

2. Chunyan Ban. Influence of pulse electric current on solidification structure of Al-Si alloy. *Electromagnetic processing of material*. 2017. No. 1. P. 34–39.

3. Зарембо В. Вплив імпульсів струму на процеси плавлення та кристалізації металів. *Металургія машинобудування*. 2015. Т. 3, № 1. С. 11–15.

Abstract. *The work substantiates the use of high-voltage electrical pulse treatment of metals at the stage of crystallization to improve the mechanical properties of cast parts. A pulse current generator has been developed and an RLC model of the discharge circuit has been constructed for the analysis of transient processes, which allows optimizing the pulse parameters. It is shown that controlling the pulse effect contributes to the formation of a fine-grained structure of alloys and improving their operational characteristics.*

Key words: *electrode system, pulse current generator, pulse, ingot macrostructure, crystallization process.*

Науковий керівник:

Вахоніна Л.В.,

канд. фіз. мат. наук, доцент

кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

Миколаївський національний аграрний університет

УДК. 621.3

Аналіз перехідних процесів в електричній мережі 110/35 кВ для розробки мікропроцесорної системи реєстрації

Владислав Котельников,

здобувачі вищої освіти спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Миколаївський національний аграрний університет

м. Миколаїв, Україна

Анотація. *В даній роботі виконано аналіз перенапружень перехідних процесів в електричній мережі. Для цього в роботі розраховано перехідні процеси при підключенні лінії, що не містить нелінійних елементів синусоїдальної напруги, методом побудови статичних характеристик ударного коефіцієнта.*

Ключові слова: *несуїдальний струм, перехідні процеси, електрична мережа, ударний коефіцієнт, відправний вузол, приймальний вузол.*

Вступ. Перехідні процеси в системах електропостачання є невід'ємною складовою режимів роботи електричних мереж високої напруги та виникають як під час нормальної експлуатації, так і при комутаційних операціях чи аварійних збуреннях. У ці періоди відбувається порушення динамічної рівноваги між електромагнітною потужністю в електричній мережі та механічною потужністю

на валу електричних машин, що супроводжується зміною електричних параметрів, коливальними явищами та можливими перенапруженнями.

Особливої актуальності набуває аналіз перехідних процесів у мережах класу напруги 110/35 кВ, оскільки вони є важливою ланкою розподільчих систем електроенергетики та забезпечують живлення промислових і комунальних споживачів. Комутаційні процеси в довгих повітряних лініях електропередач можуть супроводжуватися значними хвильовими явищами та виникненням ударних перенапружень, що впливають на надійність ізоляції обладнання та ефективність роботи систем релейного захисту й автоматики.

У зв'язку з розвитком цифрових підстанцій та впровадженням інтелектуальних систем моніторингу зростає потреба у створенні мікропроцесорних засобів реєстрації та аналізу перехідних процесів. Такі системи дають змогу здійснювати високоточну фіксацію швидкоплинних електромагнітних збурень, оцінювати параметри перенапружень та підвищувати ефективність експлуатації електричних мереж.

Метою роботи є аналіз перехідних процесів у електричній мережі напругою 110/35 кВ з використанням методів хвильової теорії та розробка підходів до створення мікропроцесорної системи реєстрації комутаційних перенапружень.

Результати роботи. Розглянемо підключення ліній, що не містять нелінійних елементів (рис. 3), до джерела синусоїдальної напруги з індуктивністю L_u .

Всі розрахунки проведемо у відносних одиницях, приймаючи ЕРС джерела $E=1$, хвилевий опір $Z_c=1$, частоту джерела $\omega=1$. При цьому час пробігу хвилі по лінії τ рівний $1,05l \cdot 10^{-3}$ рад [1, 2].

При ввімкненні лінії на ЕРС $E \sin(\omega t + \varphi)$ напруга в кінці лінії записується в наступному вигляді:

$$u(l) = A_{ycm} \sin(\omega t + \varphi) + \sum_{k=1}^{\infty} A_k e^{-\delta_k t} \sqrt{\sin^2 \varphi + \left(\frac{\omega}{\omega_k} \cos \varphi\right)^2} \sin(\omega_k t + \varphi_k), \quad (1)$$

причому

$$\operatorname{tg} \varphi_k = \frac{\omega_k}{\omega} \operatorname{tg} \varphi. \quad (2)$$

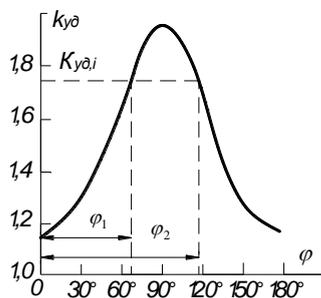


Рис. 1 – Графічне визначення вірогідності заданої величини $k_{y\delta}$

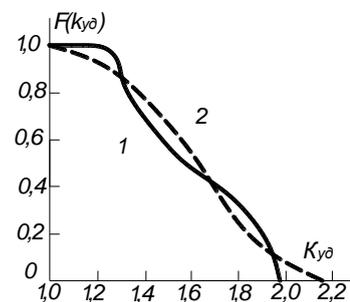


Рис. 2 – Функції розподілу ударного коефіцієнта:
1 – без урахування розкиду фаз; 2 – з урахуванням розкиду фаз.

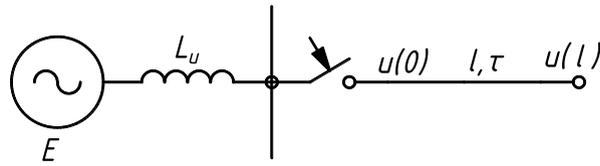


Рис. 3 – Схема електропередачі ($l=500$ км; $L_{u,1}=0,29$; $L_{u,0}=0$; $E=1$)

Частота ω_k власних коливань рівна ($k=1, 2, \dots$ і т. д.). Вона визначається шляхом графічного вирішення рівняння

$$\operatorname{ctg} \omega_k \tau = \frac{T_u}{\tau} \omega_k \tau, \quad (3)$$

де $T_u = L_u / Z_c$.

Амплітуда вимушеної складової (напруги сталого режиму):

$$A_{ycm} = \frac{E x_{ex}}{x_{ex} - x_u} \frac{1}{\cos \omega \tau} = \frac{E Z_c \operatorname{ctg} \omega \tau}{Z_c \operatorname{ctg} \omega \tau - \omega L_u} \frac{1}{\cos \omega \tau}. \quad (4)$$

У свою чергу

$$A_k = E \frac{\omega_k^2}{\omega_k^2 - \omega^2} \frac{2}{\cos \omega_k \tau + \frac{\omega_k \tau}{\sin \omega_k \tau}}. \quad (5)$$

Коефіцієнт загасання δ_k залежить від частоти, але заради спрощення можна узяти його середнє значення, однакове для всіх частот: $\delta_k=0, 1$ 1/рад (близько 30 1/с).

Метод стоячих хвиль досить простий при виконанні розрахунків в однофазній схемі або при одночасному ввімкненні всіх трьох фаз в трифазній лінії, коли в перехідному процесі відсутні складові струму і напруги нульової послідовності. Насправді три фази вимикача замикаються неодноразомно. Після ввімкнення першої фази при запізнюванні двох інших на інших фазах завдяки електромагнітному зв'язку з'являється напруга, тобто друга і третя фази вмикаються за ненульових початкових умов. До замикання останньої фази схема знаходиться в умовах несиметричного режиму, в ній існують струми і напруга нульової послідовності. Після ввімкнення останньої фази ці струми і напруга не можуть зникнути відразу і якийсь час зберігаються в схемі у вигляді затухаючих коливань. Ці особливості процесу приводять до того, що ударний коефіцієнт (або максимальна напруга) в будь-якій з фаз може збільшуватися або зменшуватися. Крива $F(k_{y\partial})$ деформується за рахунок впливу розкиду фаз (крива 2 на рис. 2) [3]. При цьому сам розрахунок перехідного процесу методом стоячих хвиль значно ускладнюється.

Диференціальні рівняння падінь напруги в трифазній довгій лінії записуються у вигляді

$$-\frac{du_A}{dx} = L \frac{di_A}{dt} + M \frac{di_B}{dt} + M \frac{di_C}{dt} + r i_A + r_3 (i_A + i_B + i_C); \quad (6)$$

$$-\frac{du_B}{dx} = M \frac{di_A}{dt} + L \frac{di_B}{dt} + M \frac{di_C}{dt} + r i_B + r_3 (i_A + i_B + i_C); \quad (7)$$

$$-\frac{du_c}{dx} = M \frac{di_A}{dt} + M \frac{di_B}{dt} + L \frac{di_c}{dt} + ri_c + r_3(i_A + i_B + i_c), \quad (8)$$

де L і M – індуктивність і взаємоіндуктивність лінії на одиницю довжини; r – активний опір дроту на одиницю довжини; r_3 – активний опір ланцюгу повернення струму в землі на одиницю довжини.

Прирости струмів у фазах лінії пов'язані з напругами таким чином:

$$-\frac{di_A}{dx} = \beta \frac{du_A}{dt} + \beta_{\epsilon 3} \frac{du_B}{dt} + \beta_{\epsilon 3} \frac{du_C}{dt}; \quad (9)$$

$$-\frac{di_B}{dx} = \beta_{\epsilon 3} \frac{du_A}{dt} + \beta \frac{du_B}{dt} + \beta_{\epsilon 3} \frac{du_C}{dt}; \quad (10)$$

$$-\frac{di_C}{dx} = \beta_{\epsilon 3} \frac{du_A}{dt} + \beta_{\epsilon 3} \frac{du_B}{dt} + \beta \frac{du_C}{dt}; \quad (11)$$

де β і $\beta_{\epsilon 3}$ – власний і взаємний ємнісні коефіцієнти на одиницю довжини лінії.

Відомо, що добротність ліній електропередачі достатньо висока. Тому в якості наближення можна вирішення приведеної системи на основі метода характеристик в наступному вигляді:

на прямих характеристиках

$$(u_A + i_A Z_c) - (u_B + i_B Z_c) = const = V_1; \quad (12)$$

$$(u_A + i_A Z_c) - (u_C + i_C Z_c) = const = V_2; \quad (13)$$

$$\frac{u_A + u_B + u_C}{3} + \frac{i_A + i_B + i_C}{3} Z_{c,0} = const = V_3; \quad (14)$$

на зворотних характеристиках

$$(u_A + i_A Z_c) - (u_B - i_B Z_c) = const = W_1; \quad (15)$$

$$(u_A + i_A Z_c) - (u_C - i_C Z_c) = const = W_2; \quad (16)$$

$$\frac{u_A + u_B + u_C}{3} - \frac{i_A + i_B + i_C}{3} Z_{c,0} = const = W_3; \quad (17)$$

Рівняння прямих характеристик:

$$x - vt = const; \quad (18)$$

$$x - v_0 t = const. \quad (19)$$

Рівняння зворотних характеристик:

$$x + vt = const; \quad (20)$$

$$x + v_0 t = const. \quad (21)$$

У цих співвідношеннях:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L - M}{\beta - \beta_{\epsilon 3}}} \text{ – хвилевий опір лінії по прямій послідовності;}$$

$$Z_{c,0} = \sqrt{\frac{L - 2M}{\beta - 2\beta_{\epsilon 3}}} \text{ – хвилевий опір лінії по нульовій послідовності;}$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{(L - M)(\beta - \beta_{\text{сз}})}} - \text{швидкість розповсюдження електромагнітного по}$$

каналу прямої послідовності;

$$v_0 = \frac{1}{\sqrt{(L - 2M)(\beta - 2\beta_{\text{сз}})}} - \text{швидкість розповсюдження електромагнітного}$$

по каналу нульової послідовності.

Співвідношення (12) – (14) характеризують хвилі, що йдуть в трифазній лінії від початку до кінця; співвідношення (15) – (17) хвилі, що йдуть від кінця лінії до початку [4, 5]. Частина електромагнітного збурення розповсюджується по симетричних каналах [співвідношення (12 - 16)], а частина – по каналу нульової послідовності [співвідношення (14) і (17)].

Константи V_1, V_2, V_3 визначаються в кожен даний момент часу струмами і напругою на початку лінії і відповідно W_1, W_2, W_3 визначаються струмами і напругою в кінці лінії. Використовуючи приведені співвідношення, можна скласти зручні схеми заміщення відправного вузла (початок лінії) і приймального вузла (кінець лінії), які можуть використовуватися для розробки мікропроцесорної системи реєстрації комутаційних характеристик високовольтної апаратури в лініях електропередач.

Висновок. У роботі здійснено теоретичний аналіз перехідних процесів у електричній мережі напругою 110/35 кВ при комутаційному ввімкненні довгої лінії електропередачі. На основі положень хвильової теорії та методу характеристик отримано аналітичні співвідношення, що описують розповсюдження електромагнітних збурень у каналах прямої та нульової послідовностей і дозволяють визначати миттєві значення напруг і струмів у відправному та приймальному вузлах.

Встановлено, що величина ударного коефіцієнта та максимальні значення перенапружень визначаються параметрами лінії, хвильовим опором, індуктивністю джерела живлення та фазовими умовами моменту комутації. Показано, що неодноразовість замикання фаз вимикача зумовлює виникнення несиметричного режиму з появою складових нульової послідовності, що призводить до деформації функції розподілу ударного коефіцієнта та зміни екстремальних значень напруг у фазах.

Отримані результати поглиблюють уявлення про закономірності формування комутаційних перенапружень у мережах високої напруги та можуть бути використані як теоретична основа для синтезу алгоритмів мікропроцесорної системи реєстрації перехідних процесів. Реалізація таких алгоритмів сприятиме підвищенню достовірності моніторингу швидкоплинних електромагнітних явищ і забезпеченню надійності функціонування електричних мереж.

Список використаних джерел:

1. Рожкова Л. Д. Електрообладнання станцій та підстанцій. Енергія, 2015. 450 с.
2. Шафа захисту трансформатора та автоматики управління вимикачем типу ШЕ2607 041015. Посібник з експлуатації. 2014. 365 с.

3. Релейний захист понижувальних трансформаторів та автотрансформаторів 110 – 500 кВ. Енергоатоміздат, 2014. 196 с.
4. Карнеєва Л. Електроустаткування електричних станцій та підстанцій. Акад., 2018. 448 с.
5. Ідельчик В. Електричні системи та мережі: Підручник для вузів. Енергоатоміздат, 2018. 502 с.

Abstract. *In this work, the analysis of overvoltages of transient processes in the electrical network is performed. For this purpose, transient processes are calculated in the work when the line is connected, which does not contain nonlinear elements of sinusoidal voltage, by the method of constructing static characteristics of the shock coefficient.*

Key words: *non-suid current, transient processes, electrical network, shock coefficient, sending node, receiving node.*

Науковий керівник:
Мартиненко В.О.

*канд. техн. наук,
кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки
Миколаївський національний аграрний університет*

УДК 537.86

Відкриті резонансні структури як основа безконтактних методів дослідження матеріалів

Володимир Голубєв

здобувач вищої освіти спеціальності G3 «Електрична інженерія»
Миколаївський національний аграрний університет
м. Миколаїв, Україна

Анотація. *Розглянуто відкриті резонансні структури як електродинамічну основу безконтактних методів дослідження електрофізичних властивостей матеріалів у НВЧ-діапазоні. Проаналізовано вплив геометрії відкритого резонатора та дифракційних ефектів на формування просторової структури електромагнітного поля і добротність резонансної системи. Показано, що оптимізація геометричних параметрів дозволяє створювати локалізовані зони підвищеної напруженості поля та підвищувати чутливість вимірювань. Обґрунтовано доцільність застосування відкритих резонаторів для безконтактного дослідження слабкопровідних, біологічних і неоднорідних матеріалів.*