

УДК 536.24

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРИЧНИХ КОЛИВАНЬ ПРОВОДІВ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Назаренко І. П., д.т.н.

Таврійський державний агротехнологічний університет

Тел. +38(0619) 421-174

**Анотація** – розглянуто умови виникнення поперечних коливань провідників, по яким протікає змінний струм та встановлена залежність амплітуди коливань від співвідношення між частотою власних поперечних коливань і частотою змінного струму.

**Ключові слова** – амплітуда, вібрація проводів, гармоніка, коливання, моделювання, частота.

*Постановка проблеми.* При обтіканні проводів потоком повітря, спрямованим поперек осі лінії або під деяким кутом до осі, з підвітряного боку проводу виникають завихрення. Періодично відбуваються відриви вітру від проводу і утворення вихорів протилежного напрямку.

Відрив вихору в нижній частині викликає появу кругового потоку з підвітряного боку, причому швидкість потоку  $u$  (рис. 1) в точці А стає більше, ніж у точці В. В результаті з'являється вертикальна складова тиску вітру. При збігу частоти утворення вихорів з однієї з частот власних коливань натягнутого дроту, останній починає коливатися у вертикальній площині. При цьому одні точки найбільше відхиляються від положення рівноваги, утворюючи пучність хвилі, а інші залишаються на місці, утворюючи так звані вузли. У вузлах відбуваються тільки кутові переміщення проводу і з'являється вібрація.

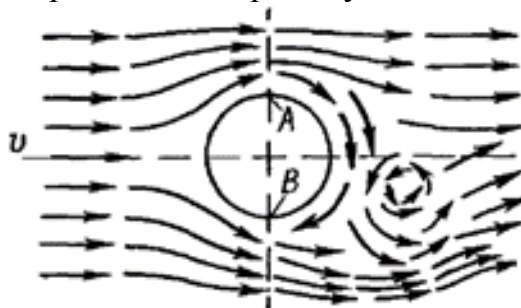


Рис. 1. Утворення вихора за проводом

Вібрація проводів виникає при швидкостях вітру 0,6...0,8 м/с. При збільшенні швидкості вітру збільшуються частота вібрації і число



хвиль в прольоті. При швидкості вітру понад 5...8 м/с амплітуди вібрації настільки малі, що не є небезпечними для проводу.

*Аналіз останніх досліджень.* Досвід експлуатації показує, що вібрація проводів спостерігається найчастіше на лініях, що проходять по відкритій і рівній місцевості. На ділянках ліній в лісовій і пересіченій місцевості тривалість і інтенсивність вібрацій значно менші. Вібрація проводів спостерігається, як правило, в прольотах довжиною більше 120 м і посилюється зі збільшенням прольотів. Особливо небезпечна вібрація на переходах через річки та водні простори з прольотами довжиною понад 500 м.

*Формулювання цілей статті.* Прийнято вважати, що механізм посилення коливань параметричний, тобто при змінах температури провідникового елемента при його русі в середовищі з більш низькою температурою (випадково виникло мале обурення, вітер) відбувається зміна довжини або натягу. Тому ціллю роботи є визначення співвідношень між власною частотою поперечних коливань елемента проводу і частотою зміни його коливальних параметрів при яких може настати посилення поперечних коливань, їх ріст і можливий обрив.

*Основна частина.* Імітаційне комп'ютерне моделювання дозволяє визначити умови, при яких у провідникових елементах ліній електропостачання спостерігається посилення поперечних вібрацій. Моделювання проведемо використовуючи середовище MathCAD.

Розглянемо пружний елемент проводу з власною частотою поперечних коливань  $\omega$ , по якому тече змінний струм, що викликає періодичне тепловиділення з подвоєною частотою, яку позначимо як  $\nu$ . При цьому у елементі проводу будуть спостерігатися періодичні зміни натягу з тією ж частотою  $\nu$ . Тобто виникнуть модуляції натягу  $\sigma(t)$ . При частоті  $\nu$  змін натягу, яка визначається формулою [1,2] :

$$\nu \approx \frac{2}{n} \cdot \omega, \quad (1)$$

де  $n = 1, 2, 3 \dots$

Обрано натуральний ряд, який при наявності навіть дуже малих поперечних збурювань дає посилення коливань впритул до дуже великих амплітуд, які мають назву параметричними [2,3].

Дуже важливим є визначення залежності амплітуди коливань від глибини модуляції натягу, співвідношення між частотами  $\nu$  і  $\omega$ , особливо при модуляціях за релаксаційним законом, що має місце в даному випадку.

Для знаходження цієї залежності складемо рівняння динаміки параметричних коливань.

Прийmemo силу опору прямо пропорційну середній швидкості струни проводу, а пружну силу (натяг), що нелінійно залежить від зміщення елемента проводу від стану рівноваги:

$$F(x) = C_1 \cdot x + C_2 \cdot x^3. \quad (2)$$

Тоді рівняння динаміки для довільної точки струни проводу можна записати у вигляді [2]:

$$x'' + 2 \cdot \mu \cdot x' + (C_1 \cdot x + C_2 \cdot x^3)(1 + kP(t))\omega^2 = 0. \quad (3)$$

У цьому рівнянні функція  $P(t)$  змінювалася по релаксаційному закону (відповідно до змін температури) (рис. 2). При введенні в програму вона замінялася сумою синусоїд різних частот і амплітуд - розкладалася в ряд Фур'є до 21 гармонічної складової.

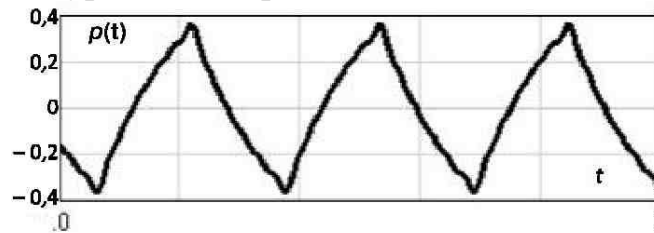


Рис. 2. Графік модуляції натягу

Рівняння (3) вирішувалося вбудованим оператором OdeSolve програми MathCad. В початкових умовах (при  $t = 0$ ) задавалася амплітуда 0,01 умовної одиниці і значення швидкості. При модулюванні параметричних коливань змінювалася частота модуляції  $\nu$  і їх глибина  $k$ . Результатом цього моделювання були отримані залежності росту амплітуди коливань (рис. 3), а також їх сталі значення.

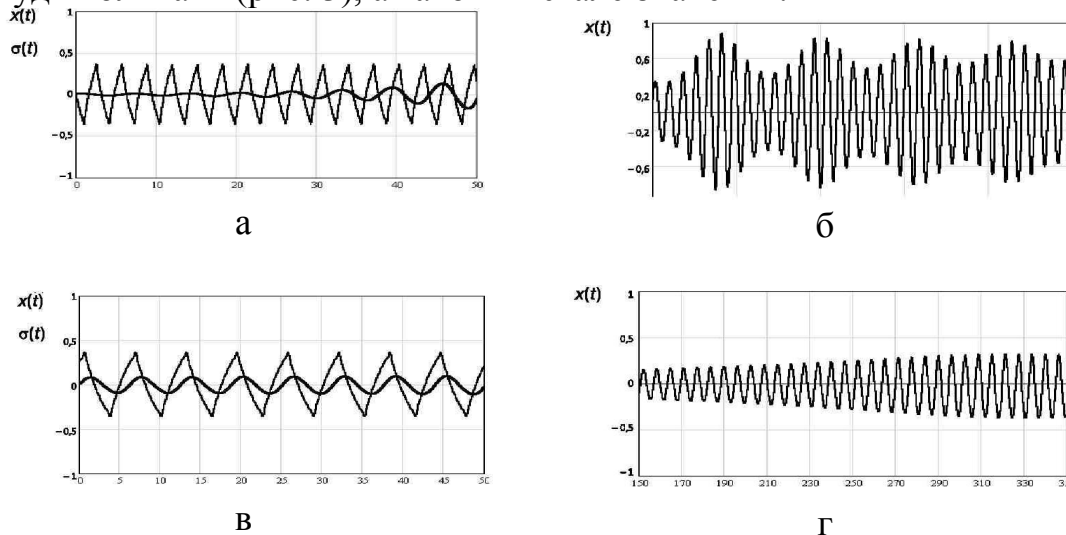


Рис. 3. Ріст амплітуди коливань і часових співвідношень між модулюючими  $\sigma(t)$  і основними  $x(t)$  коливаннями для першого порядку (а, б) і другого порядку (в, г). Час і амплітуда відкладені в умовних одиницях, глибина модуляції  $k = 0,35$

Дані після моделювання оброблялися. Результати чисельних розрахунків сталої амплітуди показані на рисунках 4 і 5.

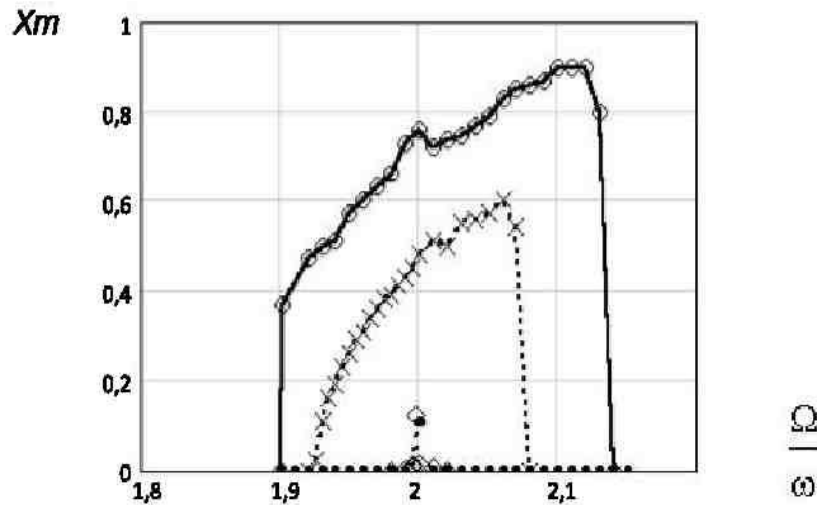


Рис. 4. Залежність амплітуди коливань при першому порядку від співвідношення основної і модулюючої частот і глибини модуляції:  $\circ$  - глибина модуляції - 0,7;  $\times$  - глибина модуляції - 0,35;  $\diamond$  - глибина модуляції - 0,05.

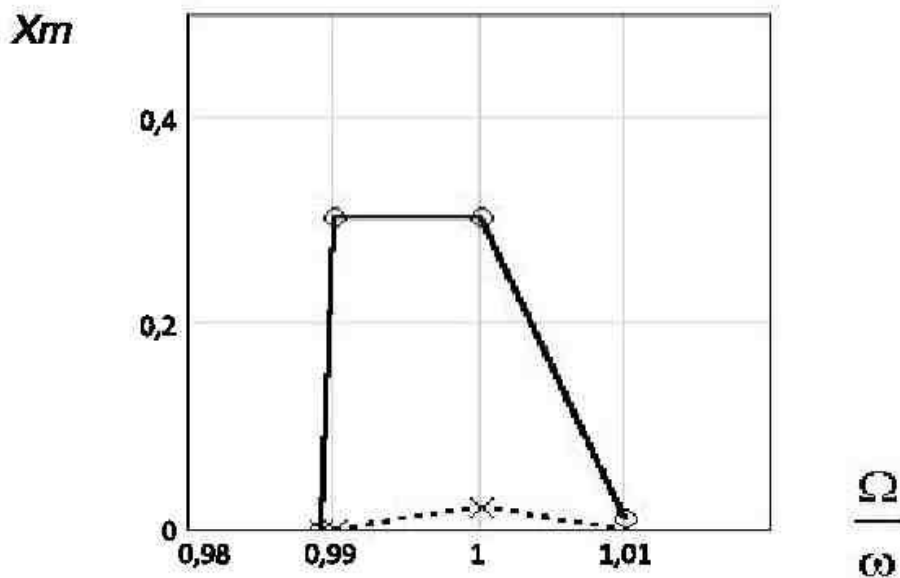


Рис. 5. Залежність амплітуди коливань другого порядку від співвідношення між модулюючим і основною частотами:  $\circ$  - глибина модуляції - 0,7;  $\times$  - глибина модуляції - 0,25.

З рисунка 4 видно, що при коефіцієнті модуляції від 0,05 до 0,1, посилення вібрацій спостерігається за умови  $\nu = 2 \omega$ . Ширина частотної області, де ростуть коливання, мала, зі збільшенням коефіцієнту модуляції зростає і ширина цих частотних областей.

Аналогічна ситуація має місце і для другого порядку, однак поріг параметричного посилення відповідає великим коефіцієнтам модуляції, а частотні області вузьке, ніж для першого порядку (рис. 6). При більш високих порядках ( $n > 2$ ) амплітуди коливань дуже малі.

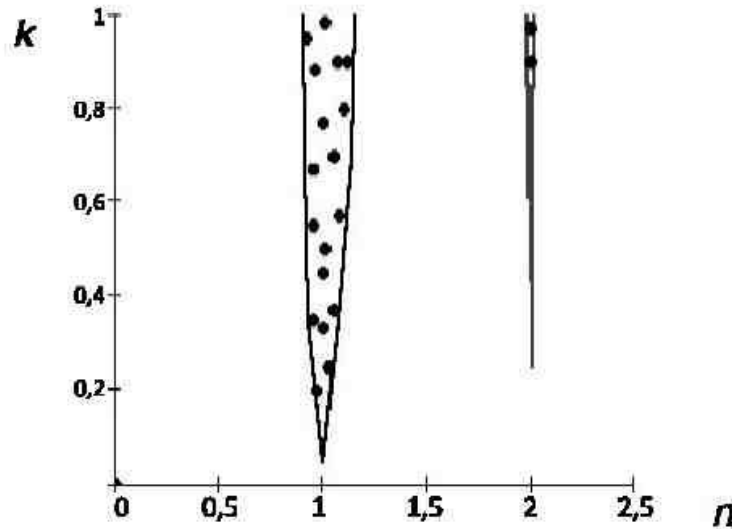


Рис. 6. Співвідношення між власною і модулюючою частотами ( $n$  – порядок резонансу)

Залежність амплітуди коливань від частоти  $\nu$  модуляції для першого порядку можна виразити наближеною формулою:

$$x(\nu) = \frac{0,05 \cdot k \cdot \nu^4}{1 + k^{-5} \cdot (2 \cdot \omega - \nu)^2}. \quad (4)$$

При аналізі результатів отримано часове співвідношення між модулюючими і основними коливаннями, відповідне максимуму амплітуди, воно становить  $115^\circ$  при другому і  $240^\circ$  при першому порядку резонансу.

*Висновок.* Побудовані моделі з використанням бібліотеки стандартних модулів системи Matcad дозволили отримати часове співвідношення між модулюючими і основними коливаннями проводів зі змінним струмом.

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні повітряних ліній електропередачі.

#### Література

1. Горелик Г. С. Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику – 3-е изд. / Г. С. Горелик : под ред. С. М. Рытова. – М. : ФИЗМАЛИТ, 2007. 656 с.
2. Виноградова М. Б. Теория волн / М. Б. Виноградова, О. В. Руденко, А. П. Сухоруков. – М. : Наука. Главная редакция физико - математической литературы, 1979. – 384 с.



3. Коршунова Л. П. Колебания и волны. Механические колебания. Электромагнитные колебания. Механические волны. Пособие по решению задач / Л. П. Коршунова. – М. : Контур – М, 2004, - 112 с.
4. Душин С. Е. Моделирование систем и комплексов / С. Е. Душин, А. В. Красов, Ю. В. Литвинов. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2010. – 177 с.
5. Фриск В. В. Основы теории цепей. Расчеты и моделирование с помощью пакета компьютерной математики Matcad / В. В. Фриск. – М.: СОЛОН-Пресс, 2006. – 88 с.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ПРОВОДОВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

И. П. Назаренко

***Аннотация*** – рассмотрены условия возникновения поперечных колебаний проводников, по которым протекает переменный ток и установлена зависимость амплитуды колебаний от соотношения между частотой собственных поперечных колебаний и частотой переменного тока.

## **THE STUDY OF PARAMETRIC OSCILLATION WIRES OF POWER SUPPLY SYSTEMS**

I. Nazarenko

### ***Summary***

**The conditions of appearance of transverse vibrations of conductors through which an alternating current and the dependence of oscillation amplitude on the ratio between the natural frequency of transverse vibrations and the frequency of the alternating current.**