

ИЗСЛЕДВАНЕ НА КОЕФИЦИЕНТА НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНА ВРЪЗКА МЕЖДУ ВЕРИГИТЕ В СИМЕТРИЧНИ КАБЕЛИ

Ангел Тошков

Абстракт: В статията е представен подход за определяне на коефициента на електромагнитна връзка между работни вериги в симетрични кабели за телекомуникациите. Изчисленията дават точни резултати за всеки две произволно разположени вериги. Направени са изводите, че подходът, е трудно приложим на практика. Това е така, поради голямата сложност на преобразуванията и зависимостта му от много голям брой параметри. В много случаи голяма част от тези параметри не са известни предварително, а са обект на самия процес на проектиране или оптимизиране. Големият брой на параметрите би затруднил изключително много процеса на оптимизация при търсенето на екстремуми на уравнението на връзката. При снопова конструкция пресмятанията са много трудоемки. За всеки отделен случай, даже при минимални различия в конструкцията е необходимо да се създава нов математически модел на кабела. Обърнато е внимание на факта, че от друга страна в процеса на проектиране не е необходимо да се знае точната стойност на коефициента на електромагнитна връзка между кои да са две вериги. Необходимо е да се знае неговата критична стойност за определени групи от проводници (например група, сноп или повив), която определя най-ниските стойности на преходното затихване на близък и далечен край и най-високите стойности на капацитетните и магнитните връзки между веригите. Необходимо е да бъдат изрази, които да са подходящи за използване при автоматизирано проектиране и да включват параметри, които лесно могат да бъдат определяни. Такива са всички радиални размери на конструктивните елементи на кабела. Въпреки големия брой параметри, те могат да бъдат измерени, а изчисленията да бъдат автоматизирани посредством създаването на подходящ софтуерен алгоритъм. Създадена е предпоставка за създаването на софтуер за пресмятане на коефициента на електромагнитна връзка между всеки две работни вериги, посредством координатите на проводниците в комплексна равнина. Това може да стане, като се изведат изрази, даващи възможност стойността на коефициента на електромагнитна връзка да се изчислява на базата на радиалните компоненти на участващите в кабела елементи.

Ключови думи: комуникационни кабели, коефициент на електромагнитна връзка.

STUDY OF ELECTROMAGNETIC COUPLING COEFFICIENT BETWEEN CIRCUITS IN SYMMETRICAL CABLES

Angel Toshkov

Abstract: This paper presents an approach to determine the electromagnetic coupling coefficient between working circuits in symmetrical cables for telecommunications. The calculations give exact results for any two arbitrarily spaced circuits. The conclusions are drawn that the approach, is difficult to apply in practice. This is due to the large complexity of the transformations and its dependence on a very large number of parameters. In many cases, many of these parameters are not known in advance, but are subject to the design or optimization process itself. The large number of parameters would make the optimization process extremely difficult in the search for extremums of the constraint equation. In a bundle design, the computations are very laborious. A new mathematical model of the cable has to be created for each case, even with minimal differences in the design. Attention is drawn to the fact that,

on the other hand, in the design process it is not necessary to know the exact value of the electromagnetic coupling coefficient between which two circuits. It is necessary to know its critical value for certain groups of conductors (e.g. group, bundle or call) which determines the lowest values of transient attenuation at the near and far ends and the highest values of capacitive and magnetic coupling between the circuits. Expressions need to be suitable for use in automated design and include parameters that can be easily determined. Such are all the radial dimensions of the cable structural elements. Despite the large number of parameters, these can be measured and the calculations automated by creating an appropriate software algorithm. A prerequisite has been established for the creation of software to calculate the electromagnetic coupling coefficient between any two working circuits, by means of the coordinates of the conductors in a complex plane. This can be done by deriving expressions enabling the value of the electromagnetic coupling coefficient to be calculated based on the radial components of the elements involved in the cable.

Keywords: communication cables, electromagnetic coupling coefficient.

Същност на коефициента на електромагнитна връзка

Непосредственото електромагнитно влияние между веригите най-пълно се характеризира посредством големината на електромагнитната връзка на близък и далечен край. При изграждането на математическия модел на електромагнитните връзки между веригите в различните кабелни конструкции се изхожда от постановката, че структурата на веригите е еднородна по цялата дължина на кабела. Изследвайки при тези ограничения постоянната съставляваща на електромагнитната връзка между съгласувано натоварени кабелни вериги, се извеждат уравненията установяващи законите на разпределение на електромагнитната връзка по дължината на линията [1].

$$(1) \quad \begin{aligned} N_{12} &= \int_0^l N_{12}(z) e^{-(\gamma_1 + \gamma_2)z} dz \\ F_{12} &= \int_0^l F_{12}(z) e^{-(\gamma_1 - \gamma_2)z} dz \end{aligned}$$

където:

- $N_{12}(z)$ и $F_{12}(z)$ са законите за разпределение на електромагнитните връзки между веригите по дължината на линията съответно на близък и далечен край

- γ_1 и γ_2 съответно ъглите на завъртане на електромагнитното поле по дължината на линията предизвикано от усукването на групите.

Ако се пренебрегне влиянието на активната съставляваща на електрическата и магнитната връзка (това допускане е възможно за ниски и високи честоти), изразите могат да се запишат така:

$$(2) \quad \begin{aligned} N_{12} &= \omega(T + Q) \int_0^l k(z) e^{-(\gamma_1 + \gamma_2)z} dz \\ F_{12} &= \omega(T - Q) \int_0^l k(z) e^{-(\gamma_1 - \gamma_2)z} dz \end{aligned}$$

- T и Q са параметри, зависещи от конструкцията на кабела;

- $k(z)$ е величина характеризираща големината на електромагнитната връзка в точка от кабела с надлъжна координати z и зависи от конструктивната асиметрия, конструкцията на кабела и взаимното разположение на веригите в него.

- γ_1, γ_2 - ъгъл на завъртане на веригите около надлъжната ос на кабела, зависещ от стъпката на усукване.

Ако приемем, че работните вериги имат еднаква конструкция, то за ъглите γ_1 и γ_2 може да се приеме, че ъглите на $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$.

Изследвайки двата израза от (2) за екстремуми, се достига до:

$$(3) \quad \begin{aligned} N_{max} &= \omega(T + Q) \frac{2}{W} \sum k \\ F_{max} &= l\omega(T - Q) \frac{2}{W} \sum k \end{aligned}$$

От тези изрази се вижда, че големината на електромагнитната връзка на близък и далечен край е функция на дължината на кабелната линия, работната честота ω , на една постоянна съставяща W , зависеща само от конструкцията на кабела и от коефициента на електромагнитна връзка $\sum k$.

където:

$$W = (2m+1)\phi_1 \pm (2n+1)\phi_2 \pm p\phi'_1 \pm q\phi'_2 \pm t\theta.$$

- m, n, p, q, t са положителни цели числа 1,2,3,4,5,.....

- $\phi_1, \phi_2, \phi'_1, \phi'_2$ и θ - са коефициенти, представляващи ъгли изразени като функции на стъпките на усукване на групите и повивите на кабела в които участват разглежданите вериги.

Критично условие се получава, когато W клони към 0, съответно :

$$(4) \quad \begin{aligned} N_{кр} &= \omega(T + Q) \frac{1-e^{-2\gamma l}}{2\gamma} (\cos W_0 + \sin W_0) \sum k \\ F_{кр} &= l\omega(T - Q) (\cos W_0 + \sin W_0) \sum k \end{aligned}$$

W_0 е ъгъл, една постоянна съставяща, зависеща от разликата в началния ъгъл γ на осево завъртане между усуканите кабелни вериги. Максималните значения съгласно (4), не могат да надминат

$$(5) \quad \begin{aligned} N_{max} &= \omega(T + Q) \frac{1}{\gamma} \sum k \\ F_{max} &= l\omega(T - Q) \sum k \end{aligned}$$

използвайки последните два израза, като се отчете, че $W \gg \gamma$ при електромагнитната връзка на близък край, $l \gg 2/W$ за далечен край и (3) може да бъде определено максимално допустимото доближаване до критично условие.

$$(6) \quad \begin{aligned} W_{n \min} &= \omega(T + Q) \sum k e^{A_0 \min} \\ W_{f \min} &= \omega(T - Q) \sum k e^{A_l \min} \end{aligned}$$

са минималните значения, гарантиращи отсъствие на критично условие при предварително зададени минимално допустими стойности на преходно затихване на близък край $A_{0 \min}$ и защитеността на далечен край $A_{l \min}$.

Изводите са следните:

Анализирайки (6) може да се направи заключението, че, минималните значения на коефициентите $W_{n \min}$ и $W_{f \min}$ при които се гарантира отсъствие на критично условие, зависят от

конструкцията на кабела (Т, Q), от коефициента на електромагнитна връзка зависещ от взаимното разположение на веригите и тяхното усукване ($\sum k$), от честотния спектър (ω) и нормите на преходно затихване/защитеност на близък и далечен край ($A_{o \min}$ и $A_{l \min}$).

От (6) се вижда че максималните стойности на електромагнитната връзка на близък и далечен край между две вериги $N_{\max}$ и $F_{\max}$ зависят от следните параметри - ω, A_o, A_l, T, Q и $\sum k$.

Честотният спектър ω и стойностите на минималното преходно затихване са независими параметри, чиито стойности са известни предварително.

Параметрите T, Q и $\sum k$ са функция единствено на конструктивните параметри и честотата [2]. Пресмятането на коефициентите T и Q става по формулите:

$$(7) \quad T = \frac{\pi \varepsilon Z_B}{2 \ln\left(\frac{r_{ab}}{r_0} \psi_1\right) \ln\left(\frac{r_{cd}}{r_0} \psi_2\right)} \quad [\text{F}\Omega/\text{m}]$$

$$(8) \quad Q = \frac{\mu}{2\pi Z_B} \quad [\text{H}/\Omega \cdot \text{m}]$$

$\varepsilon - \varepsilon_{ek} \varepsilon_o$;

$\mu - \mu_a \mu_o$;

ε_{ek} - еквивалентна стойност на диелектричната проницаемост на материала между проводниците;

μ_a - стойност на магнитната проницаемост на материала на проводниците;

r_{ab} - разстоянието между проводниците а и b на първата верига;

r_{cd} - разстоянието между проводниците с и d на втората верига;

r_o - радиус на проводниците (допускането е, че са еднакви за различните вериги);

T - е коефициент отчитащ големината на електрическата връзка, а Q - на магнитната;

ψ_1 и ψ_2 са коефициенти характеризиращи близостта на метални екрани, обвивки и съседните проводници съответно към първата и втората верига.

Z_B - вълново съпротивление на веригата за честотата, за която се прави пресмятането;

Ако се предположи, че кабелната верига е хомогенна, конструкцията на елементарните групи е еднаква, диаметрите на проводниците и стойностите на вълновите съпротивления на веригите са равни, то израза за T може допълнително да се опрости.

Както бе казано по-горе $\sum k$ представлява общия коефициент на електромагнитна връзка между веригите i и j .

Стойността на $\sum k = k'_{ij} + k''_{ij} + k'''_{ij} + k''''_{ij}$ - представлява сума от стойностите на коефициентите на непосредствена електромагнитна връзка между двете взаимодействащи вериги. Тези коефициенти се разделят на две групи в зависимост от характера на причините които ги пораждат - постоянни и непостоянни.

- постоянните се определят от конструкция и взаимното разположение на веригите;

От своя страна постоянните също се разделят на коефициент директна електромагнитна връзка k'_{ij} и коефициент на електромагнитна връзка в следствие на отрежението от екран а или металните обвивки k''_{ij} .

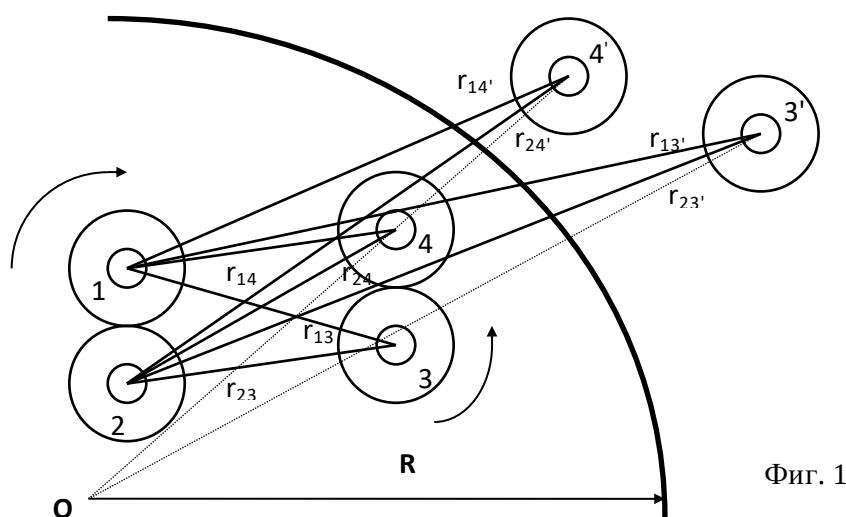
- непостоянните са предизвикани от практически неизбежните отклонения от идеалната конструкция - k'''_{ij} и k''''_{ij} .

Определяне стойността на коефициента на електромагнитна връзка посредством координатите на проводниците в равнина.

Ако имаме две взаимодействащи си вериги 1-2 и 3-4 то $\sum k$ може да бъде представена по следният начин :

$$(8) \quad \sum k = k'_{ij} + k''_{ij} + k'''_{ij} + k''''_{ij}$$

$$(9) \quad \sum k = \ln \frac{r_{13}r_{24}}{r_{14}r_{23}} + \ln \frac{r_{13}r_{24}'}{r_{14}r_{23}'} + k'''_{ij} + k''''_{ij}.$$



Фиг. 1

Взаимодействащи си вериги 1-2 и 3-4 и огледалното изображение на 3-4 3'-4' през металната обвивка спрямо центъра на кабела O.

На фигура 1 R е радиусът на екрана до вътрешната му част. С цел опростяване на пресмятанята при отразяването на коефициента на електромагнитна връзка в следствие наличието на екран се използва огледалното изображение на проводниците на едната верига 3-4 спрямо екрана относно центъра на кабела - 3'-4'.

Един начин за намиране на стойността на $\sum k$ е посредством изразяване на разстоянията между центровете на проводниците r_{ij} в комплексна равнина. Координатите на центъра на взаимодействащите си жила са :

$$(10) \quad \begin{aligned} \eta_1 &= R_{12}e^{i\phi} + R_g e^{i\theta} \\ \eta_2 &= R_{12}e^{i\phi} - R_g e^{i\theta} \\ \eta_3 &= R_{34}e^{i\xi} + R_g e^{i\zeta} \\ \eta_4 &= R_{34}e^{i\xi} - R_g e^{i\zeta} \\ \eta_{3'} &= R_{3'4'}e^{i\xi} + R_g e^{i\zeta} \\ \eta_{4'} &= R_{3'4'}e^{i\xi} - R_g e^{i\zeta} \end{aligned}$$

R_{IJ} е разстоянието от центъра на кабела до центъра на съответния повив;

ϕ и ξ са ъглите на завъртане на центъра на веригата спрямо надлъжната ос на кабела като функция на стъпката на усукване на повива;

R_0 - радиуса на усукване на веригата;

θ и ζ са ъглите на завъртане на веригата спрямо собствената и ос в следствие на усукването и със стъпка h_i .

В случай на усукване в двойна двойка се появява още един член, отразяващ въртенето на веригите в четворката една спрямо друга в следствие усукването на групата. По подобен начин се изразяват и координатите на проводниците при снопово усукване.

Съобразявайки се с тази постановка, могат да бъдат изразени разстоянията между проводниците, като разлика между комплексните координати:

$$\begin{aligned}
 r_{13} &= \eta_1 - \eta_3 = R_{12}e^{i\phi} + R_g e^{i\theta} - (R_{34}e^{i\xi} + R_g e^{i\zeta}) \\
 r_{24} &= \eta_2 - \eta_4 = R_{12}e^{i\phi} - R_g e^{i\theta} - (R_{34}e^{i\xi} - R_g e^{i\zeta}) \\
 r_{14} &= \eta_1 - \eta_4 = R_{12}e^{i\phi} + R_g e^{i\theta} - (R_{34}e^{i\xi} - R_g e^{i\zeta}) \\
 r_{23} &= \eta_2 - \eta_3 = R_{12}e^{i\phi} - R_g e^{i\theta} - (R_{34}e^{i\xi} + R_g e^{i\zeta}) \\
 r_{13'} &= \eta_1 - \eta_{3'} = R_{12}e^{i\phi} + R_g e^{i\theta} - (R_{3'4}e^{i\xi} + R_g e^{i\zeta}) \\
 r_{24'} &= \eta_2 - \eta_{4'} = R_{12}e^{i\phi} - R_g e^{i\theta} - (R_{3'4}e^{i\xi} - R_g e^{i\zeta}) \\
 r_{14'} &= \eta_1 - \eta_{4'} = R_{12}e^{i\phi} + R_g e^{i\theta} - (R_{3'4}e^{i\xi} - R_g e^{i\zeta}) \\
 r_{23'} &= \eta_2 - \eta_{3'} = R_{12}e^{i\phi} - R_g e^{i\theta} - (R_{3'4}e^{i\xi} + R_g e^{i\zeta})
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Изразявайки ъглите ϕ , θ , ξ и ζ посредством стъпките на усукване на групите и повивите или сноповете може да се получат стойностите на коефициента на електромагнитна връзка при известна конструкция.

$$\begin{aligned}
 \phi &= \phi_0 + 2\pi/H_1 \\
 \xi &= \xi_0 + 2\pi/H_2 \\
 \theta &= \theta_0 + 2\pi/h_1 \\
 \zeta &= \zeta_0 + 2\pi/h_2
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

Началните стойности на ъглите могат да бъдат намерени, като се знае точната конструкция на кабела и мястото на групите в него.

Използвайки свойството на натуралния логаритъм, че реалната част на логаритъма от комплексно число е равна на логаритъма от модула на това комплексно число, могат да се подберат подходящите зависимости в при различни конструкции на кабела. Използвайки (10), (11), (12) и замествайки в (9), могат да бъдат получени стойностите за k'_{ij} и k''_{ij} .

Заклучение

Представеният подход за определяне на коефициента на електромагнитна връзка дава точни резултати за всеки две произволно разположени вериги. Той, обаче, е трудно приложим на практика. Това е така, поради голямата сложност на преобразуванията и зависимостта му от много голям брой параметри. В много случаи голяма част от тези параметри не са известни

предварително, а са обект на самия процес на проектиране или оптимизиране. Големият брой на параметрите би затруднил изключително много процеса на оптимизация при търсенето на екстремуми на уравнението на връзката. При снопова конструкция пресмятанията са много трудоемки. За всеки отделен случай, даже при минимални различия в конструкцията е необходимо да се създава нов математически модел на кабела.

От друга страна в процеса на проектиране не е необходимо да се знае точната стойност на коефициента на електромагнитна връзка между кои да са две вериги. Необходимо е да се знае неговата критична стойност за определени групи от проводници (например група, сноп или повив), която определя най-ниските стойности на преходното затихване на близък далечен край и най-високите стойности на капацитетните и магнитните връзки между веригите. Изразите трябва да са подходящи за използване при автоматизирано проектиране и да включват параметри, които лесно могат да бъдат определяни. Такива са всички радиални размери на конструктивните елементи на кабела. Въпреки големия брой параметри, те могат да бъдат измерени, а изчисленията да бъдат автоматизирани посредством създаването на подходящ софтуерен алгоритъм. Направеното до тук е предпоставка за създаването на софтуер за пресмятане на коефициента на електромагнитна връзка между всеки две работни вериги, посредством координатите на проводниците в комплексна равнина. Това може да стане, като се изведат изрази, даващи възможност стойността на $\sum k$ да се изчислява на базата на радиалните компоненти на участващите в кабела елементи

References

- [1]. Гроднев И. И., расчёт оптимальных конструкции симметричных кабелей магистральной связи, Электросвязь, Москва, 1956
- [2]. Шарле Д. Л., Некоторые вопросы конструирования и производство кабелей связи, Электротехническая промышленность, Кабельная техника N:70, Москва, 1970