

## Лабораторна робота №52

### ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОРІДНОЇ СИМЕТРИЧНОЇ ЛАНЦЮГОВОЇ СХЕМИ

#### Мета роботи

Аналіз розподілу напруг і струмів уздовж однорідної довгої лінії в різних режимах навантаження шляхом моделювання лінії ланцюговою схемою.

Визначення параметрів однієї ланки ланцюгової схеми та еквівалентних параметрів усього кола.

Ознайомлення з теоретичними розрахунками напруг, струмів та входних опорів довгої лінії в різних режимах навантаження.

#### Підготовка до роботи

При підготовці до роботи необхідно вивчити рекомендовану літературу, ознайомитися з методичними вказівками, описом лабораторної установки, робочим завданням, скласти протокол звіту та відповісти на наступні питання:

- а) Що таке ланцюгова схема?
- б) Яка ланцюгова схема називається однорідною симетричною?
- в) Для чого використовуються ланцюгові схеми?
- г) Як взаємозв'язані характеристичні опори однорідної симетричної ланцюгової схеми і її окремої ланки, стала передачі всієї схеми і окремої ланки?
- д) За яких умов ланцюгова схема й довга лінія еквівалентні?
- е) Що таке режим узгодженого навантаження ланцюгової схеми (еквівалентної довгої лінії)?
- ж) Якими будуть рівняння ланцюгової схеми й лінії в режимах розімкненого кола, короткого замикання, узгодженого навантаження?
- з) Як змінюються діючі значення напруг і струмів уздовж лінії в режимах розімкненого кола, короткого замикання, узгодженого навантаження?
- і) Що таке входний опір ланцюгової схеми (лінії)?
- й) Як змінюється входний опір лінії в режимах розімкненого кола, короткого замикання, узгодженого навантаження?
- к) Який характер носить входний опір лінії в межах першої чверті довжини хвилі від кінця в режимах розімкненого кола, короткого замикання?

#### Опис лабораторної установки

Лабораторна установка (рис.52.1) складається з комплексу вимірювальних приладів (двох вольтметрів, амперметра, фазометра  $\varphi_1$  й фазопоказчика  $\varphi_2$ ), регульованого джерела змінної напруги (лабораторного автотрансформатора) і ланцюгової схеми з восьми однакових ланок. Кожна ланка ланцюгової схеми є симетричним П-подібним чотирьополіусником. Як навантаження ланцюгової схеми використовується активно-емнісний

двополюсник.

Оскільки градування шкал фазометра й фазопоказчика різні, то для побудови суміщених векторних діаграм струмів і напруг покази цих приладів необхідно звести в єдину систему координат. При суміщенні осі дійсних чисел (+1) комплексної площини з віссю відліку шкали фазопоказчика (напрямок на 0, рис.2, а) початкові фази напруг будуть дорівнювати показам цього приладу, узятим зі знаком “-” (у комплексній площині позитивні кути відраховують від осі (+1) проти напрямку руху годинникової стрілки).

Покази фазометра, шкала якого відповідає внутрішній шкалі рис.52.2,б, перетворюються в кутові координати комплексної площини за допомогою допоміжної шкали, нанесеної на цьому малюнку по колу більшого радіусу.

### Порядок виконання роботи

1. Скласти коло відповідно до схеми, зображеної на рис.52.1. Підключаючи фазопоказчик напруг ( $\varphi_2$ ), затискачі фаз  $A$ ,  $B$  і  $C$  джерела необхідно з'єднати відповідно з клеммами приладу  $A$ ,  $B$  і  $C$  (380 В). Тоді після вмикання приладу в трифазну мережу його стрілка буде обертатися в напрямку, зазначеному на шкалі.

2. Ввімкнути джерело змінної напруги і встановити за допомогою автотрансформатора на вході ланцюгової схеми напругу 80...90 В.

3. Від'єднати першу ланку ланцюгової схеми від решти кола, вийнявши сполучну перекладку із гнізда  $K_2$  комутатора.

4. Ввімкнути вилку вимірювального кола амперметр-фазометр у гніздо  $K_1$  комутатора. Для правильного визначення фази струму й напруги необхідно стежити, щоб при вимірах провідники, що йдуть від затискачів, позначених на приладах  $\varphi_2$  і  $\varphi_1$  зірочками (\*), приєднувалися до клем кола, що має такі ж мітки на схемі рис.52.1.

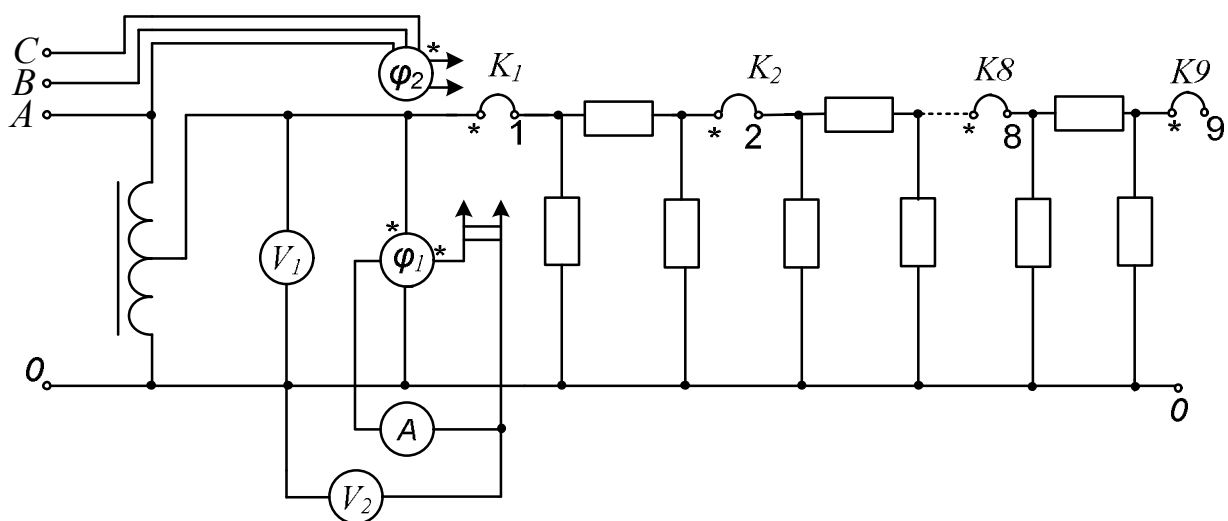


Рис.52.1

5. Виконати досліди розімкненого кола і короткого замикання чотириполюсника однієї ланки ланцюгової схеми. Виміряти напругу, струм і

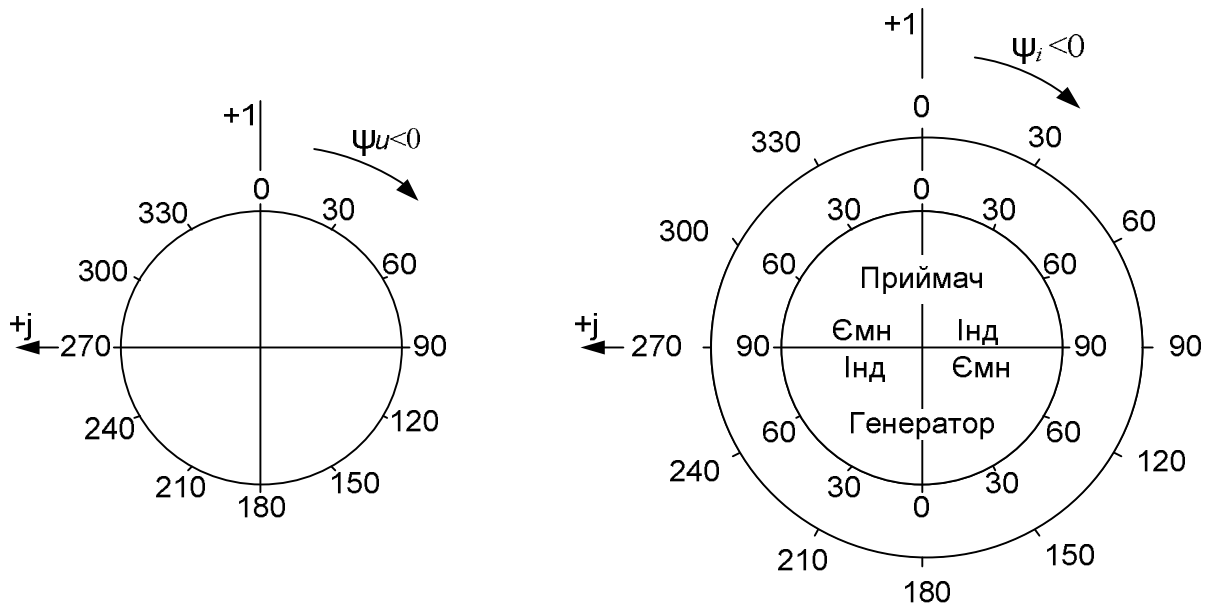
кут зсуву фаз між ними у зазначених режимах. Результати вимірів занести в табл.52.1.

Таблиця 52.1

Дослід	$U, В$	$I, А$	$\varphi, ^\circ$
розімкненого кола			
короткого замикання			

6. Приєднати першу ланку до решти кола у відповідності зі схемою на рис. 52.1. Виміряти напругу, струм і їхні початкові фази для кожної ланки ланцюгової схеми при розімкнених вихідних затискачах 9-0. Початкові фази напруг визначити за показами фазопоказчика ( $\varphi_2$ ) при короткочасному натисканні кнопки на приладі. Початкові фази струмів визначити за показами фазометра ( $\varphi_1$ ).

Покази вольтметра, амперметра, а також перетворені в кутові координати комплексної площини покази фазопоказчика ( $\psi_u$ ) і фазометра ( $\psi_i$ ) занести в табл.52.2.



а) Шкала фазопоказчика

б) Шкала фазометра

Рис. 52.2

7. Виконати аналогічні виміри у разі короткого замикання вихідних затискачів ланцюгової схеми.

Покази приладів занести у відповідні графи табл. 52.2.

8. Між вихідними затискачами ланцюгової схеми ввімкнути навантаження, опір якого дорівнює характеристичному опорі ланки.

Виміряти напруги, струми та їх початкові фази для всіх ланок при узгодженому навантаженні ланцюгової схеми.

Покази приладів занести в табл. 52.2.

### Обробка результатів експерименту

1. За результатами вимірів визначити вхідний опір розімкненого кола  $Z_o$  і короткого замикання  $Z_k$  окремого чотирьополісника ланцюгової схеми, а також його характеристичний опір  $Z_c$ .

2. Обчислити сталу передачі окремої ланки і всієї ланцюгової схеми.

3. Визначити довжину  $l$  лінії, яку моделює досліджувана ланцюгова схема, і коефіцієнт поширення лінії  $\gamma$ , приймаючи, що швидкість хвилі в лінії  $V = 1,5 \cdot 10^5$  км/с.

Таблиця 52.2

Режим	Вузол виміру									
	Вимірювана величина	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Розімкненого кола	$U, B$									
	$I, A$									
	$\Psi_u, ^\circ$									
	$\Psi_i, ^\circ$									
Короткого замикання	$U, B$									
	$I, A$									
	$\Psi_u, ^\circ$									
	$\Psi_i, ^\circ$									
Узгодженого навантаження	$U, B$									
	$I, A$									
	$\Psi_u, ^\circ$									
	$\Psi_i, ^\circ$									

4. На підставі вимірів пп. 6-8 побудувати суміщені векторні діаграми напруг і струмів ланцюгової схеми для кожного дослідженого режиму та полярні графіки розподілу напруг і струмів уздовж лінії, еквівалентної досліджуваній ланцюговій схемі.

5. Побудувати в прямокутній системі координат графіки розподілу

діючих значень напруг і струмів уздовж лінії в режимах розімкненого кола, короткого замикання і узгодженого навантаження.

6. Розрахувати і побудувати графіки зміни модуля вхідного опору лінії від її довжини для розімкненого кола, короткого замикання і узгодженого навантаження лінії. На графіках вказати значення вхідного опору, отримані вимірами у різних точках ланцюгової схеми.

7. Зробити висновки по роботі письмово.

### Методичні вказівки

Ланцюговою схемою, або каскадним сполученням чотириполіусників називають таке з'єднання декількох чотириполіусників, при якому вхідні полюси наступного чотириполіусника підключаються до вихідних полюсів попереднього (рис.52.3). Кожний з чотириполіусників, що входить у ланцюгову схему, називають її ланкою. Якщо ланцюгова схема складається з однакових симетричних чотириполіусників, то її називають однорідною симетричною ланцюговою схемою.

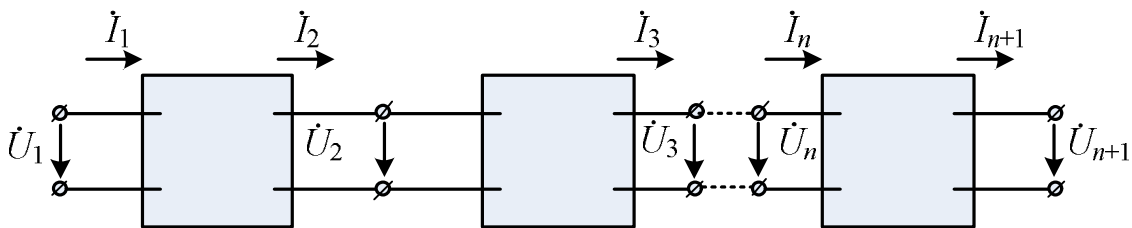


Рис.52.3

Ланцюгові схеми використовують для моделювання ліній зв'язку, ліній електропередач, гірлянд ізоляторів і т.п., досліджуючи розподіл напруг і струмів у названих лініях і пристроях. Точність моделювання буде тим більшою, чим більшу кількість ланок буде містити ланцюгова схема. Як правило, обмежуються 8-12 ланками. Якщо досліджуються співвідношення між струмами й напругами тільки на початку й кінці лінії, то використовується одна ланка.

Основою моделювання лінії ланцюговою схемою є аналогія рівнянь довгої лінії, чотириполіусника й ланцюгової схеми. Нехай лінія довжиною  $l$  характеризується коефіцієнтом поширення  $\underline{\gamma} = \alpha + j\beta$  і хвильовим опором  $\underline{Z}_C$ ; напруга і струм на вході лінії  $\underline{U}_1, \underline{I}_1$ , на виході –  $\underline{U}_2, \underline{I}_2$ . Тоді напругу й струм на вході лінії можна виразити через напругу й струм на виході співвідношеннями:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 \operatorname{ch} \underline{\gamma} l + \underline{I}_2 \underline{Z}_C \operatorname{sh} \underline{\gamma} l; \\ \underline{I}_1 &= \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_C} \operatorname{sh} \underline{\gamma} l + \underline{I}_2 \operatorname{ch} \underline{\gamma} l. \end{aligned} \quad (52.1)$$

Рівняння симетричного чотириполіусника, еквівалентного довгій лінії:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_2 \operatorname{ch} \underline{\Gamma}_e + \dot{I}_2 \underline{Z}_{Ce} \operatorname{sh} \underline{\Gamma}_e; \\ \dot{I}_1 &= \frac{\dot{U}_2}{\underline{Z}_{Ce}} \operatorname{sh} \underline{\Gamma}_e + \dot{I}_2 \operatorname{ch} \underline{\Gamma}_e, \end{aligned} \quad (52.2)$$

де  $\underline{\Gamma}_e$  - стала передачі еквівалентного чотириполюсника,  $\underline{\Gamma}_e = A_e + jB_e$ ;  
 $\underline{Z}_{Ce}$  – характеристичний опір еквівалентного чотириполюсника.

Рівняння однорідної ланцюгової схеми, що моделює лінію і складається з  $n$  ланок:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_{n+1} \operatorname{ch} \underline{\Gamma}_l + \dot{I}_{n+1} \underline{Z}_{Cl} \operatorname{sh} \underline{\Gamma}_l; \\ \dot{I}_1 &= \frac{\dot{U}_{n+1}}{\underline{Z}_{Cl}} \operatorname{sh} \underline{\Gamma}_l + \dot{I}_{n+1} \operatorname{ch} \underline{\Gamma}_l, \end{aligned} \quad (52.3)$$

де  $\underline{\Gamma}_l, \underline{Z}_{Cl}$  – відповідно стала передачі й характеристичний опір ланцюгової схеми;

$\dot{U}_{n+1}, \dot{I}_{n+1}$  – напруга і струм на виході ланцюгової схеми, що відповідає напрузі  $\dot{U}_2$  і струму  $\dot{I}_2$  в рівняннях (52.1) і (52.2).

З теорії ланцюгових схем відомо, що характеристичний опір однорідної симетричної ланцюгової схеми й кожної її ланки однакові. Стала передачі всієї ланцюгової схеми  $\underline{\Gamma}_l = n\underline{\Gamma} = nA + jnB$ , де  $\underline{\Gamma}$ ,  $A$  і  $B$  – відповідно стала передачі, коефіцієнт згасання і коефіцієнт фази однієї ланки.

Порівнюючи системи рівнянь (52.1) – (52.3), бачимо, що у разі однакових напруг і струмів входу й виходу системи рівнянь будуть тотожні і, отже, довга лінія, еквівалентний чотириполюсник і ланцюгова схема будуть еквівалентними між собою, якщо:

- 1) хвильовий (характеристичний) опір лінії, ланцюгової схеми і еквівалентного чотириполюсника між собою однакові:  $\underline{Z}_C = \underline{Z}_{Cl} = \underline{Z}_{Ce}$ ;
- 2) коефіцієнт поширення лінії  $\underline{\gamma}$  пов'язаний зі сталими передачі еквівалентного чотириполюсника  $\underline{\Gamma}_e$  і ланцюгової схеми  $\underline{\Gamma}_l$  залежністю  $\underline{\gamma}l = \underline{\Gamma}_e = \underline{\Gamma}_l$ , що відповідає співвідношенням:

$$\alpha l = A_e = nA, \quad \beta l = B_e = nB. \quad (52.4)$$

Характеристичний опір симетричного чотириполюсника можна визначити з дослідів розімкненого кола і короткого замикання:

$$\underline{Z}_C = \sqrt{\underline{Z}_0 \underline{Z}_k} = Z_C e^{j\theta}.$$

Тут:  $\underline{Z}_0$  – вхідний опір чотириполюсника при розімкнених вихідних полюсах  
 $\underline{Z}_0 = Z_0 e^{j\varphi_0}$ ;

$\underline{Z}_k$  – вхідний опір чотириполюсника при короткозамкнених вихідних полюсах,  $\underline{Z}_k = Z_k e^{j\varphi_k}$ .

Стала передачі симетричного чотириполюсника пов'язана зі вхідними опорами розімкненого кола і короткого замикання залежністю:  $\operatorname{th} \underline{\Gamma} = \sqrt{\underline{Z}_k / \underline{Z}_0}$ .

Беручи до уваги, що  $e^{2\Gamma} = \frac{1 + \text{th}\Gamma}{1 - \text{th}\Gamma} = Me^{j\xi}$ ,

для сталої передачі чотириполюсника матимемо:

$$\underline{\Gamma} = A + jB = \frac{1}{2} \ln M + j \frac{1}{2} \xi.$$

Отже,  $A = \frac{1}{2} \ln M$ ,  $B = \frac{1}{2} \xi$ .

Визначивши сталу фази однієї ланки  $B$  і всієї ланцюгової схеми  $B_n = nB$ , можна обчислити довжину лінії, еквівалентної досліджуваній ланцюговій схемі, якщо відомо фазову швидкість  $V$  хвилі в лінії.

Беручи до уваги, що фазова швидкість хвилі  $V = \omega / \beta$  ( $\omega$  – кутова частота зміни напруги) і враховуючи, що згідно (52.4)  $\beta l = nB$ , для довжини еквівалентної лінії одержуємо:

$$l = VnB / \omega \quad (52.5)$$

**Приклад.** Обчислити довжину  $l$  повітряної лінії, що моделюється ланцюговою схемою, яка складається з 12 однакових ланок. Стала фази однієї ланки для частоти  $f = 50$  Гц:  $B = \frac{\pi}{6}$  рад. Фазову швидкість хвилі в лінії прийняти:  $V = 3 \cdot 10^8$  м/с.

Відповідно до (52.5) для довжини лінії маємо:

$$l = VnB / \omega = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 12\pi}{2\pi \cdot 50 \cdot 6} = 6 \cdot 10^6 \text{ (м)} = 6000 \text{ км.}$$

Коефіцієнти згасання  $\alpha$  й фази  $\beta$  довгої лінії, еквівалентної ланцюговій схемі:

$$\alpha = A_n / l = nA / l, \quad \beta = B_n / l = nB / l.$$

Значення напруги й струму в лінії на відстані  $x$  від кінця визначають за рівняннями:

$$\begin{aligned} \dot{U} &= \dot{U}_2 \text{ch} \underline{\gamma} x + \dot{I}_2 \underline{Z}_C \text{sh} \underline{\gamma} x; \\ \dot{I} &= \frac{\dot{U}_2}{\underline{Z}_C} \text{sh} \underline{\gamma} x + \dot{I}_2 \text{ch} \underline{\gamma} x. \end{aligned} \quad (52.6)$$

Аналогічні рівняння для напруги й струму на вході  $k$ -ї ланки ланцюгової схеми:

$$\begin{aligned} \dot{U} &= \dot{U}_{n+1} \text{ch}(n-k+1)\underline{\Gamma} + \dot{I}_{n+1} \underline{Z}_C \text{sh}(n-k+1)\underline{\Gamma}; \\ \dot{I} &= \frac{\dot{U}_{n+1}}{\underline{Z}_C} \text{sh}(n-k+1)\underline{\Gamma} + \dot{I}_{n+1} \text{ch}(n-k+1)\underline{\Gamma}. \end{aligned} \quad (52.7)$$

Використаємо наведені рівняння для з'ясування розподілу напруг і струмів уздовж лінії та в ланцюговій схемі для різних режимів роботи: розімкненого кола, короткого замикання, узгодженого навантаження.

У режимі розімкненого кола струм на виході лінії і ланцюгової схеми  $I_2 = I_{n+1} = 0$ .

Тоді рівняння (52.6) і (52.7) запишуться так:

а) для лінії

$$\begin{aligned} \dot{U}_0 &= \dot{U}_2 \operatorname{ch} \underline{\gamma} x = \frac{U_2}{2} e^{j\psi_U} (e^{\alpha x + j\beta x} + e^{-\alpha x - j\beta x}); \\ \dot{I}_0 &= \frac{\dot{U}_2}{\underline{Z}_C} \operatorname{sh} \underline{\gamma} x = \frac{U_2}{2Z_C} e^{j(\psi_U - \theta)} (e^{\alpha x + j\beta x} - e^{-\alpha x - j\beta x}); \end{aligned} \quad (52.8)$$

б) для ланцюгової схеми

$$\begin{aligned} \dot{U}_0 &= \dot{U}_{n+1} \operatorname{ch}(n-k+1)\underline{\Gamma} = \frac{U_{n+1}}{2} e^{j\psi_U} (e^{(n-k+1)\underline{\Gamma}} + e^{-(n-k+1)\underline{\Gamma}}); \\ \dot{I}_0 &= \frac{\dot{U}_{n+1}}{\underline{Z}_C} \operatorname{sh}(n-k+1)\underline{\Gamma} = \frac{U_{n+1}}{2Z_C} e^{j(\psi_U - \theta)} (e^{(n-k+1)\underline{\Gamma}} - e^{-(n-k+1)\underline{\Gamma}}). \end{aligned} \quad (52.9)$$

Розподіл струмів і напруг уздовж лінії та у ланцюговій схемі зручно показати в полярних координатах або на комплексній площині. Векторні діаграми і графіки розподілу струмів і напруг зображені на рис.52.4.

Побудову виконуємо в такий спосіб. Відкладаємо на комплексній площині відрізок  $00_1$ , який дорівнює у масштабі  $m_u$  напрузі  $\frac{U_{n+1}}{2}$  (половина напруги на виході ланцюгової схеми). Кут між напрямком  $00_1$  і віссю дійсних чисел (+1) дорівнює початковій фазі вихідної напруги  $\psi_{u_{n+1}}$ . Повернувши вектор  $\overline{00_1}$  у додатному напрямку (тобто проти ходу годинникової стрілки) на кут  $\beta$ , одержимо вектор  $\overline{08'}$ , а у від'ємному напрямку – вектор  $\overline{08''}$ . Довжини векторів  $\overline{08'}$  і  $\overline{08''}$  змінимо у порівнянні з вектором  $\overline{00_1}$  у  $e^{\pm\alpha}$  раз. Кожну наступну пару векторів  $\overline{07'}$  і  $\overline{07''}$ ,  $\overline{06'}$  і  $\overline{06''}$  й т.д. будуємо аналогічно. Складаючи далі вектори  $\overline{08'}$  й  $\overline{08''}$ , одержуємо вектор  $\overline{0C_8}$ , що визначає точку на графіку гіперболічного косинуса від комплексного аргументу, тобто точку на геометричному місці векторів  $\dot{U}_0$ . Виконуючи подібні побудови для інших пар векторів, знаходимо вектори  $\overline{0C_7}, \overline{0C_6}, \dots, \overline{0C_1}$ , що визначають напруги на вході кожної ланки ланцюгової схеми. З'єднуючи точки  $C_9, C_8, C_7, \dots, C_1$  плавною кривою, одержуємо полярний графік зміни напруги в режимі розімкненого кола уздовж еквівалентної довгої лінії.

Побудову векторних діаграм, що показують розподіл величин і фаз струмів уздовж ланцюгової схеми в режимі розімкненого кола, виконаємо для випадку, коли аргумент характеристичного опору ланок ланцюгової схеми  $\theta=0$ . У такому разі досить вибрати відрізок  $\overline{00_1}$ , який дорівнює у масштабі  $m_i$  значенню  $\frac{U_{n+1}}{2Z_C}$ , і побудувати різницю векторів



$$\frac{U_{n+1}}{2Z_C} e^{j\psi_U} e^{(n-k+1)\Gamma} \quad \text{і} \quad \frac{U_{n+1}}{2Z_C} e^{j\psi_U} e^{-(n-k+1)\Gamma} .$$

Струм на виході ланцюгової схеми дорівнює нулю, а вектори  $\overline{0D_8}, \overline{0D_7}, \overline{0D_6}, \dots, \overline{0D_1}$ , визначають струм на вході кожної ланки ланцюгової схеми в режимі розімкненого кола. З'єднуючи точки  $0, D_8, D_7, \dots, D_1$  плавною кривою, одержуємо полярний графік зміни струмів у режимі розімкненого кола для еквівалентної довгої лінії.

У режимі короткого замикання напруга на виході лінії й ланцюгової схеми  $U_2 = U_{n+1} = 0$ . Тоді з рівнянь (52.6) і (52.7) одержуємо:

а) для лінії

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{к.з.}} &= \dot{I}_2 Z_C \operatorname{sh} \underline{\gamma} x = \frac{I_2 Z_C}{2} e^{j(\psi_i + \theta)} (e^{\alpha x + j\beta x} - e^{-\alpha x - j\beta x}); \\ \dot{I}_{\text{к.з.}} &= \dot{I}_2 \operatorname{ch} \underline{\gamma} x = \frac{I_2}{2} e^{j\psi_i} (e^{\alpha x + j\beta x} + e^{-\alpha x - j\beta x}); \end{aligned} \quad (52.10)$$

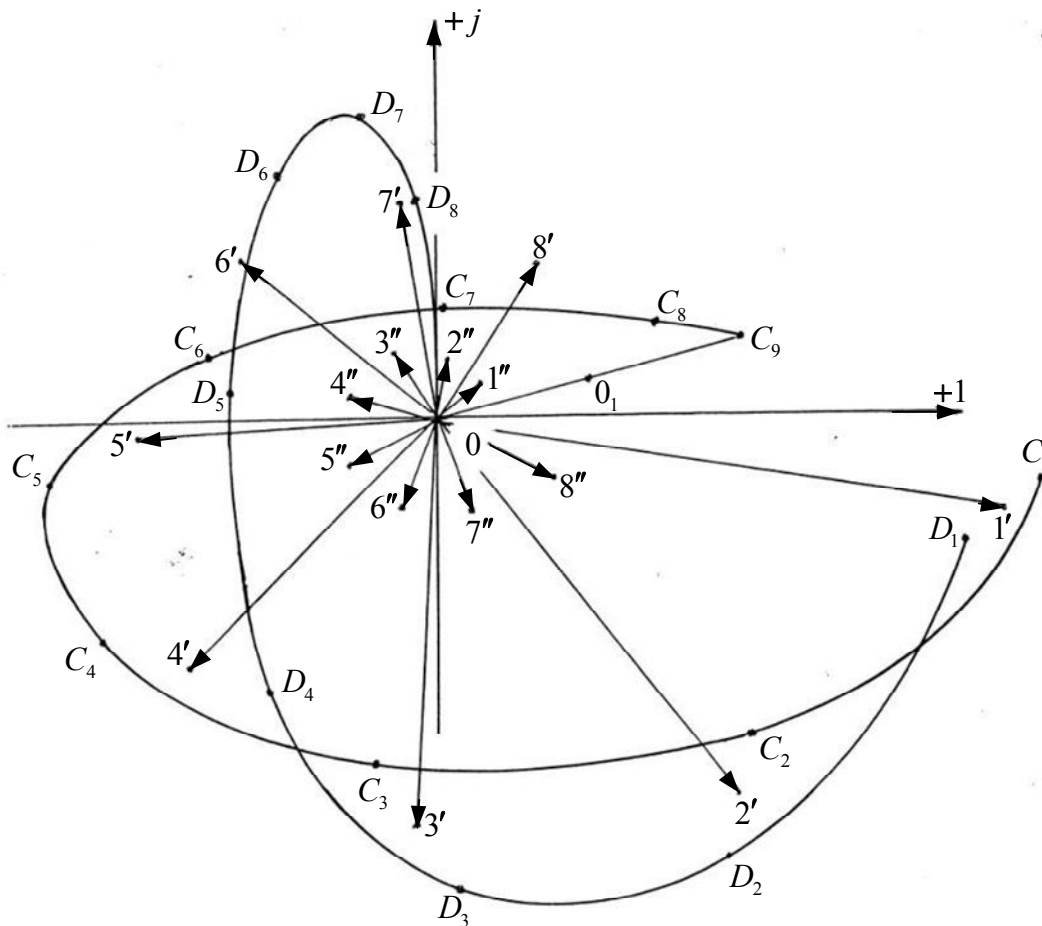


Рис.52.4

б) для ланцюгової схеми

$$\dot{U}_{\text{к.з.}} = \dot{I}_{n+1} \underline{Z}_C \text{sh}(n-k+1)\Gamma = \frac{I_{n+1} Z_C}{2} e^{j(\psi_i+\theta)} (e^{(n-k+1)\Gamma} - e^{-(n-k+1)\Gamma});$$

$$\dot{I}_{\text{к.з.}} = \dot{I}_{n+1} \text{ch}(n-k+1)\Gamma = \frac{I_{n+1}}{2} e^{j\psi_i} (e^{(n-k+1)\Gamma} + e^{-(n-k+1)\Gamma}).$$
(52.11)

З рівнянь (52.10) і (52.11) видно, що в режимі короткого замикання розподіл напруг у лінії й ланцюговій схемі буде визначатися законом гіперболічного синуса, а розподіл струмів – гіперболічного косинуса. Співвідношення (52.8), (52.9) та (52.10), (52.11) показують, що полярний графік зміни напруги  $U_{\text{к.з.}}$  уздовж лінії аналогічний графікові  $I_0$  (крива  $0D_8D_7D_6, \dots, D_1$ ), а графік зміни струму  $I_{\text{к.з.}}$  аналогічний графікові  $U_0$  (крива  $C_9C_8, \dots, C_1$  див. рис. 52.4).

Для режиму узгодженого навантаження лінії  $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 \underline{Z}_C$ ; тоді рівняння лінії (52.6) можна спростити:

$$\dot{U} = \dot{U}_2 e^{\gamma x} = U_2 e^{j\psi_U} e^{ax+j\beta x};$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_2}{\underline{Z}_C} e^{\gamma x} = \frac{U_2}{Z_C} e^{j(\psi_U-\theta)} e^{ax+j\beta x}.$$
(52.12)

Для ланцюгової схеми при узгодженому навантаженні:

$$\dot{U} = \dot{U}_{n+1} e^{(n-k+1)\Gamma} = U_{n+1} e^{j\psi_U} e^{(n-k+1)\Gamma};$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_{n+1}}{\underline{Z}_C} e^{(n-k+1)\Gamma} = \frac{U_{n+1}}{Z_C} e^{j(\psi_U-\theta)} e^{(n-k+1)\Gamma}.$$

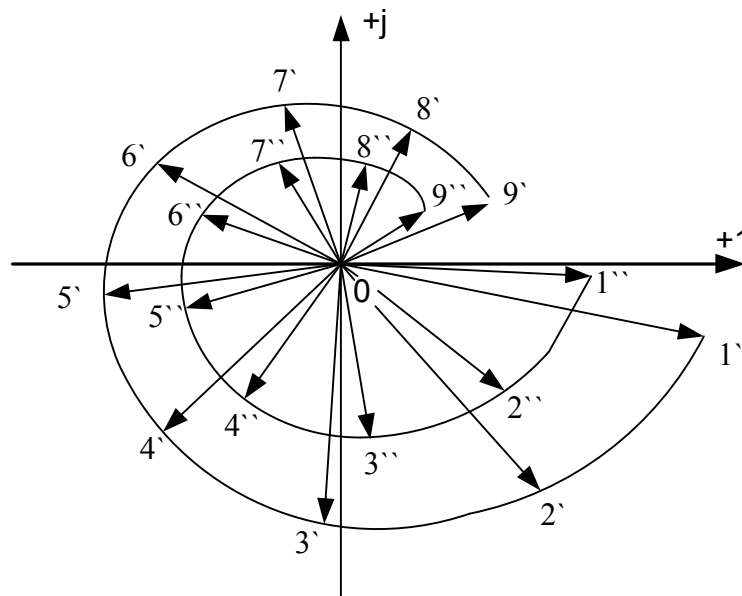


Рис. 52.5

Геометричним місцем кінців векторів, описаних рівняннями (52.12), у полярних координатах є логарифмічна спіраль, що розгортається (крива  $9', 8'7', \dots, 1'$ , див. рис. 52.5). Якщо характеристичний (хвильовий) опір ланцюгової схеми (еквівалентної лінії) чисто активний ( $\theta = 0$ ), то векторні діаграми напруг і струмів ланцюгової схеми (еквівалентної лінії) відповідно до наведених раніше рівнянь для узгодженого навантаження можна подати системою векторів  $\overline{00_1}, \overline{08'}, \dots, \overline{01'}$  (див. рис. 52.4). Відрізок  $00_1$  у відповідних масштабах  $m_u$  і  $m_i$  зображає напругу і струм на виході ланцюгової схеми (еквівалентної лінії), а відрізок  $01'$  – напругу і струм на вході.

Якщо характеристичний опір має реактивну складову ( $\theta \neq 0$ ), то система векторів струмів буде зміщена щодо системи векторів напруг на кут  $\theta$ . Векторні діаграми струмів і напруг ланок ланцюгової схеми, а також полярні графіки розподілу струмів і напруг уздовж еквівалентної довгої лінії при  $\theta < 0$  показані на рис. 52.5. Тут система векторів  $\overline{01'}, \overline{02'}, \dots, \overline{09'}$  зображає векторну діаграму напруг ланок ланцюгової схеми, а система векторів  $\overline{01''}, \overline{02''}, \dots, \overline{09''}$  – векторну діаграму струмів.

Діючі значення напруги і струму в будь-якій точці лінії можна визначити, обчисливши модулі комплексних напруг і струмів у рівняннях (52.8), (52.10) і (52.12). Тоді одержимо:

а) для режиму розімкненого кола лінії

$$\begin{aligned} U_0 &= U_2 F(\alpha, \beta, x), \\ I_0 &= \frac{U_2}{Z_C} L(\alpha, \beta, x), \end{aligned} \quad (52.13)$$

б) для режиму короткого замикання

$$\begin{aligned} U_{к.з.} &= I_2 Z_C L(\alpha, \beta, x), \\ I_{к.з.} &= I_2 F(\alpha, \beta, x); \end{aligned} \quad (52.14)$$

де

$$\begin{aligned} F(\alpha, \beta, x) &= \sqrt{(\operatorname{ch} 2\alpha x + \cos 2\beta x) / 2}; \\ L(\alpha, \beta, x) &= \sqrt{(\operatorname{ch} 2\alpha x - \cos 2\beta x) / 2}; \end{aligned}$$

в) для режиму узгодженого навантаження

$$U = U_2 e^{\alpha x} \quad I = I_2 e^{\alpha x} = \frac{U_2}{Z_C} e^{\alpha x}.$$

На рис. 52.6 показані графіки розподілу діючих значень напруг і струмів уздовж лінії в режимі розімкненого кола, отримані за виразами (52.13).

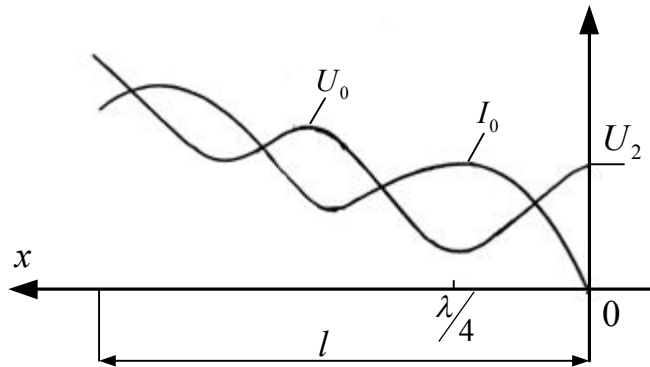


Рис. 52.6

Із графіків видно, що у разі розімкненого кола напруга в міру віддалення від кінця лінії спочатку зменшується, а струм збільшується доти, поки напруга не досягне деякого мінімуму, а струм – максимуму (взагалі мінімум напруги і максимум струму розташовані в різних точках лінії). Після цього напруга почне зростати, а струм спадати, поки напруга не досягне максимуму, а струм мінімуму й т.д. Максимуми й мінімуми напруги (струму) чергуються через інтервали, які приблизно дорівнюють чверті довжини хвилі. Між максимумами (мінімумами) напруги й струму зміщення теж становить приблизно чверть довжини хвилі.

Графіки розподілу напруг і струмів у разі короткого замикання лінії можна побудувати за виразами (52.14).

Вхідний опір для режимів розімкненого кола, короткого замикання, узгодженого навантаження можемо одержати відповідно з рівнянь (52.8), (52.10) і (52.12).

У разі розімкненого кола вхідний опір лінії  $Z_0 = \frac{\dot{U}_0}{\dot{I}_0} = Z_C \operatorname{cth} \gamma x$ .

У разі короткого замикання лінії вхідний опір  $Z_k = \frac{\dot{U}_{\text{к.з.}}}{\dot{I}_{\text{к.з.}}} = Z_C \operatorname{th} \gamma x$ .

У разі узгодженого навантаження вхідний опір лінії дорівнює хвильовому  $Z_{\text{вх}} = Z_C$ .

Модулі вхідних опорів лінії для розімкненого кола і короткого замикання, отримані з рівнянь (52.13) і (52.14):

а) для режиму розімкненого кола  $Z_0 = Z_C \sqrt{\frac{\operatorname{ch} 2\alpha x + \cos 2\beta x}{\operatorname{ch} 2\alpha x - \cos 2\beta x}}$ ;

б) при короткому замиканні лінії  $Z_k = Z_C \sqrt{\frac{\operatorname{ch} 2\alpha x - \cos 2\beta x}{\operatorname{ch} 2\alpha x + \cos 2\beta x}}$ .

Графіки зміни модулів вхідних опорів для режимів розімкненого кола і короткого замикання показані на рис. 52.7.

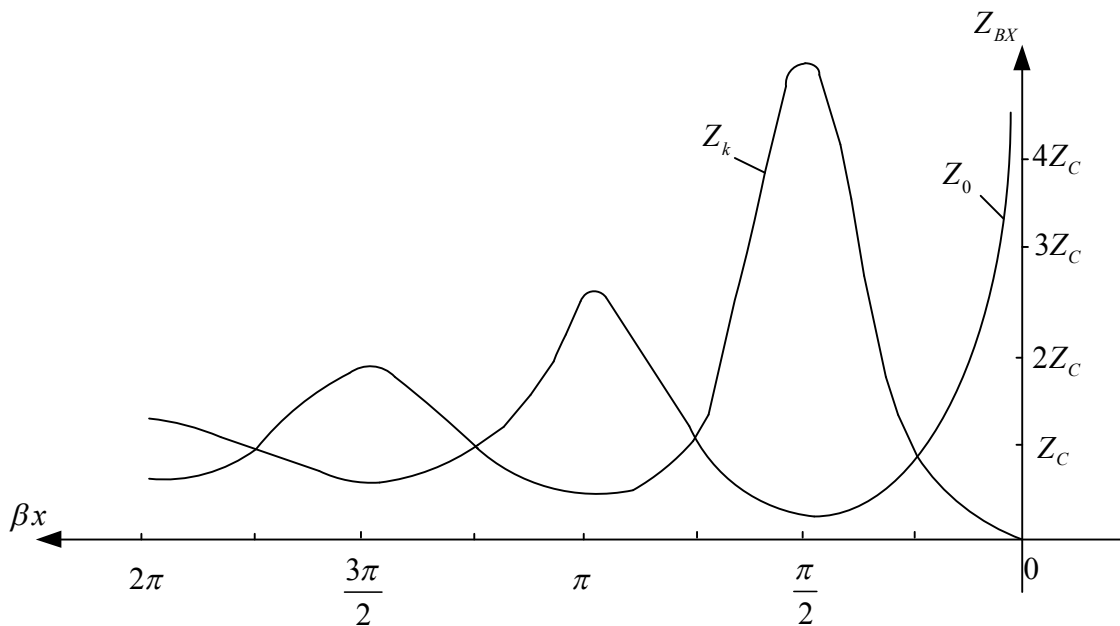


Рис.52.7

З наведених залежностей і графіків для  $Z_0$  й  $Z_k$  видно, що в зазначених режимах вхідний опір лінії при зміні її довжини змінюється хвилеподібно. Функції модулів  $Z_0$  і  $Z_k$  мають екстремуми при  $2\beta x = k\pi$  або при  $x = k \frac{\pi}{2\beta}$ , де  $k = 1, 2, 3$  і т.д.

З векторних діаграм, зображених на рис. 52.4, можна встановити, що на відстані від кінця лінії в межах першої чверті довжини хвилі струм у режимі розімкненого кола за фазою випереджає напругу, тобто вхідний опір лінії носить ємнісний характер. Далі струм відстає за фазою від напруги, тобто характер вхідного опору змінюється на індуктивний і ці інтервали зміни характеру вхідного опору з наближенням до початку лінії періодично чергуються.

### Питання для самостійної роботи

1. Вважаючи відомим вимірне значення напруги або струму на виході ланцюгової схеми, побудуйте відповідно до аналітичних виразів (див. методичні вказівки) полярні графіки й векторні діаграми напруг і струмів ланцюгової схеми і еквівалентної лінії для одного з досліджених режимів.

Порівняйте отримані за аналітичними виразами графіки та діаграми з побудованими в п.4 за результатами вимірів.

2. Як зміняться графіки розподілу діючих значень напруг і струмів уздовж лінії в режимах розімкненого кола, короткого замикання і узгодженого навантаження, якщо коефіцієнт згасання лінії дорівнює нулю?

3. Дослідіть вплив зміни частоти напруги джерела на характеристичний опір, сталі згасання й фази довгої лінії і моделюючої ланцюгової схеми.

## Література

1. Теоретичні основи електротехніки. Підручник: у 3-х томах. Т.3/ В.С.Бойко, В.В.Бойко, Ю.Ф.Видолоб та ін. – К.: НТУУ «КПІ», 2013.[с. 14-15, 23-26].
2. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. – М.: Энергия, 1975. [с.451-454, 533-538].