном случае, если все диаметры всех двух витых пар будут одинаковыми, то коэффициенты K_2, K_3 будут равны нулю, а K_1 будет минимален. Но следует учитывать, что при наложении изоляции экструзионной линией на жилы полученные диаметры изоляции неидеальны и будут колебаться в некоторых пределах.

Исследование влияния диаметра изолированной жилы на переходное затухание

Проведем исследования по имитационной модели, построенной в ПО MathCad [6], согласно формулам (39, 41, 47–60). Для случая, когда диаметры изолированных жил одинаковы, зададимся следующими параметрами [15]:

$$l = 100 \text{ м}; f = 100 \cdot 10^6 \text{ Гц}; r = 0,25 \text{ мм}; \kappa = 1,02; \varepsilon = 1,4; d = 0,5 \text{ мм}; \\ \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}; \mu_1 = 1 \text{ Гн/м}; \sigma = 57 \cdot 10^2 \text{ См/м}.$$

Полученные расчеты по имитационной модели для случая, когда диаметры изолированных жил одинаковы, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние диаметров изолированных жил на переходное затухание на ближнем конце

Диаметры изоляций, мм $D_{u1}, D_{u4} / D_{u2}, D_{u3}$	$ 1 - e^{-2\gamma l} $	Влияние на ближнем конце N_{12} , 1/сд	Переходное затухание на ближнем конце A_0 , дБ/100 м	Коэффициенты емкостной связи $K_1, K_2, K_3, 10^{-11}$
0,92/0,92	1,9299	0,0217	35,4415	$K_1=1,14322943$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,91/0,91	1,9532	0,0220	35,6796	$K_1=1,13080303$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,9/0,9	0,7346	0,0082	44,5302	$K_1=1,11837662$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,89/0,89	1,9186	0,02162	36,5630	$K_1=1,10595021$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,88/0,88	1,9227	0,02166	36,9320	$K_1=1,10595021$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,904/0,904	1,9144	0,02157	36,0662	$K_1=1,12334718$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,903/0,903	1,8375	0,0207	36,4579	$K_1=1,12210454$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,902/0,902	0,3703	0,0041	50,4310	$K_1=1,12086191$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,901/0,901	0,6891	0,0077	45,0493	$K_1=1,11961926$ $K_2=0$

Диаметры изоляций, мм $D_{u1}, D_{u4} / D_{u2}, D_{u3}$	$ 1 - e^{-2\gamma l} $	Влияние на ближнем конце N_{12} , 1/сд	Переходное затухание на ближнем конце A_0 , дБ/100 м	Коэффициенты емкостной связи $K_1, K_2, K_3, 10^{-11}$
				$K_3=0$
0,899/0,899	1,3749	0,0154	39,1217	$K_1=1,11713398$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,898/0,898	1,1270	0,0127	40,8852	$K_1=1,11589134$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,897/0,897	1,5265	0,0172	38,3120	$K_1=1,11464872$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,896/0,896	0,9862	0,0111	42,0929	$K_1=1,11340606$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,9004/ 0,9004	1,9396	0,0218	36,0578	$K_1=1,11887367$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,9003/0,9003	1,21408	0,0136	40,1800	$K_1=1,11874941$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,9002/0,9002	0,9583	0,0108	42,2135	$K_1=1,11862515$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,9001/0,9001	1,9953	0,02248	35,8472	$K_1=1,11850088$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,8999/0,8999	1,3450	0,0151	39,3049	$K_1=1,11825235$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,8998/0,8998	1,9287	0,02173	39,2592	$K_1=1,11812809$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,8997/0,8997	0,42676	0,0048	49,2585	$K_1=1,11800383$ $K_2=0$ $K_3=0$
0,8996/0,8996	1,5159	0,0170	38,2275	$K_1=1,11787956$ $K_2=0$ $K_3=0$

Согласно [8] переходное затухание на ближнем конце для LAN-кабеля категории 5е должно быть не менее 35,3 дБ/100м. Проанализировав значения полученных переходных затуханий, можно сделать вывод, что ужесточение допуска на диаметр изолированной жилы обеспечивает гарантированное достижение требуемых показателей качества, а именно переходного затухания на ближнем конце, тем самым подтверждая ранее выдвинутое предположение.

Как видно из таблицы, наилучшие результаты достигаются при допуске, когда $X_B = 0$ и $X_H = 0$; при допуске, когда $X_B = +0,001$ и $X_B = +0,002$; при допуске, когда $X_B = +0,0002$ и $X_H = -0,0003$. Следовательно, придерживаясь этих значений допусков на диаметр изоляции при изготовлении изолированных жил LAN-кабеля, можно достичь наибольшего значения переходного затухания. Также из результатов видно, что ужесточение допуска на диаметр приводит к незначительному, но все-таки уменьшению коэффициента емкостной связи K_1 .

Для полноты эксперимента рассмотрим случай, когда диаметры изолированных жил в паре разные. Значения параметров возьмем из предыдущего эксперимента с учетом лишь того, что диаметр изолированной жилы будем находить

по следующей формуле: $d_1 = \frac{D_{u1} + D_{u2}}{2}$.

Полученные расчеты по имитационной модели для случая, когда диаметры изолированных жил в паре разные, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние диаметров изолированных жил на переходное затухание на ближнем конце

Диаметры изоляций, мм $D_{u1}, D_{u4} / D_{u2}, D_{u3}$	$ 1 - e^{-2\gamma l} $	Влияние на ближнем конце N_{12} , 1/сд	Переходное затухание на ближнем конце A_0 , дБ/100 м	Коэффициенты емкостной связи $K_1, K_2, K_3, 10^{-11}$
0,91/0,92	0,4617	0,0118	44,5672	$K_1=1,13700174$ $K_2=-0,010606482$ $K_3=0,010606482$
0,9/0,91	0,3256	0,0085	47,3342	$K_1=1,12457517$ $K_2=-0,010606480$ $K_3=0,010606480$
0,89/0,9	1,9949	0,0542	31,3326	$K_1=1,1121486$ $K_2=-0,010606477$ $K_3=0,010606477$
0,88/0,89	0,4647	0,0130	43,7371	$K_1=1,09972203$ $K_2=-0,010606474$ $K_3=0,010606474$
0,903/0,904	0,3888	0,0104	45,6789	$K_1=1,12272571$ $K_2=-0,0010606600$ $K_3=0,0010606600$
0,902/0,903	1,5981	0,0428	33,3759	$K_1=1,12148307$ $K_2=-0,0010606600$ $K_3=0,0010606600$
0,901/0,902	0,4756	0,0128	43,8762	$K_1=1,12024043$

Диаметры изоляций, мм $D_{u1}, D_{u4} / D_{u2}, D_{u3}$	$ 1 - e^{-2\gamma l} $	Влияние на ближнем конце N_{12} , 1/сд	Переходное затухание на ближнем конце A_0 , дБ/100 м	Коэффициенты емкостной связи $K_1, K_2, K_3, 10^{-11}$
				$K_2 = -0,0010606600$ $K_3 = 0,0010606600$
0,9/0,901	0,2927	0,0079	48,0659	$K_1 = 1,11899779$ $K_2 = -0,0010606600$ $K_3 = 0,0010606600$
0,899/0,9	1,8775	0,0508	31,8995	$K_1 = 1,11775515$ $K_2 = -0,0010606600$ $K_3 = 0,0010606600$
0,898/0,899	1,3335	0,0362	34,8454	$K_1 = 1,11651251$ $K_2 = -0,0010606600$ $K_3 = 0,0010606600$
0,897/0,898	1,9991	0,0544	31,3034	$K_1 = 1,11402723$ $K_2 = -0,0010606600$ $K_3 = 0,0010606600$
0,896/0,897	1,0039	0,0274	37,2609	$K_1 = 1,11402723$ $K_2 = -0,0010606600$ $K_3 = 0,0010606600$
0,9003/0,9004	1,8870	0,0509	31,8695	$K_1 = 1,11881154$ $K_2 = -0,00010606601$ $K_3 = 0,00010606601$
0,9002/0,9003	0,1492	0,0040	53,9021	$K_1 = 1,11868728$ $K_2 = -0,00010606601$ $K_3 = 0,00010606601$
0,9001/0,9002	1,7553	0,0474	32,4931	$K_1 = 1,11856301$ $K_2 = -0,00010606601$ $K_3 = 0,00010606601$
0,9/0,9001	1,6124	0,0436	33,2279	$K_1 = 1,11843875$ $K_2 = -0,00010606601$ $K_3 = 0,00010606601$
0,8999/0,9	0,3626	0,0098	46,1846	$K_1 = 1,11831448$ $K_2 = -0,00010606601$ $K_3 = 0,00010606601$
0,8998/0,8999	1,9214	0,0520	31,6999	$K_1 = 1,11819022$ $K_2 = -0,00010606601$ $K_3 = 0,00010606601$
0,8997/0,8998	1,3741	0,0372	34,9501	$K_1 = 1,11806596$ $K_2 = -0,00010606601$ $K_3 = 0,00010606601$
0,8996/0,8997	0,6370	0,0172	41,2835	$K_1 = 1,11794169$ $K_2 = -0,00010606601$ $K_3 = 0,00010606601$

Проанализировав значения полученных переходных затуханий для разных диаметров изоляций, можно сделать вывод, что ужесточение допуска на диаметр изолированной жилы обеспечивает гарантированное достижение требуемых показателей качества, а именно переходного затухания на ближнем конце, тем самым подтверждая ранее выдвинутое предположение.

Как видно из таблицы, наилучшие результаты достигаются при допуске, когда $X_B = +0,01$, и диаметрах изоляции 0,9/0,91 и 0,91/0,92 – это означает, что в паре одна изолированная жила имеет диаметр 0,91 мм, а другая 0,92 мм; при допуске, когда $X_B = +0,001$, и диаметрах изоляции 0,9/0,901 и 0,903/0,904; при допуске, когда $X_B = +0,0001$, и диаметрах изоляции 0,9002/0,9003; $X_H = -0,0001$ и диаметрах изоляции 0,8999/0,9. Следовательно, придерживаясь этих значений допусков на диаметр изоляции при изготовлении изолированных жил LAN-кабеля, можно достичь наибольшего значения переходного затухания. Также из результатов видно, что ужесточение допуска на диаметр приводит к незначительному уменьшению коэффициента емкостной связи K_1 и к значительному уменьшению коэффициентов емкостной связи K_2 и K_3 .

Заключение

Получены соотношения, связывающие диаметр изоляции и межосевые расстояния жил кабеля с коэффициентами емкостной связи K_1 , K_2 , K_3 .

Исходя из математического описания взаимного влияния на дальний и ближний конец в симметричных цепях получены соотношения для взаимного влияния между двумя витыми парами, а также соотношения, связывающие диаметр изоляции с коэффициентами связи, из которых непосредственно складывается влияние на дальний и ближний конец и, как следствие, переходные затухания. При условии, что не учитываются неоднородности волновых сопротивлений, неоднородности диэлектрика, рассматриваемые цепи имеют малую внутреннюю индуктивность, цепи нескрещенные параллельные.

Проведены экспериментальные исследования согласно имитационной модели. Получены результаты для случая, когда диаметры изолированных жил имеют одинаковое значение и когда диаметры изолированных жил имеют разные значения. Проведен анализ полученных результатов. Наилучшие показатели переходного затухания на ближнем конце достигаются при $X_B = 0$ и $X_H = 0$; $X_B = +0,001$ и $X_B = +0,002$; $X_B = +0,0002$ и $X_H = -0,0003$ в случае, когда диаметры изолированных жил одинаковые. В случае, когда диаметры изолированных жил разные, наилучшие результаты достигаются при $X_B = +0,001$, $X_B = +0,0001$, $X_H = -0,0001$.

Доказано, что гарантированное достижение требуемых показателей качества изготавливаемого LAN-кабеля обеспечивается ужесточением допусков на диаметр изолированных кабельных жил. Сформулированы величины допусков порядка 4 мкм на диаметр кабельных жил, изготавливаемых на экструзионных линиях, при выдерживании которых эксплуатационные характеристики симметричного кабеля вне зависимости от последующих производственных операций будут соответствовать требуемым значениям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Денисов В.Ю., Митрошин В.Н., Чостковский Б.К. Математическое описание взаимного влияния в симметричной цепи (LAN-кабеле) на основе уравнения частных емкостей Максвелла //

- Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2019. Вып. 1 (61). С. 110–127.
2. Клейн В. Теория взаимного влияния в линиях связи. М.-Л.: ГЭИ, 1957. 326 с.
 3. Семенов А.Б., Стрижаков С.К., Сунчелей И.Р. Структурированные кабельные системы: 5-е изд. М.: АйТи, ДМК Пресс, 2014. 640 с.
 4. Самарский П.А. Основы структурированных кабельных систем. М.: ДМК Пресс, 2016. 216 с.
 5. Гроднев И.И., Шварцман В.О. Теория направляющих систем связи. М.: Связь, 1978. 296 с.
 6. Кабель ССА-UU004-5E-PVC-GY // Netlan. <http://www.netlancables.ru/CCA-UU004-5E-PVC-GY.cdr.pdf>
 7. Плис А.И., Сливина Н.А. Mathcad: математический практикум для экономистов и инженеров: Учеб. пособие. М., 1999. 656 с.
 8. ГОСТ Р 54429-2011. Кабели связи симметричные для цифровых систем передачи. <http://docs.cntd.ru/document/1200088857>
 9. Расчет и проектирование кабелей связи и радиочастотных кабелей / Под ред. Э.Т. Лариной. – М.: МЭИ, 1982. 104 с.
 10. Чостковский Б.К. Структурно-параметрический синтез систем оптимального управления совмещенными технологическими процессами производства кабелей связи по эксплуатационным критериям качества: Дис. ... д-ра. техн. наук. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2007. 265 с.
 11. Чостковский Б.К., Смородинов Д.А. Математическая модель витой пары радиочастотного кабеля объекта управления // Вестник Самарского государственного университета. Сер. Физико-математические науки. 2008. Вып. 1 (16). С. 113–118.
 12. Милованов А.М., Чостковский Б.К. Регулирование коэффициентов емкостной связи // Техническая кибернетика: Сб. науч. тр. Куйбышев, 1974. С. 120–123.
 13. Елагин Ю.В. Информационно-измерительная система измерения и регистрации емкостных связей четверок кабеля в процессе скрутки // Всесоюзная науч.-техн. конф. «Автоматизация и механизация кабельного производства»: Тез. докладов. М.: Информэлектро, 1977. С. 51–52.
 14. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. М.: ГИТТЛ, 1957. 608 с.
 15. Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. Т. 3. 3-е изд., перераб. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. 728 с.

Статья поступила в редакцию 12 марта 2020 года

FORMING OF THE DIAMETER TOLERANCES OF THE INSULATED CORE TO PROVIDE THE GUARANTEED ACHIEVEMENT OF THE REQUIRED QUALITY INDICATORS OF THE SYMMETRICAL COMMUNICATION CABLE (LAN-CABLE)

V. Yu. Denisov

Samara Space Centre
18, Zemetsa str., Samara, 443009

Abstract. *A LAN-cable was considered as an object of research. A mathematical description of the mutual influence on the far and near ends in symmetrical communication cables is presented. It's assumed that the tightening of the tolerance for the diameter of the insulated core will ensure the guaranteed achievement of the required quality indicators of the symmetrical communication cable. An algorithm for calculating the mutual influence between two and four circuit is given. A mathematical description was obtained and a simulation model of the mutual influence on the near and far ends was constructed for two twisted pairs, taking into account the length of the chain and the frequency of the transmitted signal. Computer studies were performed when the diameters of isolated LAN-cable cores were varied, taking into account its length, the mutual influence on the near end of the coefficients*

Vladimir Yu. Denisov, Engineer.

of the capacitive coupling, and transient attenuation on the near end. The obtained results confirmed the hypothesis and are the basis for the synthesis of automatic control systems for the LAN-cable manufacturing process.

Keywords: the LAN-cable, the insulated core, transient attenuation, the tolerance for the diameter.

REFERENCES

1. Denisov V.Yu., Mitroshin V.N., Chostkovskiy B.K. Mathematical description of mutual influence in a symmetric circuit (LAN cable) based on the basis of the equation of partial capacities Maxwell // Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Un-ta. Ser. Tekhnicheskie nauki. 2019. No. 1(61). Pp. 110–127.
2. Kleyn V. Theory of mutual influence in communication lines. Moscow. Leningrad. GEI, 1957. 326 p.
3. Semenov A.B., Strizhakov S.K., Suncheley I.R. Structured Cabling Systems. Moscow. IT Co., DMK Press, 2014. 640 p.
4. Samarskiy P.A. Basics of structured cabling systems. Moscow. DMK Pres, 2016. 216 p.
5. Grodnev I.I., Shvartsman O.V. Theory of guiding communication systems. Moscow. Svyaz', 1978. 296 p.
6. Cable CCA-UU004-5E-PVC-GY // Netlan. <http://www.netlancables.ru/CCA-UU004-5E-PVC-GY.cdr.pdf>
7. Plis A.I., Slivina N.A. Mathcad: mathematical workshop for economists and engineers. 1999. 656 p.
8. GOST R 54429-2011. Kabeli svyazi simmetrichnyye dlya stifrovyyh sistem peredachi. <http://docs.cntd.ru/document/1200088857>
9. Calculation and design of communication cables and radio frequency cables. Edited by E.T. Larina. Moscow. MEI, 1982. 104 p.
10. Chostkovskiy B.K. Strukturno-parametricheskii sintez sistem optimal'nogo upravleniya sovmeshchennymi tekhnologicheskimi protsessami proizvodstva kabeley svyazi po ekspluatatsionnym kriteriyam kachestva. Diss. ... dokt. tekhn. nauk. Samara, Samar. Gos. Tekhn. Un-t, 2007. 265 p.
11. Chostkovskiy B.K., Smorodinov D.A. Mathematical model of twisted pairs radio-frequency cable of control object // Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Un-ta. Ser. Fiziko-matematicheskie nauki. 2008. No. 1 (16). Pp. 113–118.
12. Milovanov A.M., Chostkovskiy B.K. Regulation of capacitance coupling coefficients // Tekhnicheskaya kibernetika: Sbornik nauchn. tr. Kuibyshev. 1974. Pp. 120–123.
13. Elagin Yu.V. Information and measurement system for measuring and registering capacitance connections of cable fours during the twisting process // Vsesoyuznaya nachn.-tekhn. konf. «Avtomatizatsiya i mekhanizatsiya kabel'nogo proizvodstva»: Tez. dokladov. Moscow. Informelektro, 1977. Pp. 51–52.
14. Bronshteyn I.N., Semendyaev K.A. Math reference. Moscow, GITTL, 1957. 608 p.
15. Handbook of electrical materials. Edited by Yu.V. Korickiy, V.V. Pasyukov, B.M. Tareev. V. 3. 3rd ed. revised. Leningrad. Energoatomizdat. Leningr. otd-nie, 1988. 728 p.