

ДОСЛІДЖЕННЯ ХВИЛЬОВИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ВИНИКНЕННІ ІМПУЛЬСНОЇ НАПРУГИ В ТРИФАЗНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Щерба А.А., д.т.н., проф., Лободзинський В.Ю., ст. викл.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

Довгаль М.О., магістрант

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

Барановська А.В., студентка

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра біомедичної інженерії

Вступ. Моделювання хвильових процесів в однорідних кабельних лініях (КЛ) може бути виконано аналітичними методами з застосуванням різних математичних перетворень і функцій. У разі неоднорідної лінії, що містить, зокрема, зону з пошкодженою ізоляцією, еквівалентні параметри яких відрізняються від параметрів неушкоджених ділянок лінії, найбільш загальним підходом до аналізу хвильових процесів у таких лініях є чисельне рішення системи хвильових рівнянь методом кінцевих елементів або кінцевих різниць [1-4].

Трифазна кабельна лінія, є трифазною системою з кабелів однофазного виконання. Первинні поздовжні параметри такої лінії (власні і взаємні індуктивності і активні опори) через проникнення електромагнітного поля в провідні середовища (жили, екрани і земля) є частотно-залежними. Тому від частоти будуть залежати і хвильові параметри КЛ: хвильовий опір, швидкість поширення і коефіцієнт загасання.

Мета роботи. Оцінити ступінь загасання хвиль при їх пробігу по кабельній лінії для вирішення завдань обмеження комутаційних перенапруг в типових схемах застосування високовольтних КЛ.

Матеріали і результати досліджень. Розглянемо ступінь загасання хвилі при її руху по кабельній лінії на прикладі процесу поширення в ній прямокутного імпульсу напруги. Такий імпульс може виникнути на одній з фаз КЛ при комутаціях. Якщо комутація відбувається на максимумі робочої напруги, то при відносно невеликій тривалості розглянутих процесів через малу протяжність лінії амплітуда хвилі, протягом всього процесу, можна вважати незмінною. Проаналізуємо поширення імпульсу напруги в симетричній КЛ на прикладі двоканальної системи: α -, 0-каналів. Розрахункова схема наведена на рис. 1.

Рівняння кабельної лінії нескінченної довжини, записані щодо α -, 0-складових, мають вигляд

$$\begin{cases} \frac{d\dot{U}_\alpha(x)}{dx^2} = \gamma_1^2 \dot{U}_\alpha(x), \frac{d^2 \dot{I}_\alpha(x)}{dx^2} = \gamma_1^2 \dot{I}_\alpha(x) \\ \frac{d\dot{U}_0(x)}{dx^2} = \gamma_0^2 \dot{U}_0(x), \frac{d^2 \dot{I}_0(x)}{dx^2} = \gamma_0^2 \dot{I}_0(x) \end{cases} \quad (1)$$

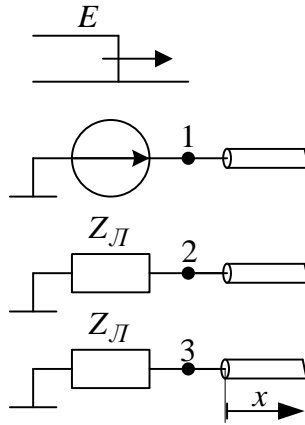


Рисунок 1 – Розрахункова схема при дослідженні процесу поширення імпульсу по кабельній лінії

Рішення рівнянь (1) буде

$$\begin{cases} \dot{U}_\alpha(x) = A_\alpha e^{-\gamma_1 x}, Z_\alpha \dot{I}_\alpha(x) = A_\alpha e^{-\gamma_1 x} \\ \dot{U}_0(x) = A_0 e^{-\gamma_0 x}, Z_0 \dot{I}_0(x) = A_0 e^{-\gamma_0 x} \end{cases}$$

Граничні умови, без урахування взаємного зв'язку між фазами високовольтної лінії, записуються наступним чином

$$\begin{aligned} \dot{U}_1(0) &= \frac{E}{p}; \\ \dot{I}_2(0) &= \frac{-\dot{U}_2(0)}{Z_L}; \\ \dot{I}_3(0) &= \frac{-\dot{U}_3(0)}{Z_L} \end{aligned}$$

або

$$\begin{aligned} A_\alpha + A_0 &= \frac{E}{p}; \\ A_0 - \frac{A_\alpha}{2} &= -Z_L \left(\frac{A_0}{Z_0} - \frac{A_\alpha}{2Z_\alpha} \right). \end{aligned}$$

Тоді,

$$A_\alpha = \frac{E}{p} \left[\frac{1 + Z_L / Z_0}{1,5 + Z_L / Z_\alpha + Z_L / Z_0} \right]; \quad A_0 = \frac{E}{2p} \left[\frac{1 + Z_L / Z_\alpha}{1,5 + Z_L / 2Z_\alpha + Z_L / Z_0} \right].$$

Ці постійні інтегрування так само, як і хвильові опори каналів КЛ, залежать від частоти (хвильовий опір лінії приймаємо частотно-залежним).

Відповідні оригінали $\dot{U}_\alpha(x)$ та $\dot{U}_0(x)$, знаходяться за допомогою частотного методу [5]:

$$u_i(x,t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty R_i(x,\omega) \frac{\sin t\omega}{\omega} d\omega \quad (2)$$

де $R_i(x,\omega) = \text{Re} \left[A_i(j\omega) e^{-\gamma_i(j\omega)x} \right] = |A_i(j\omega)| e^{-\alpha_i(\omega)x} \cos[\arg A_i(j\omega) - B_i(\omega)x]$;
 $\gamma_i(\omega) = -\alpha(\omega_i) + j\beta(\omega_i)$; $i = \alpha, 0$.

Залежності дійсних частин постійних поширення і швидкостей поширення $v_i = \omega / \beta_i(\omega)$ хвиль α - та 0- каналів від частоти показані на рис. 2.

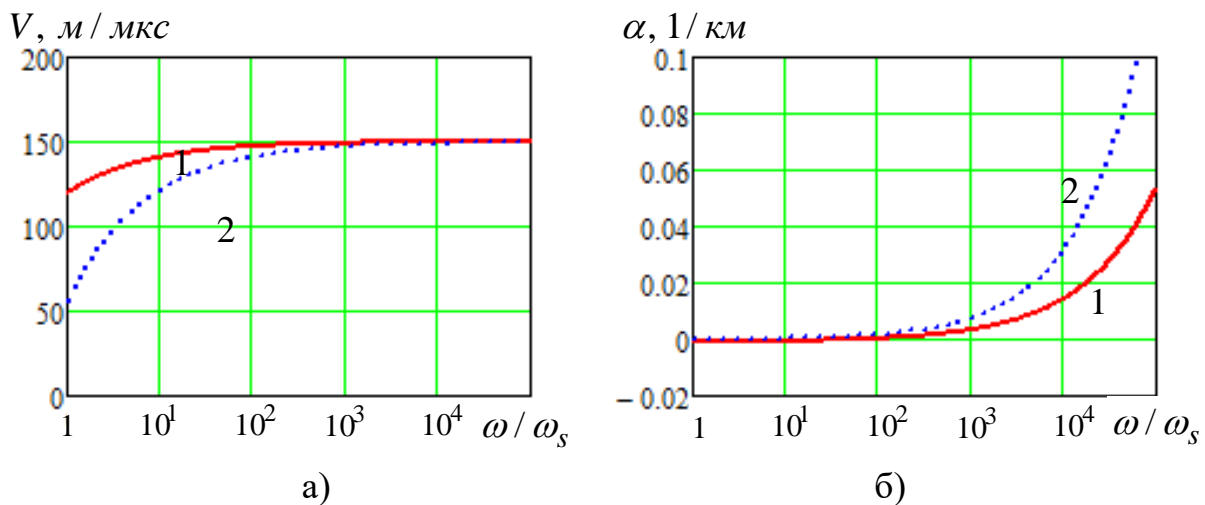


Рисунок 2 – Залежність швидкостей поширення хвиль (а) і коефіцієнтів загасання (б) в α -каналі (1) та 0-каналі (2) лінії 330 кВ трифазного виконання

Обчислення інтеграла (2) проводилося з використанням прикладного пакету MathCAD за допомогою чисельного інтегрування Філона. На рис. 3, показано форми імпульсів напруги на фазах в схемі рис. 1.

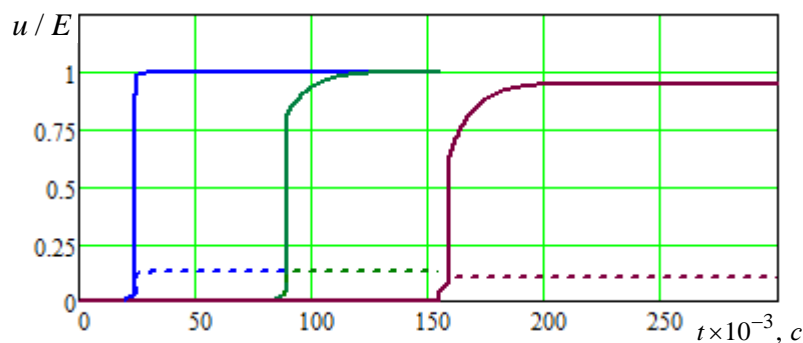


Рисунок 3 – Поширення прямокутного імпульсу по фазах КЛ (суцільні лінії - по фазі 1; пунктирні - по фазах 2 і 3); 1 – $x = 5$ км; 2 – $x = 25$ км; 3 – $x = 50$ км.

Висновок. 1. Проведений аналіз залежності характеристик хвильових каналів від частоти показує, що в першому наближенні дослідження комутаційних перенапруг, що виникають на ізоляції жила-екран, може проводитися без урахування взаємовпливу фаз кабельної лінії. У свою чергу, перенапруги, які виникають на ізоляції екран-земля, повинні аналізуватися з урахуванням взаємного впливу процесів, що відбуваються в фазних колах екран-земля.

2. Дослідження комутаційних перенапруг у розглянутій розрахунковій схемі для всіх типів кабельних ліній можуть без помітної похибки проводитися в однофазній постановці задачі. Це пояснюється відносно слабким взаємним впливом фаз КЛ як однофазного, так і трифазного виконання.

Перелік посилань.

1. Oyegoke, B. and P. Nyvonen, M. Aro, N. Gao, "Application of Dielectric Response Measurement on Power Cable Systems", IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation. Vol.10 No. 5, pp.862-p.873.

2. M.A Shcherba, "Dependences of electric field amplification during water tree branching in solid dielectrics," Proc. of IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IESP), 2014, Kyiv, Ukraine, pp. 46–49.

3. Lobodzinskiy V., Tsyban Y. The investigation of wave process during propagation of plate voltage pulse on three-phase performance cable line //2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). – IEEE, 2017. – С. 448-451.

4. Лободзинський В. Ю., Дуда П.І., Перфілов Б.М., Паканич С.І., Порівняння різних технологій проведення лабораторних робіт: методу натурального експерименту і віртуального лабораторного практикуму // Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики". – 2017. – С. 670-672.

5. Левинштейн М.Л. Операционное исчисление в задачах электротехники. Изд. 2-е, доп. – Ленинград : Энергия, 1972. – 360 с.