

**Міністерство освіти і науки України**

Вінницький державний технічний університет

В.Г.Мадьяров, Г.І.Бондаренко

**Теоретичні основи електротехніки  
Лабораторний практикум  
Частина III**

Затверджено Ученою радою Вінницького державного технічного університету як лабораторний практикум для студентів електротехнічних спеціальностей. Протокол № 5 від 27 грудня 2001 року.

Вінниця ВДТУ 2003

УДК 621.3  
М 13

Рецензенти:

*В.П.Кожеляко*, доктор технічних наук, професор  
*П.Д.Лежнюк*, доктор технічних наук, професор  
*Л.Р.Пауткіна*, кандидат технічних наук, доцент

Рекомендовано до видання Ученою радою Вінницького державного технічного університету Міністерства освіти і науки України

**Мадьяров В.Г., Бондаренко Г.І.**

М 13 **Теоретичні основи електротехніки.** Лабораторний практикум. Частина III. Навч. посібник. – Вінниця: ВДТУ, 2003.- 78 с.

В посібнику розглянуті стаціонарні електростатичне та магнітні поля та поле в провідному середовищі. Методичні вказівки для практичного закріплення шляхом проведення лабораторних робіт з відповідних розділів відносяться до третьої частини курсу теоретичних основ електротехніки.

Розрахований на студентів електротехнічних спеціальностей всіх форм навчання.

УДК 621.3  
© В.Мадьяров, Г.Бондаренко, 2003

## Зміст

Лабораторна робота № 16. Перехідні процеси в лінійних електричних колах.....	4
Лабораторна робота № 16-А. Перехідні процеси в колах $r-L$ та $r-C$ .....	10
Лабораторна робота № 16-Б. Перехідні процеси в послідовному колі $r-L-C$ .....	14
Лабораторна робота № 17. Нелінійні кола постійного струму .....	15
Лабораторна робота № 17-А. Розгалужене нелінійне коло постійного струму .....	21
Лабораторна робота № 17-Б. Параметричний стабілізатор постійної напруги .....	23
Лабораторна робота № 18. Дослідження котушки з феромагнітним сердечником .....	27
Лабораторна робота № 19. Ферорезонанс напруг .....	34
Лабораторна робота № 20. Однофазний трансформатор з феромагнітним сердечником .....	40
Лабораторна робота № 22. Дослідження однорідної довгої лінії .....	46
Лабораторна робота № 23. Дослідження магнітного поля циліндричної котушки без магнітопроводу .....	55
Лабораторна робота № 24. Дослідження переломлення силових ліній стаціонарного електричного поля на границі розділу двох середовищ .....	61
Лабораторна робота № 25. Моделювання електричного поля двопровідної лінії на електропровідному папері.....	66
Лабораторна робота № 26. Дослідження електричного поля кульового заземлювача .....	72
Лабораторна робота № 27. Визначення коефіцієнтів електростатичної індукції та часткових ємностей трифазного кабелю.....	75

## Лабораторна робота № 16

### Перехідні процеси в лінійних електричних колах

**Мета роботи** – дослідити перехідні процеси в нерозгалужених колах першого та другого порядків.

#### Теоретичні положення

Процес переходу електричного кола від одного сталого режиму до другого, який характеризується новим енергетичним станом, називається перехідним.

Зміну режиму роботи кола, що веде до зміни її енергетичного стану, називають комутацією. До комутації відносяться: вмикання, вимикання, замикання на ділянках кола і т.п. Прийнято вважати, що комутація проходить миттєво. В загальному випадку процеси переходу від одного енергетичного стану кола до другого не можуть проходити миттєво, тому що неможливі миттєві зміни енергії, що є в реактивних елементах кола.

При розгляді перехідних процесів, відлік часу ( $t = 0$ ) ведеться з моменту комутації.

Енергія магнітного поля котушки з індуктивністю  $L$  та електричного поля конденсатора з ємністю  $C$  визначається співвідношеннями:

$$W_M = \frac{Li_L^2}{2}; \quad W_C = \frac{Cu_C^2}{2} \quad (16.1)$$

Оскільки неможливі миттєві зміни енергії  $W_M$  і  $W_C$ , неможливі стрибки струму в індуктивності і напруги на ємності.

Ці положення визначають закони комутації, котрі записуються так:

$$i_L(0_-) = i_L(0_+); \quad u_C(0_-) = u_C(0_+); \quad (16.2)$$

де  $i_L(0_-)$ ,  $u_C(0_-)$  – струм в індуктивності і напруга на ємності в момент  $t < 0$  ( $t = 0_-$ ) до комутації;

$i_L(0_+)$ ,  $u_C(0_+)$  – ті ж величини в момент безпосередньо після комутації.

Аналітичні залежності струмів та напруг на різних ділянках кола під час перехідних процесів можна отримати, якщо розв'язати складені за законами Кірхгофа диференціальні рівняння для часу  $t \geq 0$ .

Розглянемо аналітично перехідні процеси, які експериментально визначаються в даній лабораторній роботі.

### Перехідний процес в колі $r - c$ (рис. 16.1)

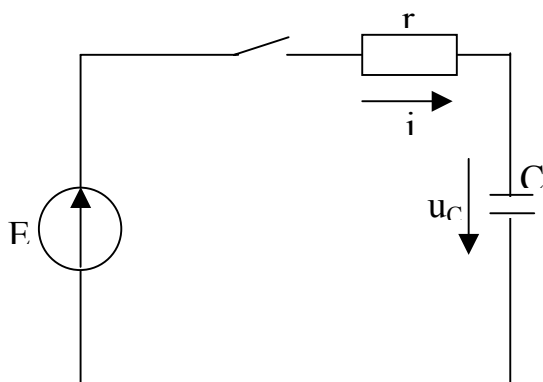


Рисунок 16.1

Запишемо для кола  $r - c$ , що вмикається до постійної ЕРС  $-E$ , рівняння за другим законом Кірхгофа для  $t \geq 0$ ;

$$ir + u_c = E;$$

Враховуючи, що  $i = C \frac{du_c}{dt}$ , отримаємо

$$rC \frac{du_c}{dt} + u_c = E \quad (16.4.)$$

Розв'язання цього диференціального рівняння першого порядку складається з двох частин:

$$u_c = u_{Cnp} + u_{Cв} \quad (16.5)$$

де -  $u_{Cnp}$  – примусова складова напруги;

$u_{Cв}$  – вільна складова;

Примусова складова визначається як напруга на ємності після закінчення перехідного процесу. В даному випадку ємність буде заряджатись до тих пір, поки напруга на ній не стане рівною  $E$ , тобто  $u_{Cnp} = E$

Вільна складова

$$u_{Cв} = Ae^{pt} \quad (16.6.)$$

де  $p$  – корінь характеристичного рівняння:

$$rcp + 1 = 0;$$

звідки  $p = -1/rC$

$A$  – стала інтегрування, яка визначається з початкових умов.

Підставляючи знайдені величини  $u_c = E$  та  $p = -1/rC$  в рівняння (16.5) отримаємо:

$$u_c = E + Ae^{pt} \quad (16.7.)$$

Вважаючи, що ємність в момент комутації ( $t = 0$ ) не була заряджена, тобто  $u_c(0) = 0$ , отримаємо

$$u_c(0) = 0 = E + A \quad (16.8)$$

звідки  $A = -E$ . Остаточно напруга на ємності як функція часу має вигляд

$$u_C(t) = E - Ee^{-\frac{t}{rC}} = E(1 - e^{-\frac{t}{rC}}) \quad (16.9)$$

Позначимо  $rC = \tau$ , де  $\tau$  - стала часу.

Тоді 
$$u_C = E - Ee^{-t/\tau} \quad (16.10)$$

Графічно ця залежність зображена на рис. 16.2

З отриманого розв'язку та графіка на рис. 16.2 видно, що напруга на ємності поступово зростає до  $E$  і тим швидше, чим менша  $\tau$ . Стала часу графічно може бути визначена як довжина піддотичної (з урахуванням масштабу часу). Струм в колі  $r - c$  при заряді конденсатора

$$i = C \frac{du_C}{dt} = \frac{E}{r} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (16.11)$$

Графік струму показаний на рис. 16.3. З нього видно, що в момент комутації струм стрибком змінюється від нуля до величини  $E / r$ , а потім зменшується за експоненціальним законом.

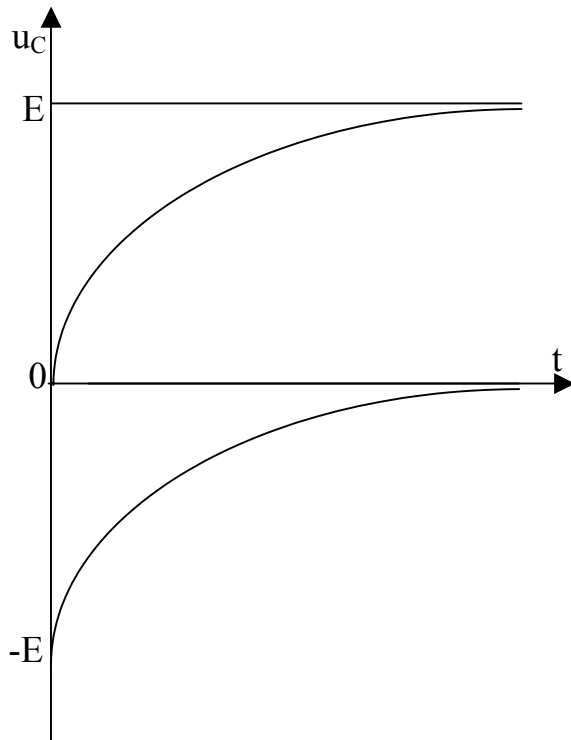


Рисунок 16.2

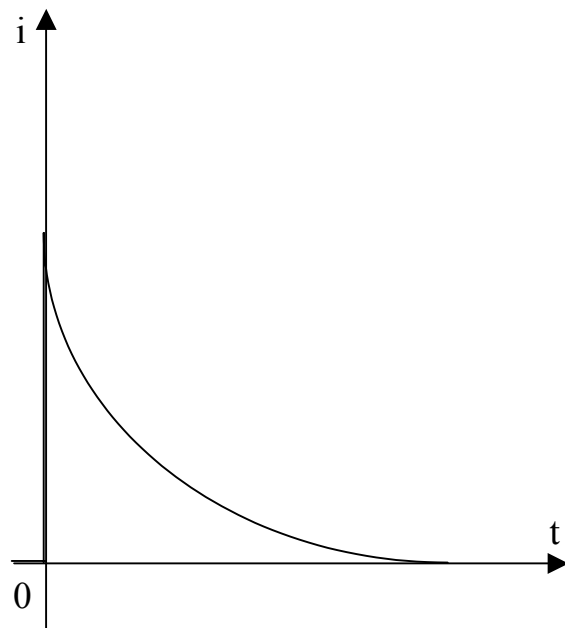


Рисунок. 16.3

При розрядженні через опір  $r$ , попередньо зарядженого до напруги  $E$  конденсатора (рис.16.4.) в рівнянні 16.4. права частина дорівнює нулю, тому  $u_{Cnp} = 0$  і розв'язок має вигляд  $u_C = E - Ee^{-t/\tau}$  (16.12)

Графік зміни  $u_C$  для цього випадку показаний на рис. 16.5. Струм змінюється так само, як і в випадку зарядження ємності.

При вмиканні кола  $r - L$  на постійну напругу графік струму  $i(t)$  має такий самий вигляд, як  $u_C(t)$  в колі  $r-C$ , а графік  $u_L(t)$  – як  $i(t)$  в колі  $r-C$ .

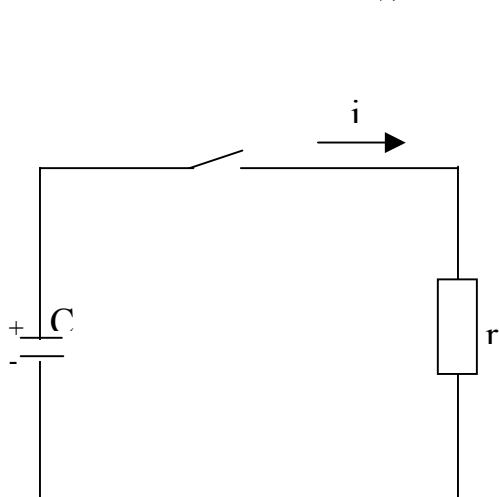


Рисунок 16.4

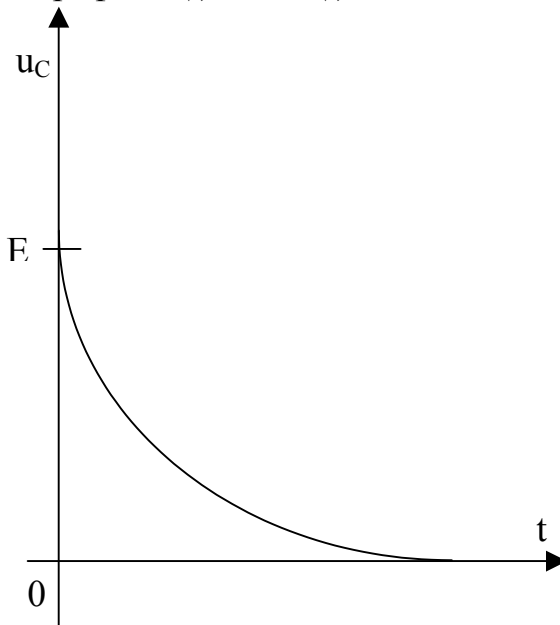


Рисунок 16.5

### Перехідний процес в колі $r - L - C$

В відповідності з другим законом Кірхгофа рівняння для кола буде

$$ir + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt + u_C(0) = E. \quad (16.13)$$

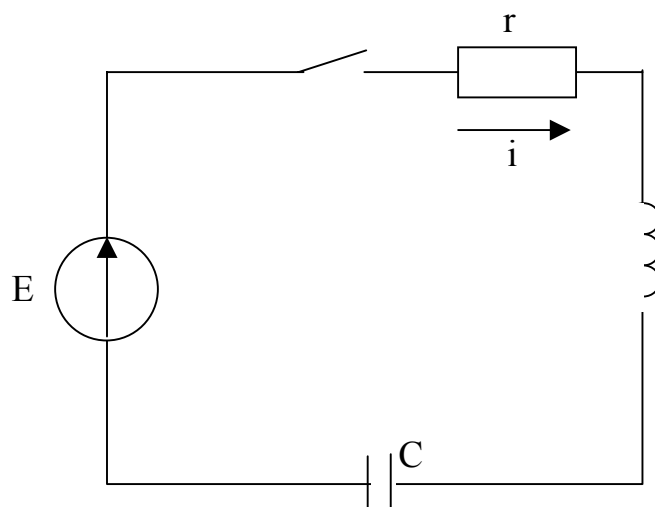


Рисунок 16.6

Після диференціювання отримаємо рівняння другого порядку:

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} i = 0 \quad (16.14)$$

Характеристичне рівняння

$$p^2 + \frac{r}{L} p + \frac{1}{LC} = 0 \quad (16.15)$$

має корені

$$p_{1,2} = -\frac{r}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{r}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad (16.16)$$

В залежності від співвідношення складових під знаком радикала будемо мати три види коренів

- 1)  $\left(\frac{r}{2L}\right)^2 > \frac{1}{LC}$  – корені дійсні різні;
- 2)  $\left(\frac{r}{2L}\right)^2 < \frac{1}{LC}$  – корені комплексні;
- 3)  $\left(\frac{r}{2L}\right)^2 = \frac{1}{LC}$  – корені дійсні рівні;

В першому випадку процес в колі  $r$ - $L$ - $C$  буде аперіодичним, (неколивальним). Вираз для струму в колі має вигляд

$$i = i_e = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} \quad (16.17)$$

Графіки струму  $i$ , напруги на ємності  $u_c$  та індуктивності  $u_L$  показані на рис. 16.7. В другому випадку корені характеристичного рівняння

$$p_1 = -\tilde{a} + j\tilde{u}; \quad p_2 = -\tilde{a} - j\tilde{u}$$

тобто, процес в колі є періодичним (коливальним). Рівняння струму має вигляд

$$i = I_m e^{-\tilde{a}t} \sin \tilde{u}t,$$

де  $\tilde{a} = \frac{r}{2L}$ ;  $\tilde{u} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{r}{2L}\right)^2}$ .

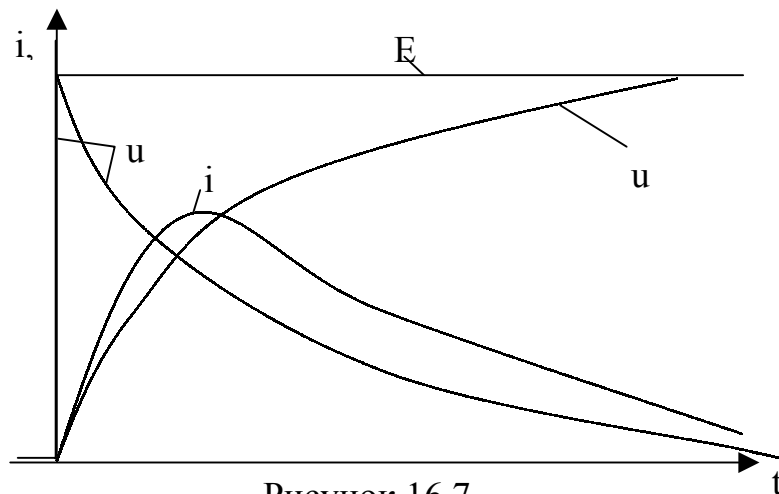


Рисунок 16.7

З рівняння та графіків (рис. 16.8.) випливає, що струм  $i$ , а також напруги  $u_c$  і  $u_L$ , змінюються за законом затухаючої синусоїди.

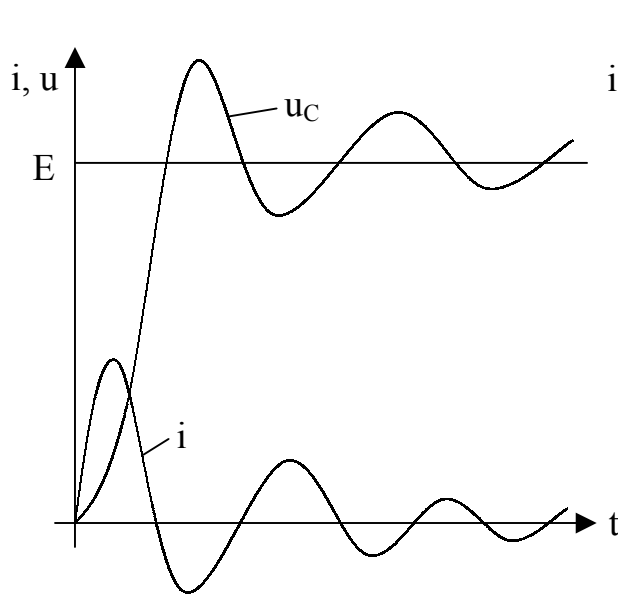


Рисунок 16.8

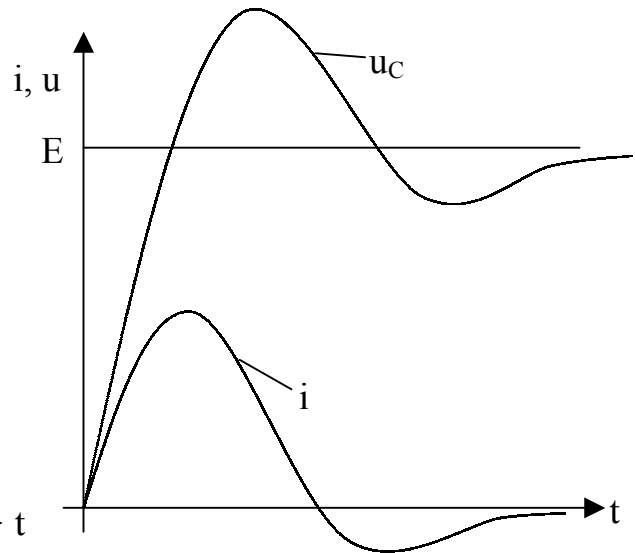


Рисунок 16.9

Якщо корені однакові, тобто  $(\frac{r}{2L})^2 = \frac{1}{LC}$ , то перехідний процес є критичним (рис. 16.9). Він перехідний між аперіодичним та коливальним процесами. Опір  $r_{кр}$  в цьому режимі називається критичним.

В лабораторній роботі для отримання різних за характером перехідних процесів змінюють  $r$ , що здійснити найпростіше.

## Лабораторна робота 16-А

### Перехідні процеси в колах $r-L$ та $r-C$

**Мета роботи** – дослідити характер перехідних процесів в колах  $r-L$  та  $r-C$ , встановити залежність перехідних процесів від параметрів кола.

### Підготовка до роботи

1). Для того, щоб мати можливість спостерігати перехідний процес за допомогою осцилографа, перехідний процес повинен періодично повторюватись. Здійснити це можна різними способами. В даній лабораторній роботі періодичне повторення перехідного процесу здійснюється за допомогою керованого транзисторного ключа, який інакше називають генератором прямокутних імпульсів (ГПІ).

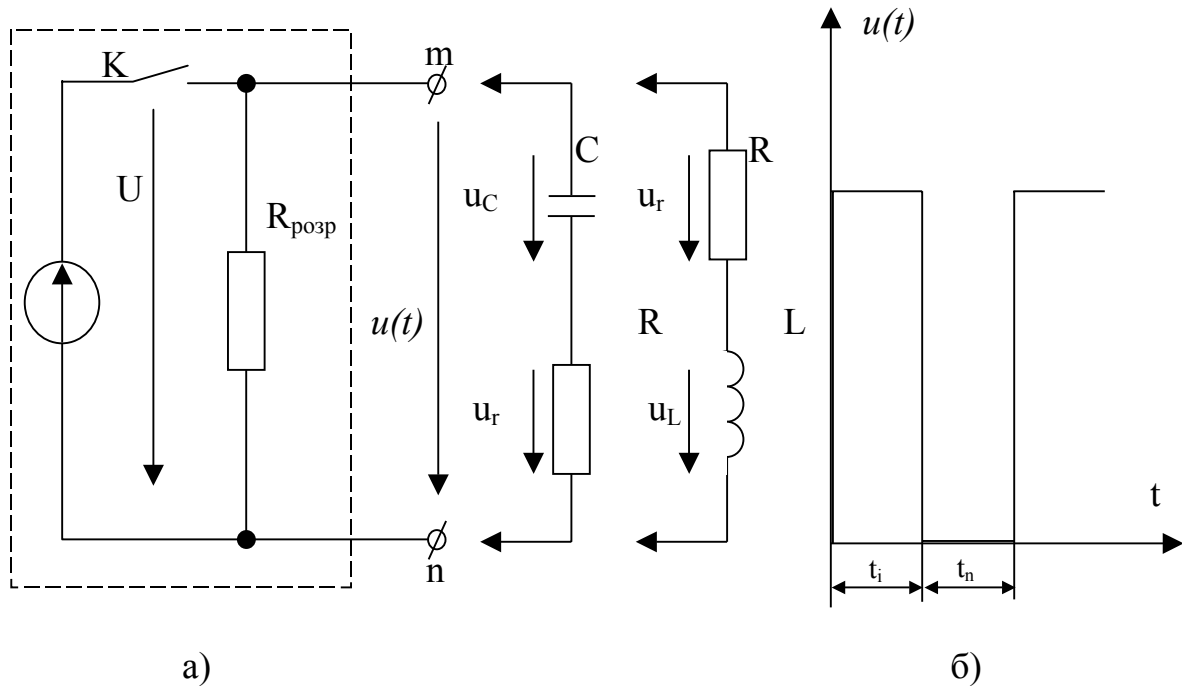


Рисунок 16-А.1

Принцип дії ГПІ пояснюється на рис. 16-А.1 а, ключ “К” в ГПІ періодично замикається. В момент замикання ключа “К” на вихідних клеммах  $m-n$  генератора з’являється напруга  $u = U$ . Це відповідає моменту ( $t=0$ ) на рис. 16-А.1.б. Ця напруга не змінюється доти, поки ключ “К” замкнений, що відповідає проміжку часу  $t_i$  на рис. 16-А.1.б. Якщо до клем приєднати коло  $r-C$ , то протягом цього часу конденсатор  $C$  буде заряджатись через опір  $r$ . Після розмикання ключа “К” джерело напруги ГПІ від’єднується від клем  $m-n$ . В цьому стані джерело знаходиться протягом часу  $t_n$  (рис. 16-

А.1.б); в цей час конденсатор  $C$  розряджується через опір  $(r + r_{розр})$ . Потім ключ знову замикається і процес повторюється.

Якщо приєднати до конденсатора осцилограф, то можна спостерігати зміну напруги  $u_C$  в часі.

Якщо приєднати осцилограф до опору  $r$ , то на екрані побачимо графік залежності напруги  $u_r$ , пропорційної (!) струму  $i$ ;

$$u_r \sim i_r.$$

Якщо приєднати до клем m-n коло  $r-L$ , то можна спостерігати перехідний процес в цьому колі.

В лабораторній роботі перехідні процеси в колах  $r-C$  та  $r-L$  досліджуються при трьох значеннях опорів  $r$ :  $r_1, r_2, r_3$ .

2). В таблиці 16-А.1 наведені значення  $r$  ( $r_{1,2,3}$ ),  $L$ ,  $C$  для кожної бригади. Також наведені значення напруги  $U$  на виході ГПІ і частота перемикування ключа .

$$r_{зар} = 510 \text{ (Ом)} \text{ для всіх бригад.}$$

Таблиця 16-А.1

Номер бригади	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$r_1$ , кОм	0,43	0,3	0,56	0,2	0,43	0,24	0,16	0,47	0,36	0,3
$r_2$ , кОм	2,4	2,49	2,2	2,19	2,49	2,49	2,49	2,49	2,2	2,4
$r_3$ , кОм	3,3	4,7	3,9	5,6	2,7	8,2	5,1	5,1	5,6	7,5
$L$ , мГн	32	30	23	24	26	22	29	34	24	25
$C$ , нФ	15	15	15	15	15	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
$f$ , Гц	800	820	814	900	890	840	840	950	920	850
$U$ , В	7,05	7,15	6,65	6,6	7,2	7,2	6,65	7,05	6,45	6,9

3). За даною частотою визначити період перемикування.

Визначити інтервали  $t_i$  і  $t_n$  (приймаємо  $t_i = t_n$ )

4). Розрахувати і побудувати на одному графіку залежність напруги  $u_C$  і струму  $i$  в перехідному процесі від часу в колі  $r-C$  за даними для вашої бригади параметрами  $r_1$  і  $C$ . Вирази для  $u_C$  та  $i_C$  отримати як для зарядження, так і для розрядження конденсатора. Графіки будувати в проміжку часу  $t_i$  та  $t_n$  на міліметровці.

5). Визначити значення  $u_C$  в моменти  $t_1$  і  $t_2$ , які зображені на рис. 16-А.1.б (на кінцях проміжків  $t_i$  і  $t_n$ ) при опорах в колі, рівних  $r_1, r_2, r_3$ .

6). Розрахувати і побудувати на одному графіку залежність напруги  $u_L$  і струму  $i$  в перехідному процесі в колі  $r-L$  за заданими для бригади параметрами  $r_1$  і  $L$ . Розрахунок і побудову графіків зробити для проміжків часу  $t_i$  та  $t_n$ .

7). Розібратися зі схемою лабораторного макету зображеного на рис. 16-А.2.

$S_1$  – ключ, що під'єднує макет до джерела живлення.

Ємність  $C$ , індуктивність  $L$  та опори  $r_1, r_2, r_3$  з'єднані послідовно і під'єднані до клем  $m$ - $n$  ГПШ. При замиканні ключа  $S_2$  вправо, осцилограф, приєднаний до відповідних клем на макеті, вмикається на один з опорів  $r_1, r_2, r_3$ . Напруга на опорі пропорційна струму в колі, тому крива струму як функція часу має такий самий вигляд як і крива напруги. За відомим масштабом напруги і значенням опору можна визначити масштаб струму.

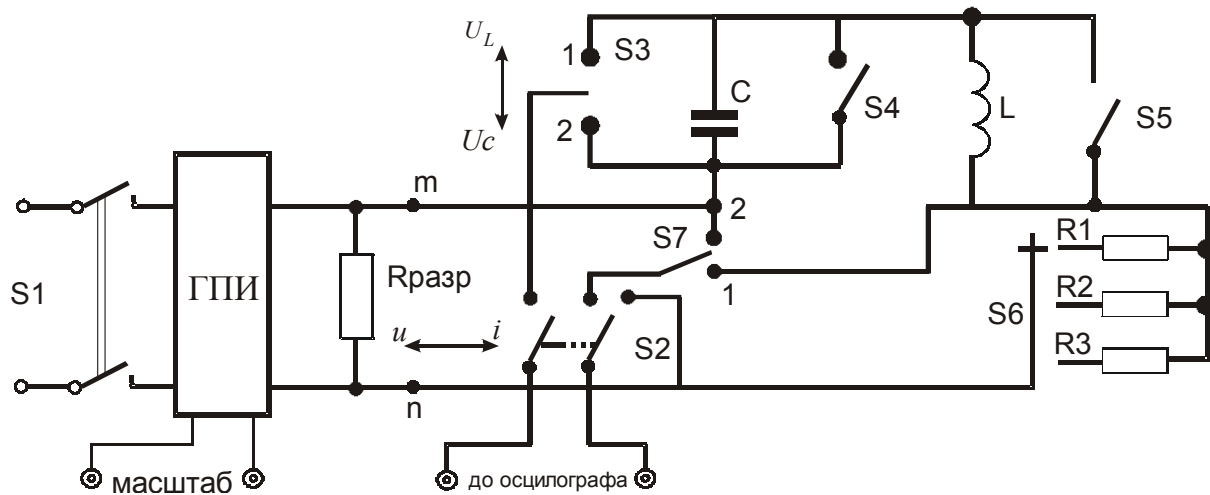


Рисунок 16-А.2

Ключами  $S_4$  і  $S_5$  можна закортити відповідно ємність та індуктивність.

При вмиканні ключа  $S_2$  вліво осцилограф приєднується до індуктивності, якщо  $S_3$  буде в верхньому положенні, а  $S_5$  – розімкнений; або до ємності, якщо  $S_2$  ввімкнений вправо, а  $S_3$  в нижньому положенні, а  $S_5$  – замкнений і  $S_4$  – розімкнений). Ключом  $S_6$  можна встановити в колі різні значення опору  $r_1, r_2, r_3$ .

Для визначення масштабів напруги і часу на екрані осцилографа використовуються клеми ГПШ “Масштаб”. На рис. 16-А.1 б. наведений графік напруги на виході ГПШ. Амплітуда та частота цієї напруги вказані на лицьовій панелі лабораторного макета і в таблиці. Схему нарисувати в “заготовці” звіту.

13). Для зняття осцилограм взяти з собою на лабораторне заняття кальку розміром стандартного листа паперу. Бажано мати на занятті інструмент, що дасть змогу розрізати кальку на частини по розміру екрана осцилографа.

### Завдання до лабораторної роботи і методичні вказівки

1. Дослідити перехідний процес в колі  $r - C$ .

- 1.1. Після дозволу викладача ввімкнути осцилограф.
- 1.2. Підготувати 6 аркушів з кальки розміром рівним екрану осцилографа.
- 1.3. Приєднати вхід осцилографа до клем “До осцилографа” лабораторного макета.

Набрати на макеті коло  $r - C$ .

Ввімкнути живлення ГП. Подати на вхід осцилографа напругу  $u_c$ . Ручками “Підсилення”, “Розгортка”, “Рівень синхронізації”, “Переміщення променя по горизонталі”, “Переміщення по вертикалі” встановити на екрані зручне для спостереження стійке зображення величини, яка досліджується.

Не змінюючи положення ручок осцилографа “Підсилення” та “Розгортка”, зняти осцилограми  $u_c(t)$  при трьох значеннях опору ( $r_1, r_2, r_3$ ) на кальку.

Масштаби напруги та часу записати по ручках осцилографа “Підсилення” та “Розгортка”.

- 1.4. Переключити перемикач  $S_2$  в положення I – при цьому на осцилограф буде подаватись напруга від одного із трьох резисторів  $r_1, r_2, r_3$ .

Ручкою “Підсилення” встановити на екрані зручний розмір зображення з максимальною амплітудою трьох напруг  $u_{r1}, u_{r2}, u_{r3}$ . Осцилограми цих напруг зняти на кальку.

2. Дослідити перехідний процес в колі  $r - L$ .

Все виконується аналогічно п.1 завдання до роботи.

3. Порівняти розрахункові та експериментальні криві досліджених процесів.
4. Зробити висновки по роботі.

### Контрольні питання

- 1). Що називається перехідним процесом?
- 2). Які причини виникнення перехідних процесів в колах?
- 3). Сформулювати закони комутації.
- 4). Що називають незалежними початковими умовами? Залежними?
- 5). Як стала часу кола характеризує перехідний процес?

## Лабораторна робота №16-Б

### Перехідні процеси в послідовному колі $r-L-C$

**Мета роботи** – дослідити характер перехідних процесів в колі  $r-L-C$ , встановити їх залежність від параметрів кола.

#### Підготовка до роботи

- 1) Які бувають перехідні процеси в послідовному колі  $r-L-C$ ? Як залежить вид перехідного процесу від параметрів кола?
- 2) Як набрати за допомогою перемикачів на лабораторному макеті коло  $r-L-C$ ? (Пояснити за схемою макета в звіті до лабораторної роботи №16-А)
- 3) Як зняти осцилограми  $u_C(t)$ ,  $u_L(t)$ ,  $i(t)$ ? (Пояснити за схемою макета).
- 4) Як визначити масштаби часу, струму та напруги при знятті осцилограм?
- 5) В заготовці звіту нарисувати схему кола  $r-L-C$ ; приєднаного до ГП.
- 6) Розрахувати напругу  $u_C(t)$  в колі  $r-L-C$  при трьох значеннях опору  $r$  в колі:  $r_1, r_2, r_3$ . Опір  $r_2$  підібраний рівним критичному. При розрахунку звернути на це увагу і перевірити відповідність його  $r_{кр}$ .
- 7) Побудувати на міліметровці в масштабі графіки розрахованих перехідних процесів.
- 8) Підготувати кальку для зняття 6 осцилограм.

#### Завдання до лабораторної роботи та методичні вказівки

1. Дослідити перехідні процеси в послідовному колі  $r-L-C$ , при трьох значеннях резистора  $r$  ( $r_1, r_2, r_3$ ).

1.1. Встановити в колі  $r-L-C$  на макеті спочатку опір  $r_1$ . Встановити на екрані осцилографа стійке зображення  $u_C(t)$ , зняти його осцилограму.

1.2. Зняти осцилограми  $u_C(t)$  та  $i(t)$  при  $r = r_1, r_2, r_3$ .

**Увага!** Якщо виникає необхідність зміни положень ручок “Підсилення” і “Розгортка” для отримання зручного зображення на екрані осцилографа, то щоразу масштаби напруги та часу записуються у звіт.

1.3. Порівняти побудовані за результатами розрахунку і зняті експериментально графіки досліджуваних процесів.

1.4. Зробити висновки по роботі.

## Лабораторна робота №17

### Нелінійні кола постійного струму

**Мета роботи** - дослідити кола, в яких послідовно, паралельно і змішано з'єднані елементи з нелінійними вольт-амперними характеристиками.

#### Теоретичні положення

Електричне коло вважається нелінійним, якщо воно має хоча б один нелінійний елемент (НЕ), тобто такий елемент, струм та напруга на якому зв'язані нелінійно. Залежність між напругою та струмом НЕ називається вольт-амперною характеристикою (ВАХ).

Суттєва особливість нелінійних електричних кіл – неможливість застосування методу накладання. Процеси в нелінійних електричних колах описуються нелінійними алгебраїчними або диференціальними рівняннями.

При розрахунку нелінійних кіл вводять поняття статичного та диференціального опорів НЕ. На рис.17.1 представлена ВАХ НЕ в масштабі струму  $m_i$  і напруги  $m_u$ . Точка "а" є робочою точкою.

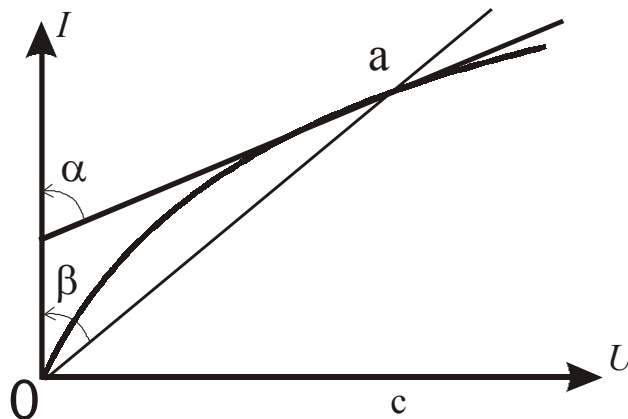


Рисунок 17.1

Відношення напруги, якій відповідає відрізок ОС, до струму (відрізок Са), визначає в масштабі  $m_r = \frac{m_u}{m_i}$  величину, яка називається статичним опором в даній точці. З рис. 17.1 видно, що значення цього опору пропорційне тангенсу кута  $\beta$  між прямою, що з'єднує точку "а" з початком координат і віссю струмів, тобто

$$r = \frac{U}{I} = \frac{m_u OC}{m_i Ca} = m_r \operatorname{tg} \hat{\alpha}$$

Відношення приросту напруги до приросту струму або похідна від напруги по струмові в тому ж масштабі  $m_r$  визначає диференціальний опір  $r_g$ . Значення цього опору пропорційне тангенсу кута  $\alpha$  між дотичною до ВАХ в точці “а” і віссю струмів, тобто

$$r_g = \frac{dU}{dI} = m_r \operatorname{tg} \alpha.$$

Для прямолінійної ділянки ВАХ диференціальний опір можна визначити відношенням кінцевого приросту напруги до кінцевого приросту струму, тобто

$$r_g = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

Для НЕ з падаючою ВАХ значення диференціального опору від’ємне, тому що додатний приріст струму супроводжується від’ємним приростом напруги.

Нелінійні електричні кола простої конфігурації зручно розраховувати графоаналітичним методом. Розрахунок нелінійного кола зводиться до знаходження струмів та напруг на ділянках кола за допомогою ВАХ.

При послідовному з’єднанні НЕ загальна ВАХ усього кола (рис. 17.2.) може бути отримана підсумовуванням абсцис ВАХ окремих елементів для одних і тих же значень струму. При паралельному з’єднанні НЕ загальна ВАХ усього кола (рис. 17.3.) може бути отримана підсумовуванням ординат ВАХ окремих елементів при одних і тих же значеннях напруги.

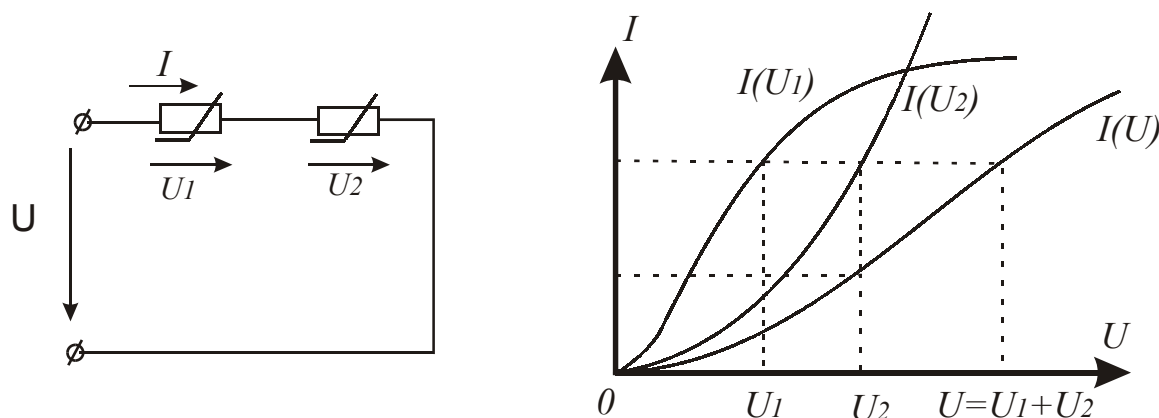


Рисунок 17.2

На рис.17.4. зображений випадок змішаного з’єднання НЕ.

Після заміни двох паралельно з’єднаних елементів одним еквівалентним схема із змішаним з’єднанням приводиться до розглянутої схеми послідовного з’єднання двох НЕ.

Відповідним підбором НЕ можна скласти коло, в якому напруга на одній із ділянок буде змінюватися значно менше, ніж напруга на вході ко-

ла (стабілізатор напруги), або струм в одній із гілок буде мало залежати від зміни опору цієї ж гілки (стабілізатор струму).

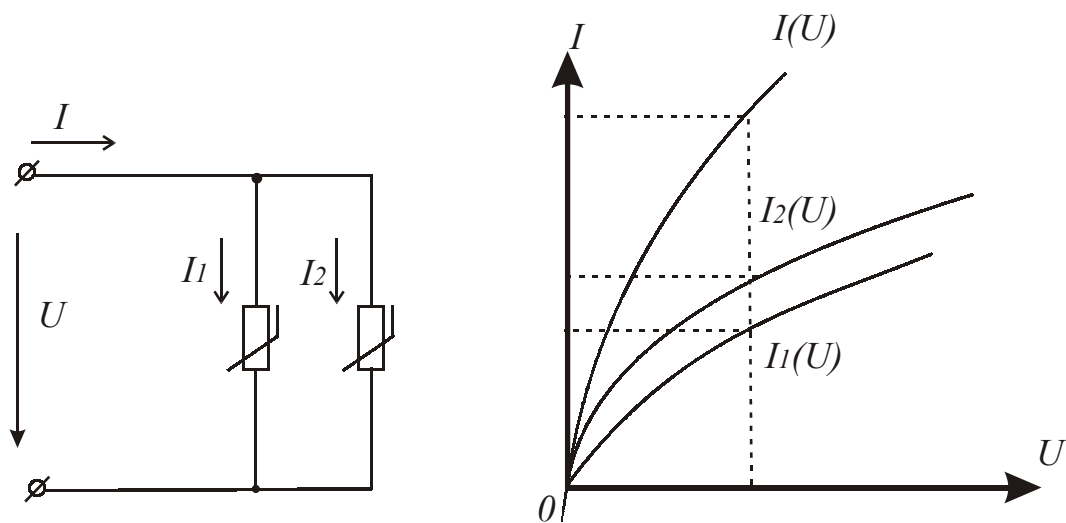


Рисунок 17.3

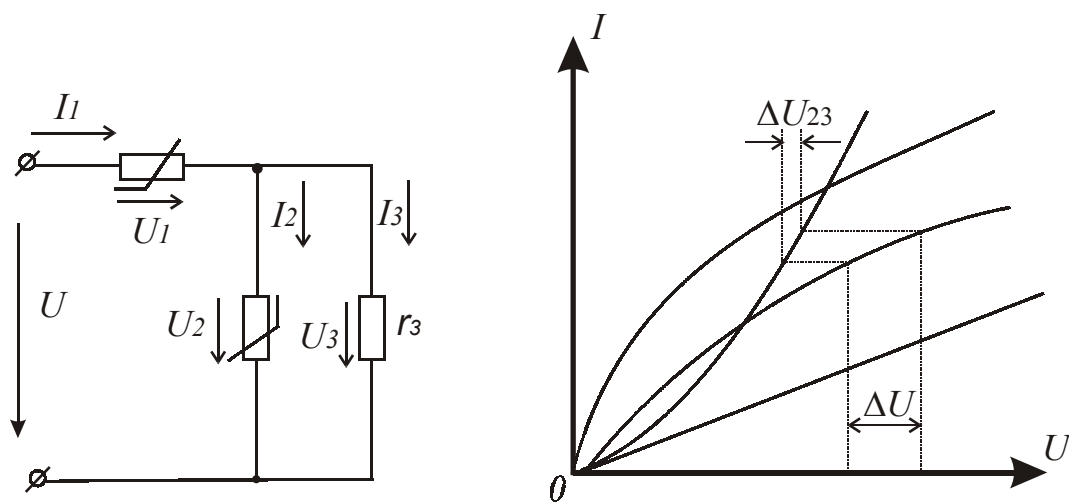


Рисунок. 17.4

Схема на рис. 17.4. може застосовуватись для стабілізації напруги  $U_2 = U_3 - U_{23}$  на опорі приймача  $r_3$ .

Дійсно, якщо напруга  $U$ , починаючи з деякого значення, змінюється в широких межах, наприклад на  $\Delta U$ , напруга  $U_{23}$  на опорі  $r_3$  змінюється менше.

Ступінь постійної напруги на опорі навантаження характеризує коефіцієнт стабілізації.

Коефіцієнт стабілізації напруги – це відношення відносної зміни стабілізованої напруги  $\Delta U / U$  до викликаної ним відносної зміни стабілізованої напруги  $\Delta U_{23} / U_{23}$ , тобто

$$K_{cm} = \frac{\Delta U}{U} \div \frac{\Delta U_{23}}{U_{23}} = \frac{U_{23}}{U} \frac{\Delta U}{\Delta U_{23}}$$

Очевидно, що чим більший коефіцієнт стабілізації, тим менша відносна зміна стабілізованої напруги.

#### Порядок виконання роботи

1. Зняти вольт-амперні характеристики:
  - а) лінійного опору;
  - б) баретера;
  - в) стабілітрона (діода, ввімкнутого в зворотному напрямку).

Для цього використати: джерело постійної напруги на лабораторному стенді; реостат 30 Ом в якості потенціометра; стабілітрон, баретер та опір  $R_1$  на стенді; вольтметр на 15 В та амперметр на 0,25-1 А.

Результати досліду (10 точок) занести до таблиці 17.1.

Таблиця 17.1

№ п/п	Лінійний опір			Баретер			Стабілітрон		
	U	I	R	U	I	R	U	I	R
	В	А	Ом	В	А	Ом	В	А	Ом
1									
2									
·									
·									
·									
10									

2. Зібрати схему стабілізатора напруги (рис. 17.5), для чого баретер  $B$  ввімкнути в коло послідовно, а стабілітрон  $C$  паралельно опору.

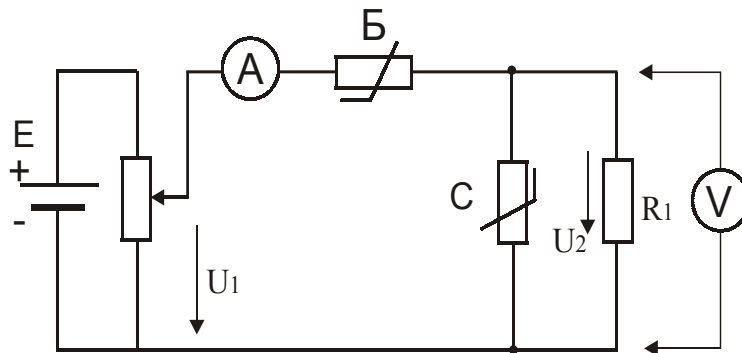


Рисунок 17.5

Результати досліду (10 точок) занести до табл. 17.2.

Таблиця 17.2

Номер точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I, A$										
$U_1, B$										
$U_2, B$										

3.Зібрати схему стабілізатора струму згідно рис. 17.6. В якості не-лінійного елемента взяти баретер, в якості навантаження – реостат 30 Ом. Результати вимірювань занести до табл 17.3.

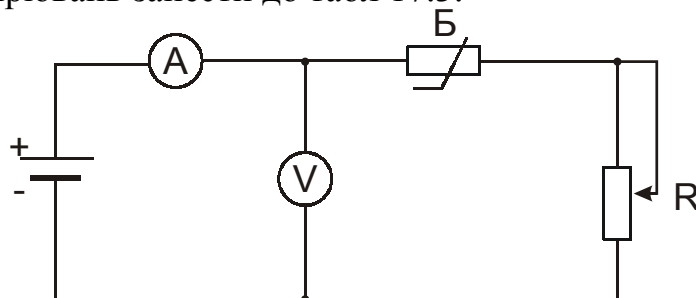


Рисунок 17.6

Таблиця 17.3

Номер точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

### Обробка результатів дослідів

1. Побудувати ВАХ трьох елементів за даними дослідів п. 1 (на одному графіку).
2. Побудувати вхідну ВАХ кола з трьох НЕ, з'єднаних за схемою рис. 17.6. при цьому використати ВАХ, отримані в п.1. Потім побудувати на тому ж графіку ВАХ за даними дослідів п.2. Порівняти отримані ВАХ.
3. За даними дослідів п.2. побудувати графіки. Визначити коефіцієнт стабілізації за напругою.
4. За даними дослідів п.3. побудувати залежність струму від опору навантаження.

### Контрольні питання

1. Чи можна застосувати до аналізу та розрахунку процесів в нелінійному колі метод накладення?
2. Як визначити статичний та диференціальний опори НЕ?
3. Як будують сумарні ВАХ при послідовному, паралельному та змішаному з'єднаннях нелінійних елементів?
4. В яких колах застосовують нелінійні елементи?
5. Як визначити коефіцієнт стабілізації за напругою?
6. Зміст експериментальної частини лабораторної роботи. Порядок її виконання.

### **Література:**

1. Бессонов Л. А. ТОЭ: в 3 ч. - М.: ВШ, 1973, С. 47 - 63.
2. Атабеков Г. І. ТОЭ. - М.: Энергия, 1970. - Ч.2 - С. 7 - 37.
3. Жуковичкий Б. Я., Негневицкий И. Б. ТОЭ. - М.: Энергия, 1972. Т.2, С.106-129.

## Лабораторна робота №17-А

### Розгалужене нелінійне коло постійного струму

**Мета роботи** – дослідна перевірка результатів аналізу розгалуженого нелінійного кола графічним методом.

### Підготовка до роботи

1. Розібратися як будувати результувальну ВАХ елементів, що з'єднані послідовно; паралельно; змішано.
2. Заготовити міліметровку формату А4.
3. Підготувати “заготовку” звіту з необхідними таблицями та схемами.

### Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему для зняття ВАХ нелінійних елементів методом амперметра та вольтметра. Джерело постійної регульованої напруги взяти на блоці нелінійних елементів лабораторного стенда.
2. Зняти ВАХ двох ламп розжарювання ( окремо для кожної), що розташовані на блоці нелінійних елементів лабораторного стенда. (При знятті ВАХ необхідно щоб струм та напруга не були більші за номінальний струм та напругу ламп:  $U_n=6.3\text{В}$ ,  $I_n=0.3\text{А}$ ). Результати занести в таблицю.
3. Зняти ВАХ резистора  $R_5$ , що розташований на стенді та визначити його опір.
4. Зібрати схему для зняття ВАХ кола зображеного на рис.17-А.1. Схему з необхідними приладами нарисувати в звіті.
5. Зняти ВАХ кола для схеми п. 4.
6. Після зняття останньої точки ВАХ в п.4. зменшити вдвічі напругу на вході кола і зафіксувати відповідне значення вхідного струму.

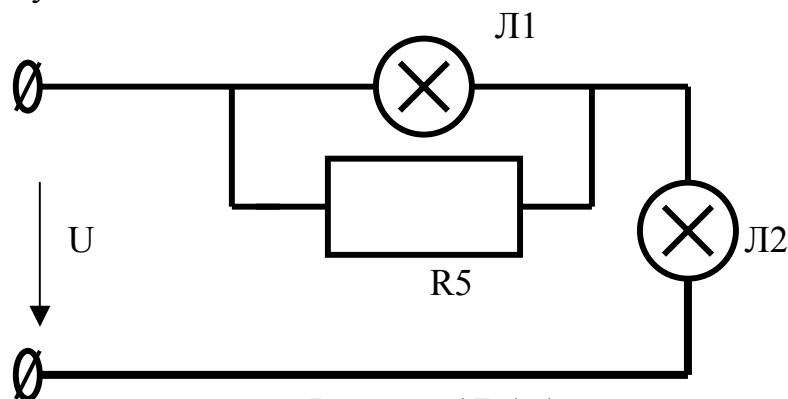


Рисунок 17-А.1.

### **Обробка результатів досліду**

1. За результатами дослідів п. 1 та 2 побудувати на міліметровці ВАХ резистора  $R_5$  та ламп розжарювання.
2. Використовуючи ВАХ окремих елементів, побудувати результуючу ВАХ кола зображеного на рис.17-А.1. На цей же графік нанести ВАХ цього кола отриману дослідним шляхом в п. п. 5.
3. За результатами дослідів п. 6. визначте у скільки разів зменшився струм на вході кола після зміни напруги вдвічі. перевірте те ж значення по результувальній ВАХ кола.
4. Зробіть висновки по роботі.

### **Контрольні питання**

1. Чим нелінійний елемент відрізняється від лінійного?
2. Який вигляд має ВАХ лампи розжарювання?
3. Як побудувати результувальну ВАХ елементів, що з'єднані послідовно; паралельно; змішано?

## Лабораторна робота №17-Б

### Параметричний стабілізатор постійної напруги

**Мета роботи** - вивчення принципу дії параметричного стабілізатора та визначення деяких характеристик режиму його роботи.

#### 1. Підготовка до роботи

1.1. Вивчити за підручником та конспектом принцип дії параметричного стабілізатора напруги на напівпровідниковому стабілітроні (рис. 1.1). напруга  $U_H$  дуже мало змінюється при зміні  $U_I$  у досить широких межах ( $R_H = const$ ).

1.2. Відповісти на питання: для чого потрібний у схемі стабілізатора опір  $R_6$ .

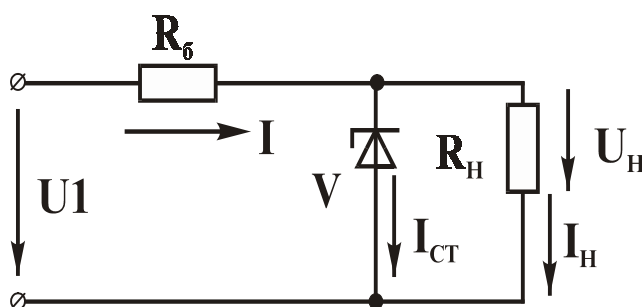


Рисунок 17-Б.1

На рис. 17-Б.2 показано ВАХ стабілітрона.

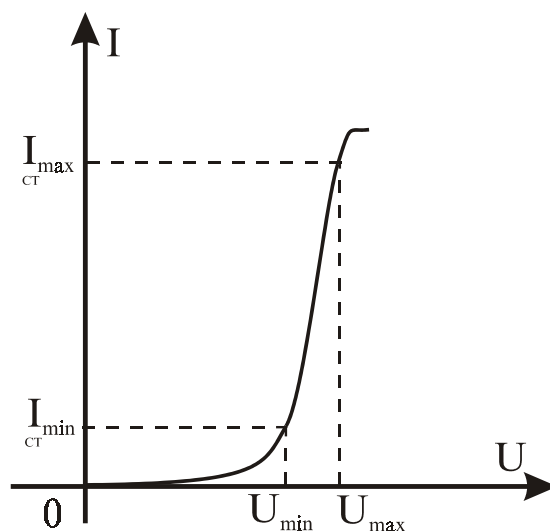


Рисунок 17-Б.2

У таблиці 17-Б.1. наведені значення опорів  $R_6$  та  $R_H$  та деякі параметри стабілітрона для кожної бригади студентів.

Таблиця 17-Б.1.

Номер бригади	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R_H$ , Ом	1000	680	100	560	82	1000	300	150	510	150
$R_6$ , Ом	208	172	244	208	100	244	208	136	208	208
Стабілітрон	Д811	Д809	КС139А	Д818Д	КС133А	КС175Ж	КС168А	КС147А	Д814А	КС139А
$I_{\min}$ , м	3	3	3	3	3	0,5	3	3	3	3
$I_{\max}$ , мА	23	29	70	33	81	17	45	56	24	70
$U_{CT}$ , В	10...12	8...9,5	3,9	9	3,3	7,5	6,8	4,7	7...8,5	3,9
$R_g$ , Ом	15	10	60	25	65	40	28	56	6	60

У таблиці  $U_{CT}$  - напруга стабілізації стабілізатора;  $R_g$  -динамічний опір стабілітрона на ділянці стабілізації.

1.3. Використовуючи дані з таблиці, визначити межі стабілізації напруги стабілізатором та коефіцієнт стабілізації за формулою:

$$K_{CT} = \frac{\Delta U_H}{U_{1CP}} : \frac{\Delta U_H}{U_{HCP}}, \quad \text{де}$$

$\Delta U_1, \Delta U_H$  — зміна вхідної та вихідної напруг відповідно;

$\Delta U_{1CP}, U_{HCP}$  — середнє значення вхідної та вихідної напруг відповідно.

Значення  $\Delta U_H$  можна визначити, знаючи  $I_{CT \min}, I_{CT \max}$  та динамічний опір,  $U_{HCP}$  прийняти рівним середньому значенню  $U_{CT}$ .

1.4. Нарисувати у «заготовці» до звіту схему з необхідними приладами для зняття ВАХ стабілітрона. Амперметр та вольтметр рекомендовано ввімкнути так, як зображено на рис. 17-Б.3.

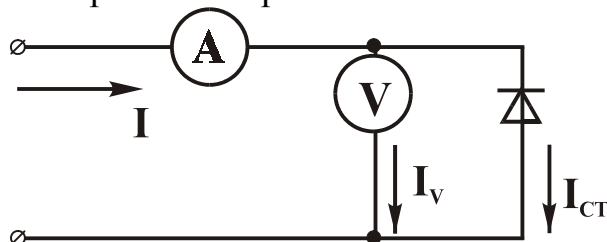


Рисунок 17-Б.3

У цьому випадку через амперметр протікає струм  $I=I_V+I_{CT}$ . Струм  $I_V$  можна визначити за шкалою вольтметра, знаючи що  $I$  струм повного відхилення на всіх діапазонах змін по напрузі дорівнює 1 мА. Тоді  $I_{CT}=I-I_V$ .

Для регулювання напруги у лабораторній роботі використовується реостат, ввімкнений подільником напруги.

Передбачити у схемі для зняття ВАХ регулювання напруги, а також ключ для підключення напруги живлення.

1.5. Нарисувати схему стабілізатора із приладами для вимірювання  $U_1$  та  $U_H$  (див. рис. 17-Б.1). У якості «баластного» опору  $R_6$  у стабілізаторі використовується набір з опорів  $R_1...R_5$ , які є на лабораторному стенді.

1.6. Підрахуйте з яких опорів можна скласти  $R_6$  для вашого стабілізатора, якщо  $R_1=100 \text{ Ом}$ ,  $R_2=R_5=36 \text{ Ом}$  кожний.

Резистори  $R_3$  та  $R_4$  з'єднані як на рис. 17-Б.4.  $R_3=72 \text{ Ом}$ ,  $R_4=36 \text{ Ом}$ .

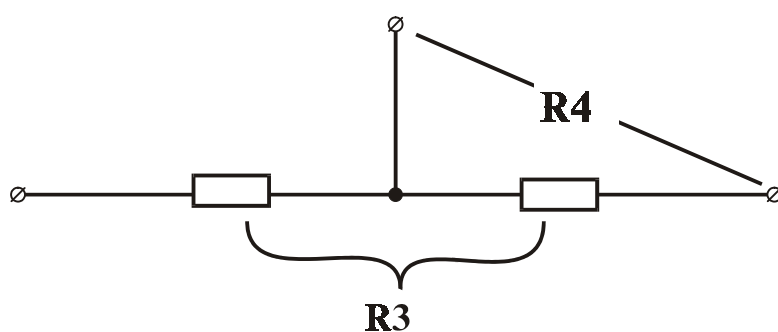


Рисунок 17-  
Б.4

1.7.

Заготувати  
2 листи мі-

ліметровки того ж формату, що й лист для звіту по лабораторній роботі.

## 2 Порядок виконання роботи

2.1. Зняти ВАХ стабілітрона. При цьому потрібно уважно слідкувати за тим, щоб струм через стабілітрон не перевищив значення  $I_{max}$ . В іншому випадку він вийде з ладу. Тому, перед початком досліду, потрібно повзунком реостата встановити так, щоб після підключення до кола напруга на стабілітроні була рівною нулю. Обов'язково зафіксувати значення напруги  $U$ , що відповідає  $I_{CTmax}$ .

2.2. Зібрати схему стабілізатора із приладами для визначення  $U$ , та  $U_H$ . В якості опору навантаження стабілізатора взяти на лабораторному стенді  $R_6$  (він вказаний у таблиці  $R_H$ ), у якості баластного  $R_6$  — набрати з  $R_1...R_5$ . Джерело напруги має свій вимикач.

2.3. Визначити дослідним шляхом межі зміни  $U_1$  у режимі стабілізації. При проведенні досліду струм через стабілітрон не повинен перевищувати  $I_{CTmax}$ . Записати значення  $U_1=U_{1max}$ , яке відповідає  $I_{CTmax}$ . Порівняти з межами які знайдено у п.2.1.

2.4. Зняти залежність  $U_1$  від  $U_H$ . Слідкувати за тим, щоб струм через стабілітрон не перевищував  $I_{CTmax}$ .

### 3 Обробка результатів досліду

3.1. На одному рисунку побудувати ВАХ стабілітрона,  $R_6$  та  $R_H$ . На цьому ж рисунку побудувати результувальну ВАХ  $U_I(I)$ , використовуючи ВАХ стабілітрона,  $R_6$  та  $R_H$ .

3.2. На другому рисунку побудувати залежність  $U_H(UI)$ , використовуючи побудови з попереднього пункту. Тут же побудувати  $U_H(UI)$ , яку знято експериментально. Порівняти залежності  $U_H(UI)$ , отримані двома способами. Зробити висновки.

3.3. Визначити коефіцієнт стабілізації, використовуючи криву  $U_H(UI)$ , отриману експериментально. Порівняти його зі значенням, отриманим у п.1.3.

3.4. Зробити висновки по роботі.

### Література

1. Матханов П.Н. Основы анализа электрических цепей. Нелинейные цепи: Учеб. Пособие. — М.: Высш. шк., 1977. — С. 94-97.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: В 3 ч.- 6-е изд. — М.: Высш. шк., 1973. — С. 57-58.

## Лабораторна робота № 18

### Дослідження котушки з феромагнітним сердечником

**Мета роботи** – дослідити вплив режимів роботи котушки з сердечником на її еквівалентні параметри.

#### Теоретичні положення

Котушка без феромагнітного сердечника є лінійний елемент електричного кола; опір  $z$  – величина стала, що не залежить від струму.

З введенням феромагнітного сердечника котушка стає нелінійним елементом. Її нелінійні властивості зумовлені нелінійною залежністю між магнітною індукцією  $B$  та напруженістю  $H$  магнітного поля в сердечнику, котра зображається замкнутою кривою (петлею). (рис. 18.1.).

Якщо прикласти до котушки синусоїдну напругу, то індукція і напруженість магнітного поля котушки в загальному випадку є несинусоїдні функції часу.

Для спрощення аналізу процесів в колі з такою котушкою часто несинусоїдні напругу, струм, індукцію замінюють еквівалентними синусоїдами. Тоді залежність між миттєвими значеннями  $B$  та  $H$  описується еліпсом (рис.18.2.), площа якого при тому ж значенні струму дорівнює площі петлі перемагнічування (рис.18.1).

Площа петлі визначає в масштабі енергію, яка витрачається джерелом електричної енергії на перемагнічування одиниці об'єму сердечника. Частина енергії витрачається на гістерезис, частина – на вихрові струми. Явище нагрівання сердечника внаслідок гістерезису та протікання вихрових струмів враховується на схемі заміщення котушки введенням опору втрат в сталі, який може вмикатись послідовно або паралельно з котушкою.

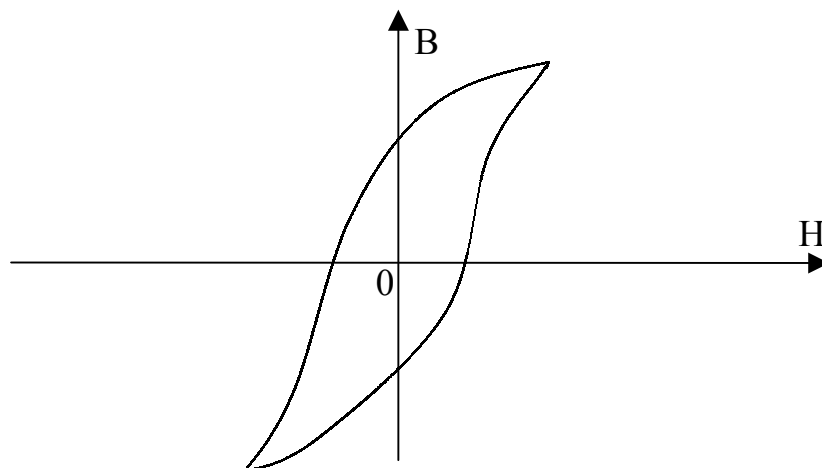


Рисунок. 18.1.

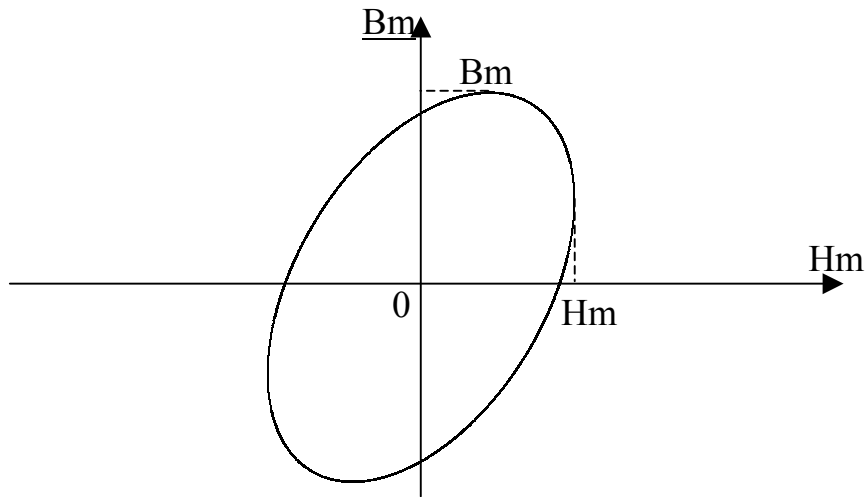


Рисунок 18.2

Залежність напруги та параметрів котушки від струму

При наближених розрахунках кіл зі сталлю користуються не петлею перемагнічування, а основною кривою намагнічування  $B(H)$  або  $B_m(H_m)$ , зображеною на рис.18.3.

Індукція  $B$  та напруженість  $H$  котушки, з малим активним опором та сердечником без проміжку, зв'язані з струмом та напругою співвідношеннями:

$$U = Wd\Phi/dt = WSdB/dt, \quad H = iW/l$$

- де  $W$  – число витків котушки;  
 $l$  – довжина середньої магнітної лінії;  
 $S$  – площа перерізу сердечника.

З приведених співвідношень видно, що при синусоїдній напрузі індукція в сердечнику синусоїдна, тобто, пропорційна напрузі; напруженість також пропорційна струму. Тому для такої котушки вольт-амперна характеристика  $U(I)$  буде такою самою, як і  $B_m(H_m)$  (рис. 18.4.). Точка  $m$  на кривих  $B_m(H_m)$  та  $U(I)$  є точкою перегину.

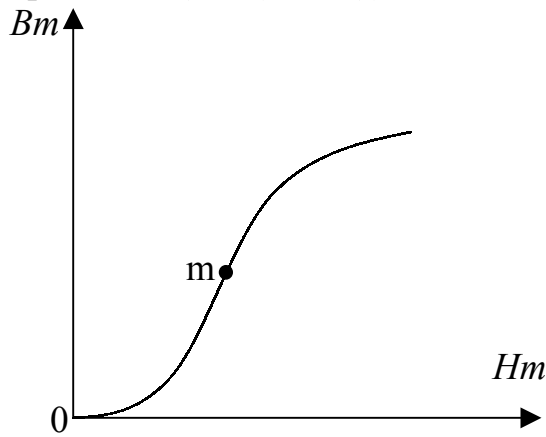


Рисунок 18.3

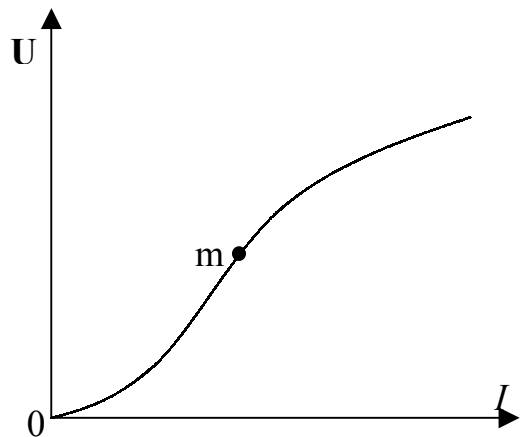


Рисунок 18.4.

По кривій  $U(I)$  легко встановити залежність повного опору  $Z$  котушки від струму:  $Z = U / I$ . Для реальної котушки більш точну залежність  $Z(I)$  можна знайти за показаннями приладів.

Схема заміщення котушки зображена на рис. 18.5. В ній опір втрат в сталі ввімкнений послідовно з котушкою. Елементи схеми:

$r$  – опір міді (обмоточного провідника);

$X_S$  – лінійний опір індуктивності розсіювання;

$r_{cm}$  – опір втрат в сталі;

$L_o$  – основна нелінійна індуктивність котушки, зумовлена магнітним потоком в сердечнику.

За відсутності проміжку в сердечнику індуктивністю розсіювання можна знехтувати (в порівнянні з основною індуктивністю). Тоді реактивний опір котушки  $X_k = W/L_o$ . Індуктивність

$$L_o = \frac{\phi_0}{i} = \frac{WSB_0}{i} \approx \frac{WSBm}{I_m}. \quad (18.1)$$

З кривої  $Bm(Hm)$  (рис. 18.3) видно, що до точки перегину  $m$  індукція зростає швидше, ніж напруженість, тому на підставі (18.1) можна прийти до висновку, що до точки  $m$  індуктивність  $L_o$  зростає, тобто збільшується реактивний опір котушки  $X_k = W/L_o$ . Після точки  $m$  зростання індукції сповільнюється – опір  $X_k$  зменшується. Залежність  $K(I)$  зображена на рис.18.6.

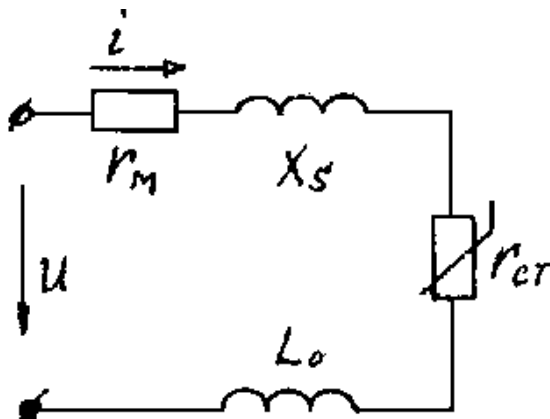


Рисунок. 18.5

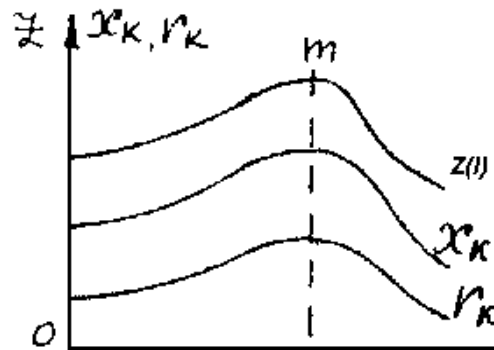


Рисунок. 18.6

Активний опір котушки  $r_k = r_m + r_{cm}$ . На низьких частотах  $r_m = const$ . Потужність втрат в сердечнику  $P_{cm}$  наближено можна вважати пропорційною квадратові максимальної індукції, або квадратові напруги. Тому

$$r_{cm} = P_{cm} / I^2 = k_1 Bm^2 / I^2 = k_2 U^2 / I^2 = k_2 Z^2, \quad (18.2)$$

$$P_k = P_m + k_2 Z^2. \quad (18.3)$$

Залежності  $Z$ ,  $x_k$  та  $r_k$  від струму  $I$  зображені на рис.18.6.

В даній лабораторній роботі використовують котушки, матеріал сердечників яких має дуже короткий відрізок кривої  $B_m(H_m)$  (на рис. 18.3 від точки  $O$  до точки  $m$ ). З допомогою приладів, що використовуються в роботі, цей відрізок отримати неможливо, тому на експериментальних графіках отримують тільки відрізки залежностей  $Z$ ,  $X_k$ ,  $r_k$  розташовані правіше точки  $m$ .

Залежність  $\cos \varphi(I)$  можна отримати таким чином:

$$\cos \varphi(I) = P / UI = (r_m I^2 + P_{cm}) / I U = r_m / Z(I) + k_2 Z(I) \quad (18.4)$$

Графічно ця залежність зображена на рис.18.7.

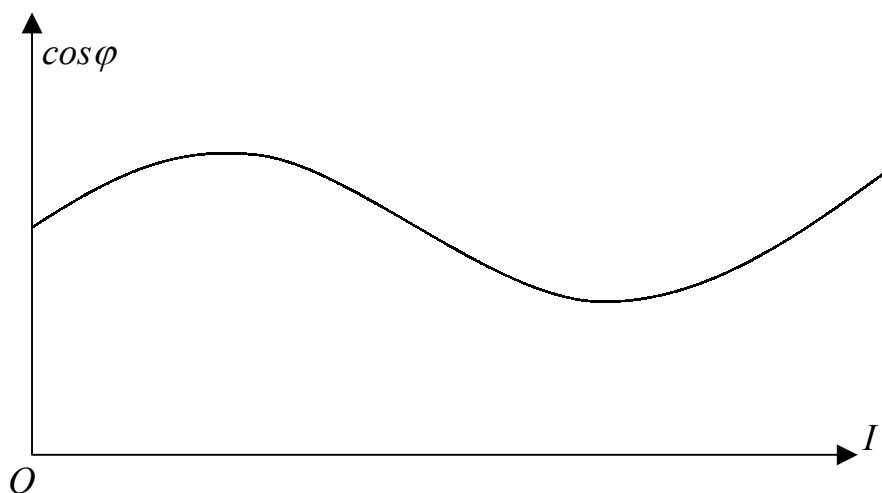


Рисунок 18.7

#### Залежність струму та параметрів котушки від проміжку

При дослідженні цих залежностей прикладена до котушки напруга залишається незмінною. За цієї умови та малих змінах проміжку  $\delta$  (рис.18.8) індукція, потік та напруженість в сердечнику також є незмінними (за амплітудою).

На підставі закону повного струму при сталому перерізі сердечника можна записати:

$$H_{cm} l_{cm} + H_{\delta} l_{\delta} = IW \quad (18.5)$$

де  $H_{cm}$  і  $H_{\delta}$  - напруженості магнітного поля відповідно в сердечнику та повітряному проміжку;

$l_{cm}$  і  $l_{\delta}$  - середні довжини відповідно сталевого та повітряного відрізка магнітного кола.

З (18.5)

$$I = (H_{cm}l_{cm} + H\delta)/W = H_{cm}l_{cm}/W + H\delta/W = I(0) + H\delta/W \quad (18.6)$$

При невеликих змінах проміжку, коли  $\delta \leq l_{cm}$ , величини  $l_{cm}$ ,  $H_{cm}$ ;  $l_{cm}$  можна вважати постійними, тому струм  $I$  зростає пропорційно  $\delta$  (рис. 18.9). Проте прямий зв'язок між  $I$  та  $\delta$  існує тільки при малих  $\delta$ , коли потоки розсіювання невеликі. Із зростанням  $\delta$  зростання струму сповільнюється.

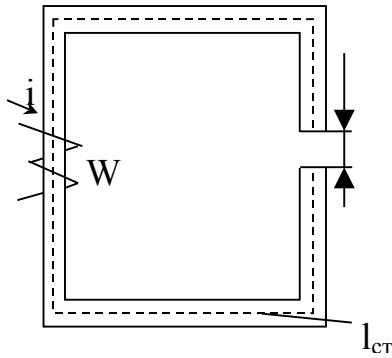


Рисунок 18.8

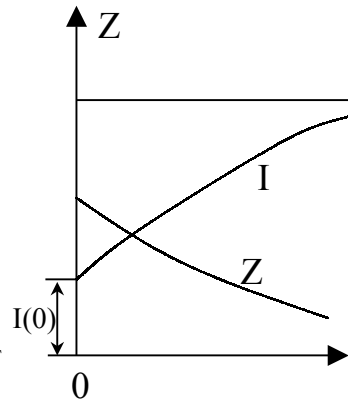


Рисунок 18.9

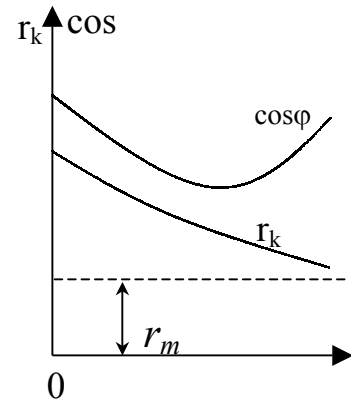


Рисунок 18.10

Маючи залежність  $I(\delta)$  та враховуючи, що прикладена напруга незмінна, легко визначити  $Z(\delta)$  (рис. 18.9).

Зі збільшенням проміжку індукція та об'єм сердечника не змінюються, тобто,  $P_{cm}$  також не змінюється. При цьому струм збільшується,  $r_{cm} = P_{cm}/I^2$  зменшується, отже  $r_k$  також зменшується (рис. 18.10).

Індуктивність  $L_o = WSB/I$  із збільшенням проміжку зменшується, тому  $X_k = W L_o$  також зменшується, але інакше ніж  $r_k$ , тому  $\cos\phi$  величина не стала (рис. 18.10).

Максимальне значення індукції в сердечнику можна визначити за формулою:

$$B_m = U / 4,44fSW. \quad (18.7)$$

### Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему (рис. 18.11). (Котушку та амперметр, що їй відповідає, взяти за вказівкою викладача).
2. Зняти показання приладів при зміні струму від 0 до верхньої границі амперметра для двох проміжків:
  - 1).  $\delta = 0$ ;
  - 2).  $\delta = 4$  мм.

**Увага!** Перед вмиканням кола під напругу ручка ЛАТРа повинна стояти на "0"!

Результати вимірювань (8-10 точок) занести до табл. 18.1.

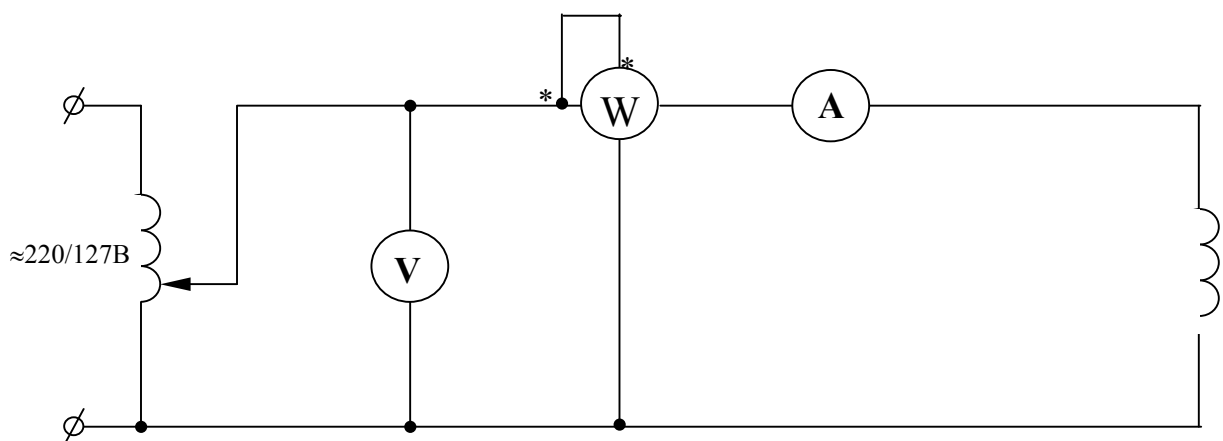


Рисунок 18.11

- При незмінній напрузі  $U$  (30% напруги, максимальної в першому досліді при  $\delta = 0$ ), зняти показання приладів, змінюючи повітряний проміжок  $\delta$  від 0 до 10мм через 1 мм. Результати вимірювань занести до табл. 18.1.

Таблиця 18.1

Вимірювання					Обчислення				
Номер точки	$\delta$	$U$	$I$	$P$	$Z$	$r_k$	$X_k$	$L_o$	$\cos\varphi$
	мм	В	А	Вт	Ом	Ом	Ом	Гн	-

### Обробка результатів дослідів

- За даними вимірювань (табл. 18.1) обчислити і занести до тієї ж таблиці повний  $Z$ , активний  $r_k$ , реактивний  $X_k$  опори та  $\cos\varphi$ .
- Побудувати в одній системі координат залежності  $U$ ,  $Z$ ,  $r_k$  та  $\cos\varphi$  від струму через котушку  $I$ .
- Побудувати в одній системі координат залежності  $Z$ ,  $r_k$ ,  $X_k$ , і  $\cos\varphi$  від повітряного проміжку  $\delta$ .
- Визначити прикладену до котушки напругу, при якій в сердечнику створюється індукція  $B = 0,6$  Тл. Визначити при цьому втрати на гістерезис та вихрові струми.
- Зробити аналіз отриманих залежностей.

### Контрольні питання

1. Як впливає зміна частоти на форму петлі перемагнічування?
2. В чому різниця між динамічною петлею перемагнічування та статичною?
3. Як пояснити нелінійність залежності напруги на клеммах котушки з сердечником та струму?
4. Як відрізняється форма кривих струму через котушку в двох випадках:
  - а) активний опір кола живлення котушки значно менший реактивного;
  - б) активний опір значно більший реактивного?В обох випадках напруга, прикладена до клем котушки, синусоїдна і незмінна за амплітудою.
5. Що означає опір втрат в сталі?
6. Методика зняття залежності струму  $I$  від проміжку  $\delta$ .
7. Пояснити хід залежності  $Z(I)$  для котушки з сердечником.
8. Нарисувати і пояснити хід залежності  $L_o(I)$ .
9. Пояснити залежність струму  $I$  від проміжку  $\delta$  при  $U = const$ .

### Література

1. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. ТОЭ. – М.: Энергия, 1967. т.І І, С.250-252.
2. Атабеков Г.И. ТОЭ. – М.: Энергия, 1970. ч.І І, С.115-123.
3. Бессонов Л.А. ТОЭ. – М.: ВШ, 1973, С.248-251, 315-319.

## Лабораторна робота №19

### Ферорезонанс напруг

**Мета роботи** – експериментально дослідити явища, що виникають в колі при послідовному з'єднанні котушки з сердечником та конденсатора.

#### Теоретичні положення

Резонанс в колі, що має котушку з феромагнітним сердечником, з'єднану послідовно або паралельно з ємністю, називають ферорезонансом.

На відміну від лінійного електричного кола, в нелінійному колі з феромагнітним елементом можливі зміни знаку кута зсуву фаз між основними гармоніками напруги та струму при зміні напруги (або струму) джерела живлення.

При аналізі явища ферорезонансу з метою спрощення несинусоїдні напруги та струми в котушці замінюють еквівалентними синусоїдами.

Для такого кола ( рис. 19.1 )

$$u = ri + \frac{d\psi}{dt} + \frac{1}{c} \int idt \quad (19.1)$$

де  $r$  – опір обмотки котушки та втрат в сталі;  
 $\psi$  - повне магнітне потокозчеплення;

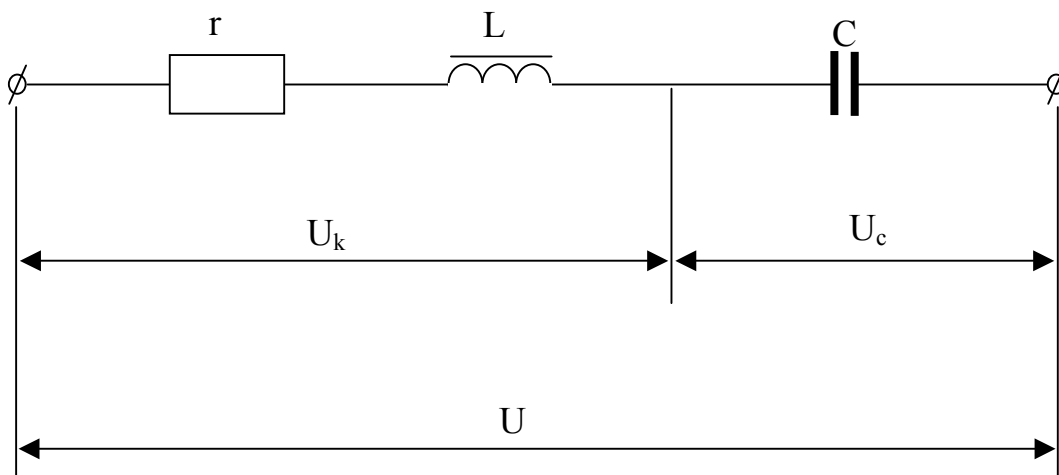


Рисунок 19.1

При синусоїдній напрузі струм і магнітний потік будуть несинусоїдними.

Несинусоїдність струму та потоку ускладнює аналіз та розрахунок кола. Якщо знехтувати малими активними опорами обмотки  $r$  та втратами

в сталі  $P_{cm}$  і замінити несинусоїдні криві струму та потоку еквівалентними синусоїдними, то можна записати рівняння (19.1.) так:

$$\dot{U} = j\omega\Psi - j\frac{I}{\omega c} = \dot{U}_k + \dot{U}_c \quad (19.2)$$

Напруги  $U_k$  та  $U_c$  можна вважати функціями струму. Тоді залежність  $U_k = f_1(I)$  можна зобразити нелінійною характеристикою котушки, залежність  $U_c = f_2(I)$  – прямою, що проходить через початок координат. Сумарну криву  $U = f(I)$  отримаємо, віднімаючи від ординат кривої  $U_k = f_1(I)$  відповідні координати прямої  $U_c = f_2(I)$  (рис. 19.2), тому, що з урахуванням вказаних допущень напруги  $U_k$  та  $U_c$  будуть знаходитися в протифазі.

Як видно з рис. 19.2, при  $U < U_{max}$  одному значенню напруги  $U$  відповідають три значення струму (точки 1,2,3)

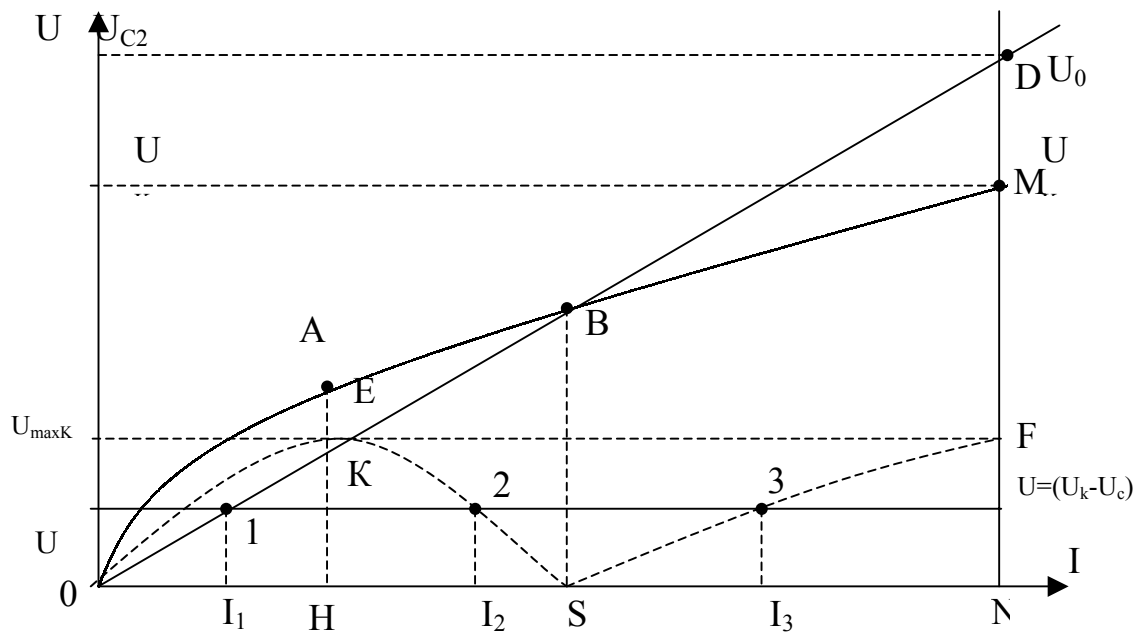


Рисунок 19.2

Дві перші точки відповідають індуктивному характеру кола, точка 3 – ємнісному характеру кола. Особлива точка  $S$  характеристики  $U = f(I)$ , що лежить на осі абсцис, є точкою резонансу, тому що в цій точці напруги  $U_k$  та  $U_c$  взаємно компенсуються, тобто виконується умова  $\omega L = \frac{1}{\omega c}$ . Виходить, при послідовному з'єднанні котушки з сердечником та конденсатора резонансу можна досягти, змінюючи прикладену напругу.

Якщо враховувати в колі втрати та вищі гармоніки, якими ми раніше нехтували, то фактична характеристика кола набирає вигляду на рис. 19.3.

Поступово збільшуючи напругу (при живленні кола від джерела ЕРС), ми дійдемо до точки  $a$  характеристики, потім буде стрибок в точку  $b$ , який

супроводжується сильним збільшенням струму в колі та напруг на окремих ділянках. При подальшому збільшенні напруги збільшення струму протікає повільно. При зниженні напруги струм повільно зменшується до точки *c*, з якої знову стрибком зменшується до значення в точці *d*. Разом із струмом різко зменшуються напруги на окремих ділянках кола.

При постійній нарузі на вході кола спадна частина характеристики є ділянкою несталих режимів.

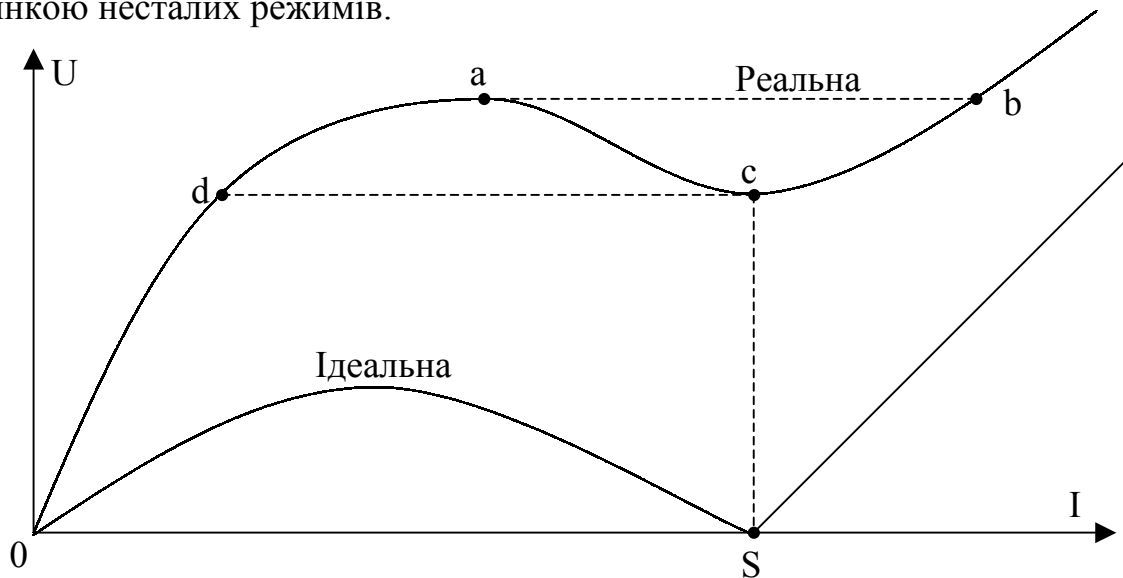


Рисунок 19.3

Оскільки для ділянки 0-а-с характеристики (рис. 19.3.)  $U_k > U_c$  і зсув фаз  $\varphi > 0$ , а для ділянки *c-b*  $U_k < U_c$  і  $\varphi < 0$ , то вказані різкі переходи супроводжуються зміною знаку кута зсуву фаз (перевертання фази).

Із збільшенням активного опору крива напруги  $U(I)$  вирівнюється і при достатньо великому активному опорі кола загальна ВАХ може не мати “спадної ділянки”. Це означає, що при живленні кола від джерела струму (який має нескінченно великий опір) стрибків струму не буде.

Електричні кола, які мають послідовно з’єднані котушку з феромагнітним сердечником та ємність, є основною складовою ферорезонансних стабілізаторів напруги.

В даній лабораторній роботі для котушки з сердечником потрібно визначити ємність, при якій струм в колі після стрибка буде мати задане викладачем значення. Зробити це можна графічно.

Поглянемо на рис. 19.2., на якому показані: крива 0ABM – ВАХ котушки; пряма 0КВД – ВАХ конденсатора; крива 0ESF – ВАХ послідовно з’єднаних котушки та конденсатора (побудована для еквівалентних синусоїд). Із побудови очевидна рівність відрізків:  $AK = EN = FN$ . Підбираючи положення прямої 0D відповідним чином, можна досягти рівності  $DM = AK$ . Відрізок EN відповідає вхідній нарузі, при якій виникне стрибок

струму; з другого боку, відрізок АК відповідає найбільшій відстані по вертикалі між ВАХ котушки (на ділянці 0AB) та ВАХ конденсатора.

З урахуванням сказаного, розрахунок ємності можна виконати так: на графіку з побудовою ВАХ котушки відкладаємо задане значення струму  $I_4$ . Проводимо лінію NP паралельно осі ординат. Підбираємо таке положення прямої ОКВД, щоб відрізок DM на прямій NP дорівнював максимальній відстані АК по вертикалі між прямою ОКВД та ВАХ котушки. В цьому випадку пряма ОКВД є ВАХ конденсатора. Визначаємо на цій ВАХ координати будь-якої точки. Наприклад, для точки D координатами на рис. 19.2. є струм  $I_4$  та напруга  $U_{c2}$ . Тоді  $X_c = U_{c2}/I_4 = 1/\omega c$ , звідки знаходимо ємність C.

Ця методика дозволяє приблизно визначити значення ємності, проте дає можливість визначити порядок різних величин та вибрати необхідні прилади.

### Порядок виконання роботи

1. Зняти та побудувати ВАХ котушки із сталевим сердечником (варіант вказує викладач).
2. Визначити значення ємності, яку необхідно ввімкнути послідовно з котушкою, щоб після характерного для ферорезонансу напруг стрибка струму значення струму було рівне вказаному викладачами (після показу ВАХ котушки).
3. Зібрати схему для зняття ВАХ послідовно з'єднаних котушки із сталевим сердечником та конденсатора (рис. 19.4). Прилади та їх границі вибирати згідно з п. 2.

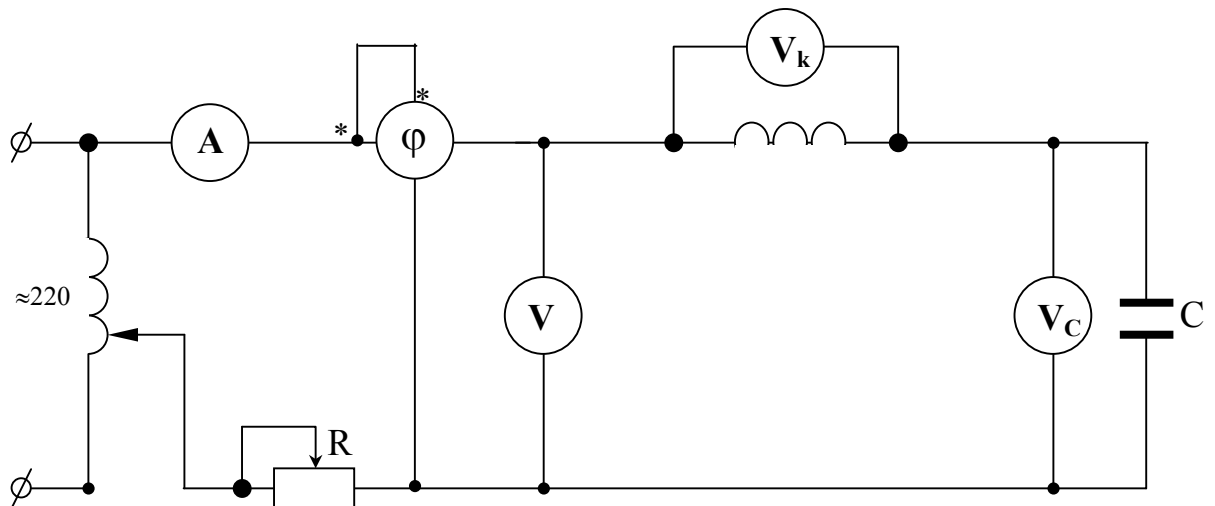


Рисунок 19.4

4. Вивести реостат ( $R=0$ ) та виміряти всі величини, вказані в табл. 19.1., при повільному збільшенні та зменшенні вхідної напруги. Особливо ре-

тельно треба виміряти напругу та струм безпосередньо до та після стрибка струму. Результати вимірювань занести до табл. 19.1.

5. Дослідним шляхом встановити мінімальне значення додаткового опору (реостат  $R$ ), при якому відсутній стрибок струму в колі при повільному збільшенні напруги живлення. (При необхідності послідовно з реостатом ввімкнути опори на стенді  $R=100; 75; 30 \text{ Ом}$ ).
6. Встановити необхідне мінімальне значення опору (п. 5) і виконати вимірювання аналогічно п. 4 при повільному збільшенні струму в колі. Дані вимірювань занести до табл. 19.1.

Таблиця 19.1

Номер точки	I	U	$U_L$	$U_C$	$\varphi$
	A	B			град.

### Обробка результатів дослідів

1. За даними дослідів пп. 1, 2 побудувати в одній системі координат ВАХ:
  - котушки із сталевим сердечником;
  - конденсатора;
  - усього кола, отриману як різницю ординат ВАХ котушки і конденсатора.
2. За результатами вимірювань пп. 4, 6 в тій же системі координат побудувати криві залежностей струму та напруги на котушці і напруги на конденсаторі від загальної напруги. Пояснити стрибок струму в колі.
3. Порівняти три ВАХ усього кола п.п. 1 та 2.
4. Розглядаючи коло як стабілізатор напруги, визначити коефіцієнт стабілізації (див. методичні вказівки до лабораторної роботи №17).
5. Побудувати в масштабі векторні діаграми для трьох випадків:
  - а)  $\varphi > 0$ ;
  - б)  $\varphi = 0$ ;
  - в)  $\varphi < 0$ ;
6. Зробити висновки по роботі.

### Контрольні запитання

1. Що називається ферорезонансом?
2. Чи можна досягти резонансу в колі, що складається з послідовно з'єднаних:
  - а) активного опору, котушки без сердечника і конденсатора тільки зміною прикладеної до входу кола напруги?
  - б) в колі, що має котушку з осердям і ті ж самі  $r$  і  $C$ ? Чому?

3. Як пояснити наявність стрибків струму при ферорезонансі?
4. Як визначити ємність, необхідну для отримання заданого значення струму після стрибка?
5. Чому стрибки струму зникають із збільшенням активного опору кола?
6. Які припущення щодо форми струмів та напруг роблять при аналізі явища ферорезонансу?
7. Що таке коефіцієнт стабілізації і як його визначити в лабораторній роботі?
8. Як змінюється зсув по фазі між прикладеною до входу кола напругою і струмом при збільшенні напруги? Проілюструвати на векторних діаграмах.

### **Література**

1. Атабеков Г.И. ТОЭ. – М.: Энергия, 1970. ч.І І, С.86-90.
2. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. ТОЭ. – М.: Энергия, 1967. т.І І, С.92-101.
3. Бессонов Л.А. ТОЭ. – М.: ВШ, 1973, С.332-334.
4. Завеке Г. В. и др. Основы теории цепей. – М.: Энергия, 1975.

## Лабораторна робота №20

### Однофазний трансформатор з феромагнітним сердечником

**Мета роботи** - дослідити роботу однофазного трансформатора з феромагнітним сердечником в нелінійному режимі із застосуванням методу еквівалентних синусоїд і визначити параметри схеми заміщення трансформатора.

#### Теоретичні положення

На рис. 20.1 схематично зображений трансформатор з сердечником із феромагнітного матеріалу. Де  $W_1$  і  $W_2$  - число витків відповідно первинної та вторинної обмоток;  $\Phi_0$  - основний магнітний потік;  $\Phi_{S1}$  та  $\Phi_{S2}$  - потоки розсіювання відповідно первинної та вторинної обмоток;  $r_1$  та  $r_2$  - активні опори відповідно первинної та вторинної обмоток.

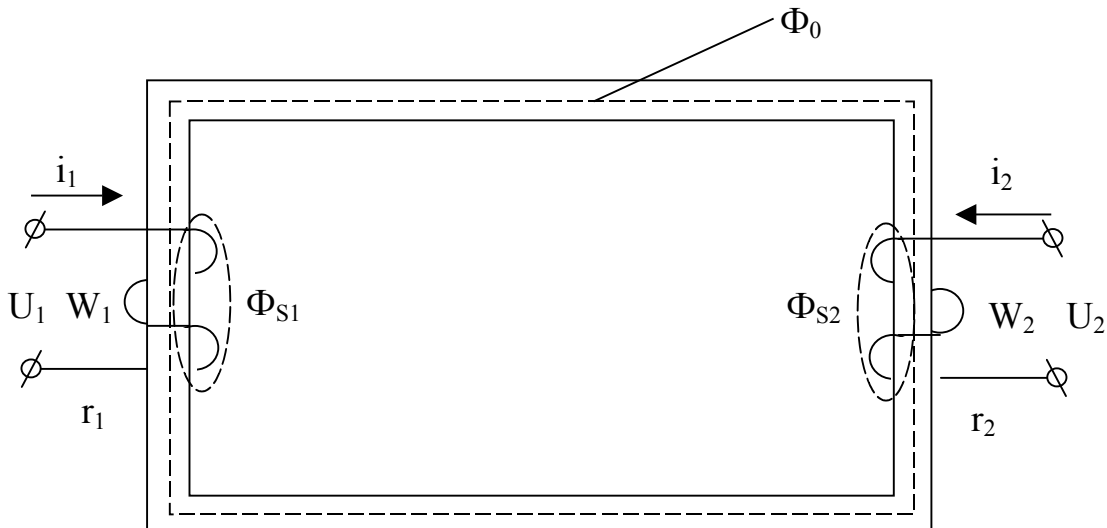


Рисунок 20.1

Первинні та вторинні напруги та струми позначені відповідними індексами. Потоки розсіювання  $\Phi_{S1}$  і  $\Phi_{S2}$  замкнені частково в повітрі, тому залежність їх від струмів  $i_1$  і  $i_2$  лінійна. Основний потік  $\Phi_0$  замкнений повністю в феромагнітному середовищі і зв'язаний з результувальною намагнічувальною силою (тобто струмами) нелінійною залежністю внаслідок нелінійності характеристики намагнічування матеріалу сердечника. Це означає, що при синусоїдній первинній напрузі  $U_1$  криві струмів  $i_1$  та  $i_2$  будуть несинусоїдні. В зв'язку з цим потокозчеплення котушок можна записати так:

$$\Psi_{S1} = \Psi_{S1} + \Psi_{01} = L_{S1}i + w_1\Phi_0, \quad (20.1)$$

$$\Psi_{S2} = \Psi_{S2} + \Psi_{02} = L_{S2}i + w_2\Phi_0. \quad (20.2)$$

Тут  $L_{S1}$  і  $L_{S2}$  - індуктивність відповідно первинної та вторинної обмоток, які визначаються потоками розсіювання.

Струм у вторинному колі виникає під дією ЕРС  $e_2 = W_2 d\Phi_0/dt$ . На підставі другого закону Кірхгофа для первинного та вторинного контурів можна записати рівняння:

$$u_1 = i_1 r_1 + L_{s1} \frac{di_1}{dt} + W \frac{d\Phi_0}{dt}; \quad (20.3)$$

$$e_1 = i_2 r_2 + L_{s2} \frac{di_2}{dt} + u_2; \quad (20.4)$$

де  $u_2$  - напруга на навантаженні;

$$e_2 = -W_2 d\Phi_0/dt.$$

Диференціальні рівняння (20.3) та (20.4) нелінійні внаслідок нелінійної залежності між напругою (поток) та струмом (напруженістю). Розв'язування цих рівнянь аналітичним методом досить громіздке і не може бути точним внаслідок неминучих похибок при апроксимації характеристики. В даному випадку доцільно застосувати метод еквівалентних синусоїд, що дозволить записати рівняння в комплексній формі:

$$U_1 = I_1 r_1 + j\omega L_{s1} I_1 + j\omega W_1 \Phi_0 \quad (20.5)$$

$$E_2 = I_2 r_2 + j\omega L_{s2} I_2 + U_2 \quad (20.6)$$

В трансформаторі з сердечником сума напруг  $(I_1 r_1 + j\omega L_{s1} I_1)$  за модулем значно менша напруги  $\omega W_1 \Phi_0$  (20.5). Тому при  $U_1 = \text{const}$  потік  $\Phi_0$  і відповідна йому напруга  $U_0 = \omega W_1 \Phi$  залишаються практично незмінними в широких межах, в тому числі і в режимі холостого ходу. Як наслідок цього, результувальна ЕРС в усіх режимах залишається незмінною:

$$I_1 W_1 + I_2 W_2 = I_0 W_1 \quad (20.7)$$

де  $I_0$  - струм холостого ходу трансформатора.

#### Схема заміщення та векторна діаграма трансформатора

Для зручності аналізу процесів в трансформаторі виконують приведення числа витків вторинної обмотки до числа витків первинної обмотки, тобто, приймають число витків вторинної обмотки приведенного трансформатора  $W_2' = W_1$ . При цьому не повинні змінюватись: режим і параметри первинного контуру; потужність, що передається з первинного контуру у вторинний; результувальна ЕРС, для чого повинна виконуватись рівність  $I_2 W_2 = I_2' W_2'$ , де  $I_2'$  - приведений вторинний струм.

Якщо позначити відношення  $W_1 / W_2 = k$  ( $k$  – коефіцієнт трансформації) і врахувати, що  $W_1 = W_2'$  з рівності  $I_2 W_2 = I_2' W_2'$  маємо:

$$I_2' = I_2 W_2 / W_2' = I_2 / k.$$

При цій умові, ЕРС наведені в обмотках основним магнітним потоком  $\Phi_0$ , будуть рівні ( $E_1$  та  $E_2'$ ). Але  $E_1 = -j\omega W_1 \Phi_0$  а  $E_2 = -j\omega W_2 \Phi_0$ , звідки  $E_2' / E_2 = W_1 / W_2$  або  $E_2' = kE_2$

Підставимо  $E_2$  та  $I_2$ , виражені через приведені величини, в рівняння (20.6) і отримаємо:

$$E_2' = I_2' k^2 r_2 + I_2' j\omega k^2 L_{S2} + kU_2. \quad (20.8)$$

Позначимо  $r_2' = k^2 r_2$ ;  $L_{S2}' = k^2 L_{S2}$  та  $U_2' = kU_2$ .

Рівняння (20.5), (20.7) та (20.8) зводимо в одну систему з урахуванням зроблених позначок:

$$U_1 = I_1 r_1 + I_1 j\omega L_{S1} + U_1 \quad (20.9)$$

$$E_2' = I_2' r_2' + I_2' j\omega L_{S2}' + U_2 \quad (20.10)$$

$$I_0 = I_1 + I_2 \quad (20.11)$$

Цій системі рівнянь відповідає схема заміщення трансформатора (рис.20.2) в якій магнітний зв'язок між первинним і вторинним контурами замінений електричним.

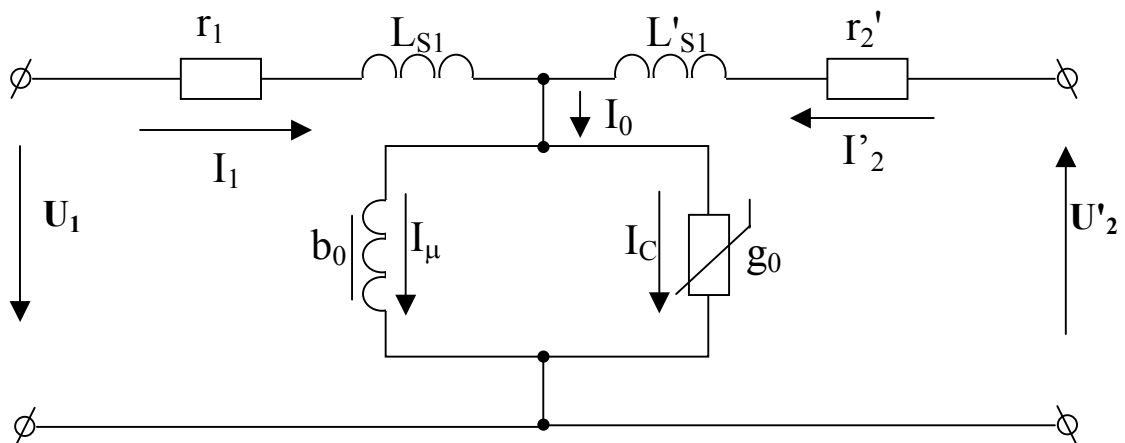


Рисунок 20.2

Струм  $I_0$  в схемі заміщення показаний у вигляді суми двох струмів:

$$I_0 = I_\mu + I_C$$

де  $I_\mu$  - намагнічувальний струм, що визначає основний потік;  
 $I_C$  – струм, що визначає втрати в сталі.

На рис. 20.3. показана векторна діаграма приведенного трансформатора, навантаженого на опір активно-індуктивного характеру ( $\varphi_H > 0$ ).

Параметри схеми заміщення можна визначити із дослідів холостого ходу та короткого замикання.

#### А. Дослід холостого ходу

При роботі трансформатора в номінальному режимі значення падіння напруги на елементах  $r_1$  та  $\omega L_{S1}$  складає 2-3%, а в режимі холостого ходу при струмі  $I = I_0 = (0,02 - 0,1)I_{1H}$  0,2-0,3% номінальної напруги  $U_{1H}$ . Тому можна з достатньою точністю прийняти умову  $U_1 \approx U_0$ . Це означає, що в режимі холостого ходу активна потужність, яку споживає трансформатор визначається розміром втрат в сталі. Тому для активної провідності можна записати:

$$g_0 = P_{cm} / U_1$$

Для повної провідності маємо  $y = I_0 / U_1$ , тоді  $b = \sqrt{y^2 - g_0^2}$ .

#### Б. Дослід короткого замикання

В цьому режимі струми обмоток мають номінальні значення, а вхідна напруга  $U_1 = U_{1k}$  складає приблизно 3-18%  $U_{1H}$  та називається напругою короткого замикання трансформатора. Оскільки вторинні клемі замкнені накоротко, то струм у колі (рис. 20.2.) проходить в основному шляхом  $r_1-L_{S1}-L_{S2}-r'_2$ , тому струмом  $I_0$  можна знехтувати в порівнянні із струмом к.з.  $I_k$ : внаслідок цього можна вважати, що  $I_{1k} = I_{2'H}$ . Якщо виміряти в цьому режимі  $U_{1k}$ ,  $I_{1k}$ ,  $P_{1k}$ , то можна визначити еквівалентні активні та реактивні опори:

$$r_e = \frac{P_{1k}}{I_{1H}^2}; \quad Z_e = \frac{U_{1k}}{I_{1k}}; \quad X_e = \sqrt{Z_e^2 - r_e^2}, \text{ де}$$

$$r_e = r_1 + r_2'; \quad x_e = \omega L_{S1} + \omega L_{S2}.$$

Для приведенного трансформатора можна вважати, що  $r_1 = r_2'$  і

$\omega L_{S1} = \omega L_{S2}$ . Тому  $r_1 = r_2' = r_e/2$ ;  $\omega L_{S1} = \omega L'_{S2} = X_e/2$ .

## Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему згідно з рис. 20.4. В якості досліджуваного трансформатора взяти на лабораторному стенді трифазний трансформатор і використати дві його обмотки (за вказівкою викладача).

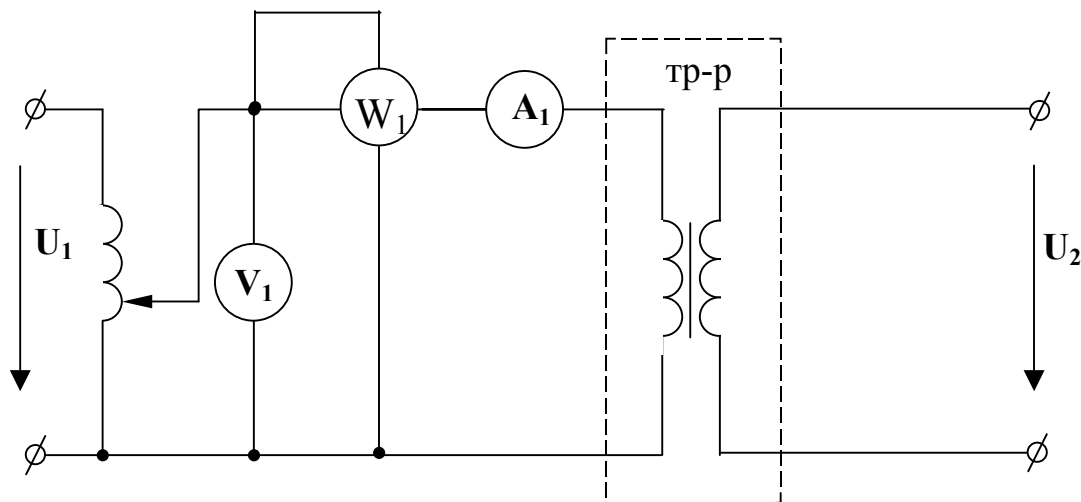


Рисунок 20.4

2. Виконати дослід х.х. трансформатора. Для вимірювання напруги  $U_2$  приєднати вольтметр на 7,5 – 60 В. На первинні клеми подати номінальну напругу  $U=220$  В. Результати вимірювань занести до табл. 20.1.

Таблиця 20.1

	U <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	P <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	I <sub>2</sub>	P <sub>2</sub>
	В	А	Вт	В	А	Вт
Холостий хід						
Коротке замикання						
Режим навантаження						

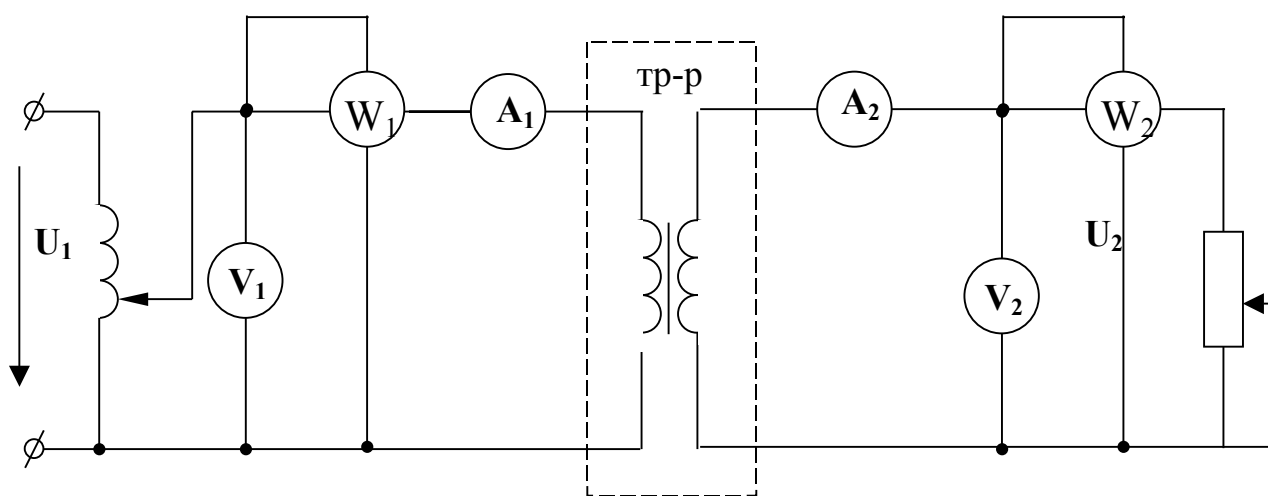


Рисунок 20.5

3. Замість вольтметра приєднати до вторинних клем амперметр на 5 А. Виконати дослід короткого замикання. Перед вмиканням кола під напругу ручка ЛАТРа повинна знаходитись на 0. Ввімкнути напругу, повільно підвищувати її ЛАТРОм до моменту, коли у вторинній обмотці встановиться струм  $I_{2H}$ . При цьому в первинній обмотці напруга буде  $U_{1k}$ . Зняти показання приладів і занести до табл. 20.1.
4. Видозмінити схему рис. 20.5 для виконання режиму навантаження. Перед початком досліду опір реостата повинен бути максимальним. Ввімкнути напругу, і з допомогою ЛАТРа подати номінальну напругу  $U_{1H}=220V$  на первинну обмотку трансформатора. Далі зменшити опір реостату і встановити у вторинній обмотці струм, значення якого вказане викладачем (3-5А). Показання приладів занести до табл. 20.1.

### Обробка результатів досліду

1. За даними дослідів п.п.2,3 обчислити всі параметри схеми заміщення трансформатора.
2. Для кожного з трьох режимів роботи трансформатора побудувати в масштабі його векторну діаграму.
3. Зробити висновки по роботі.

### Контрольні питання

1. Пояснити будову та принцип дії трансформатора з сердечником.
2. Чому магнітні потоки розсіювання  $\Phi_{S1}$  і  $\Phi_{S2}$  зв'язані із струмами в обмотках лінійною залежністю, а основний потік  $\Phi_0$  – нелінійною?
3. Написати рівняння трансформатора і пояснити суть кожної його складової.
4. Як сильно змінюється основний магнітний потік  $\Phi_0$  при зміні струму у вторинній обмотці трансформатора в широких межах? Чому?
5. Чим відрізняється приведений трансформатор від неприведеного?
6. В якій частині трансформатора в основному проходять втрати енергії в режимі холостого ходу?
7. Пояснити методику визначення параметрів схеми заміщення трансформатора.
8. Пояснити побудову векторних діаграм для дослідження режимів роботи трансформатора.

### Література

- Атабеков Г.И. ТОЭ. – М.: Энергия, 1970. ч.І І, С.30-55.  
 Нейман Л.Р., Демирчян К.С. ТОЭ. – М.: Энергия, 1967. т.І І, С.94-97.

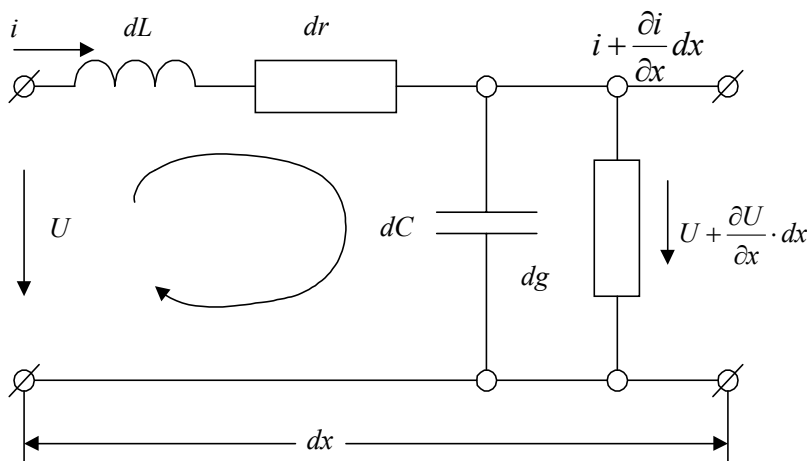
## Лабораторна робота №22 Дослідження однорідної довгої лінії .

**Мета роботи** – експериментально дослідити хвильові процеси в лінії з розподіленими параметрами в сталих синусоїдних режимах .

В роботі необхідно дослідити розподілення напруги в двопромінній лінії за чвертьхвильового вольтметра в режимах холостого ходу , короткого замикання і активного навантаження , вирахувати первинні і вторинні параметри лінії .

### Теоретичні положення .

Довгою лінією з розподіленими параметрами називають коло , яке створене двома провідниками, якщо її довжина  $l$  сумірна з довжиною електромагнітної хвилі  $\lambda$  . Довільну нескінченно малу ділянку лінії можна характеризувати певними нескінченно малими ємністю, індуктивністю, провідністю і активним опором, тобто електричні параметри такої лінії можна вважати неперервно розподіленими по її довжині . На рис. 22.1 відображена еквівалентна схема нескінченно малої ділянки лінії  $dx$ .



На цій схемі  $dL$  – підсумкова індуктивність верхнього і нижнього провідників ;  
 $dC$  – ємність між провідниками ;  
 $dr$  – активний опір обох провідників ;  
 $dg$  – провідність ізоляції іж провідниками;

Рисунок 22.1

Практично для характеристики лінії використовують так звані первинні параметри лінії тобто параметри її одиниці довжини :

$$L_0 = \frac{dL}{dx} \text{ – погонна індуктивність ; } C_0 = \frac{dC}{dx} \text{ – погонна ємність ;}$$

$$r_0 = \frac{dr}{dx} \text{ – погонний активний опір ; } g_0 = \frac{dg}{dx} \text{ – погонна провідність ізоляції .}$$

Якщо значення  $L_0, C_0, r_0, g_0$  не змінюються по всій довжині лінії , то таку лінію називають однорідною .

Відповідно I і II законів Кірхгофа для нескінченно малої ділянки лінії  $dx$ , що відображена еквівалентною схемою рис. 22.1, можна одержати систему диференціальних рівнянь довгої лінії :

$$\left. \begin{aligned} - \frac{\partial U}{\partial x} &= r_0 \cdot i + L_0 \cdot \frac{\partial i}{\partial t}, \\ - \frac{\partial i}{\partial x} &= g_0 \cdot u + C_0 \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (22.1)$$

Ці рівняння справедливі як для усталеного, так і перехідного режимів роботи лінії. При визначених початкових і граничних умовах, можна визначити струм і напругу, як функцію часу і відстані від початку (або кінця) лінії.

Для усталеного синусоїдального режиму лінії рішення системи диференціальних рівнянь довгої лінії (22.1) в символічній формі буде мати вигляд :

$$\underline{U} = \frac{1}{2} \cdot \left( \underline{U}_1 + \underline{I}_1 \cdot \underline{z}_c \right) \cdot e^{-\underline{\gamma}x} + \frac{1}{2} \cdot \left( \underline{U}_1 - \underline{I}_1 \cdot \underline{z}_c \right) \cdot e^{\underline{\gamma}x} \quad (22.2)$$

$$\underline{I} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\underline{U}_1}{\underline{z}_c} + \underline{I}_1 \right) \cdot e^{-\underline{\gamma}x} - \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\underline{U}_1}{\underline{z}_c} - \underline{I}_1 \right) \cdot e^{\underline{\gamma}x} \quad (22.3)$$

де :  $\underline{U}$  та  $\underline{I}$  - комплекси напруги і струму у деякій точці лінії, віддаленої на відстань  $x$  від початку лінії ;  $\underline{U}_1$  та  $\underline{I}_1$  - комплекси напруги і струму на початку лінії ;  $\underline{\gamma} = \alpha + j\beta$  - постійна передачі лінії при заданій частоті (коефіцієнт поширення) ;  $\alpha$  - коефіцієнт затухання амплітуди коливання ;  $\beta$  - коефіцієнт фази коливання .

$$\underline{z}_c = \sqrt{\frac{r_0 + j\omega \cdot L_0}{g_0 + j\omega \cdot C_0}} = z_c \cdot e^{j\varphi_c} \text{ - комплексний хвильовий опір}$$

довгої лінії при заданій частоті .

Позначимо 
$$\frac{1}{2} \left( \underline{U}_1 + \underline{I}_1 \cdot \underline{z}_c \right) = \underline{U}_\varphi = U_\varphi \cdot e^{j\varphi}$$

(22.4)

$$\frac{1}{2} \left( \underline{U}_1 - \underline{I}_1 \cdot \underline{z}_c \right) = \underline{U}_\psi = U_\psi \cdot e^{j\psi} \quad (22.5)$$

Одержимо миттєві значення напруги і струму для деякої точки лінії :

$$u = \sqrt{2} \cdot U_{\varphi} e^{-\alpha x} \sin(\omega t - \beta x + \varphi) + \sqrt{2} \cdot U_{\psi} e^{\alpha x} \sin(\omega t + \beta x + \psi) = U_n + U_0 \quad (22.6)$$

$$i = \sqrt{2} \cdot \frac{U_{\varphi}}{z_c} \cdot e^{-\alpha x} \cdot \sin(\omega t - \beta x + \varphi - \varphi_c) - \frac{\sqrt{2} \cdot U_{\psi}}{z_c} \cdot e^{\alpha x} \cdot \sin(\omega t + \beta x + \psi - \varphi_c) = i_n - i_0 \quad (22.7)$$

В кожній із складових правої частини двох останніх рівнянь аргумент мінуса залежить від часу  $t$  і від просторової координати  $x$ , кожна з цих складових можна розглядати як рівняння біжучої хвилі вдовж лінії. Амплітуда хвилі залежить від просторової координати  $x$  і спадає в напрямку її руху. Хвилі напруги і струму, в аргумент якої входить  $x$  із знаком мінус, рухаються від початку лінії до кінця і називаються падаючою, ( або прямою ) –  $u_n, i_n$ , а хвилі, в аргумент котрої входить  $x$  із знаком плюс, рухаються від кінця лінії до початку і називаються відбитою ( або оберненою ) –  $u_0, i_0$ . Коефіцієнт згасання  $\alpha$  характеризує зміну амплітуди прямої ( або оберненої ) хвилі на одиницю довжини лінії, а коефіцієнт фази  $\beta$  характеризує зміну фази хвилі на одиницю довжини лінії. Кут  $\varphi_c$  характеризує зсув фаз між напругою і струмом прямої ( або оберненої ) хвилі в будь-якій точці лінії.

Фазовою швидкістю називається швидкість зміщення вздовж лінії деякої точки, для якої фаза коливання ( напруги або струму ) залишається незмінною, тобто :

$$v = \frac{\omega}{\beta} \quad (22.8)$$

Довжиною хвилі називається відстань між двома найближчими точками в напрямку поширення прямої ( або оберненої ) хвилі, фази коливання в котрих однакові, тобто аргументи синусоїдної напруги ( або струму ) в котрих відрізняються на  $2\pi$  :

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{\omega} \cdot v = \frac{v}{f} = v \cdot T \quad (22.9)$$

Тобто, довжина хвилі – це відстань, яку пробігає хвиля за проміжок часу, який дорівнює періоду коливання.

Фізично у будь-якій точці лінії існує лише один струм і одна напруга; розклад цих дійсних струмів і напруг на прямі і обернені хвилі є лише зручним способом, який полегшує розрахунки і аналіз електромагнітних процесів в лінії.

Потужність, що надходить від джерела до приймача, буде максимальною при відсутності в лінії відбитих хвиль. Аналізуючи вирази ( 22.2 ) та ( 22.3 ), при заданих напрузі  $U_2$  і струму  $I_2$  в кінці лінії, можна довести, що відбиті хвилі будуть відсутні, коли:

$$\underline{U}_2 - \underline{I}_2 \cdot \underline{z}_c = 0 \quad \text{або} \quad \frac{\underline{U}_2}{\underline{z}_c} - \underline{I}_2 = 0, \quad \text{звідки} \quad \frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_2} = \underline{z}_c = \underline{z}_2.$$

Таким чином, відбиті хвилі не виникають, коли комплексний опір навантаження лінії дорівнює хвильовому опорі лінії при заданій частоті:

$$\underline{z}_2 = \underline{z}_c \quad (22.10)$$

Такий опір навантаження називають узгодженим, а сам режим роботи лінії – узгодженим, або режимом без відбиття. Рівняння лінії в узгодженому режимі будуть мати вигляд:

$$\underline{U} = \underline{U}_2 \cdot e^{-\gamma x}, \quad \underline{I} = \underline{I}_2 \cdot e^{-\gamma x} \quad (22.11)$$

Лінія, в якій відсутні втрати енергії (тобто, коли  $r_0 = 0$ ,  $g_0 = 0$ ), називають ще ідеальною лінією, або лінією без втрат. Ідеальною можна, при наближених розрахунках, розглядати лінію, коли  $r_0 \ll \omega L_0$  і  $g_0 \ll \omega C_0$ , (тобто короткі високочастотні лінії).

Рівняння ідеальної лінії зручніше всього одержати з рівнянь реальної лінії, записаних з використанням гіперболічних функцій, при відліку  $x$  від кінця лінії:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U} &= \underline{U}_2 \cdot \operatorname{ch} \gamma x + \underline{I}_2 \cdot \underline{z}_c \operatorname{ch} \gamma x \\ \underline{I} &= \frac{\underline{U}_2}{\underline{z}_c} \cdot \operatorname{ch} \gamma x + \underline{I}_2 \cdot \operatorname{ch} \gamma x \end{aligned} \right\} \quad (22.12)$$

Для ідеальної лінії  $\underline{\gamma} = j\omega\sqrt{L_0 \cdot C_0} = j\beta$ , тобто  $\alpha = 0$ , таким чином амплітуди напруги і струму при поширенні хвилі вздовж лінії не згасають.

Хвильовий опір ідеальної лінії буде мати вигляд:

$$\underline{z}_c = \sqrt{L_0 \cdot C_0} = z_c \quad (22.13)$$

тобто є дійсним числом, а отже струм і напруга прямої та оберненої хвиль збігаються по фазі.

Рівняння ідеальної лінії значно спрощуються. Їх можна записати через синусоїдні функції:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U} &= \underline{U}_2 \cdot \cos \beta x + j \underline{I}_2 z_c \cdot \sin \beta x \\ \underline{I} &= \underline{I}_2 \cdot \cos \beta x + j \underline{U}_2 \frac{1}{z_c} \cdot \sin \beta x \end{aligned} \right\} \quad (22.14)$$

Розглянемо узгоджений режим ідеальної лінії . Для цього включимо на кінці лінії активний опір, який дорівнює хвильовому опору. Тоді рівняння лінії будуть мати вигляд :

$$\underline{U} = \underline{U}_2 \cdot e^{-j\beta x}, \quad \underline{I} = \underline{I}_2 \cdot e^{-j\beta x} \quad (22.15)$$

де :  $\underline{U}_2 = \underline{I}_2 \cdot z_c$  .

Таким чином в лінії будуть присутні тільки прямі біжучі хвилі напруги і струму , які будуть збігатися по фазі у будь-якій точці лінії .

Коефіцієнт корисної дії лінії в цьому режимі буде дорівнювати 100% , тобто вся енергія від джерела буде передаватися до приймача і повністю в ньому поглинатися.

Можна створити такі умови, при яких енергія вздовж лінії не буде переміщуватись і не надходити до приймача. Для цього потрібно закоротити приймач, або відключити його, або включити чисто реактивний приймач. Режим лінії в кожному з цих трьох випадків називають режимом стоячих хвиль. Коливання енергії відбувається між електричним і магнітним полями лінії на кожній ділянці кола, яка дорівнює чверті довжини хвилі, а максимальний запас енергії в магнітному полі дорівнює максимальному запасу енергії в електричному полі цього відрізка лінії. Аналогічні явища відбуваються при резонансі у ідеальному коливальному контурі. Таким чином, можна вважати, що стоячі хвилі виникають як результат накладання двох зустрічних біжучих хвиль з однаковими амплітудами.

Характерним для режиму стоячих хвиль є наявність в лінії *вузлів хвиль*, тобто точок, в яких коливання напруги або струму відсутні та *пучностей хвиль*, тобто точок, в яких коливання напруги і струму лінії відбувається з максимальною амплітудою, яка дорівнює  $\sqrt{2}U_1$  і  $\sqrt{2}I_1$ , відповідно.

Найближчий вузол хвилі струму знаходиться від найближчого вузла напруги на відстані, що дорівнює чверті довжини хвилі і навпаки. Напруга і струм в будь-якій точці лінії в режимі стоячих хвиль зсунуті по фазі на  $90^\circ$ .

Припустимо, що лінія без втрат замкнута на реактивний опір. З рівнянь ( 22.14 ) при  $\underline{U}_2 = jx_2 \cdot \underline{I}_2$  будемо мати :

$$\left. \begin{aligned} \underline{U} &= \underline{U}_2 \left( \cos \beta x + \frac{z_c}{x_2} \cdot \sin \beta x \right) \\ \underline{I} &= \underline{I}_2 \left( \cos \beta x + \frac{x_2}{z_c} \cdot \sin \beta x \right) \end{aligned} \right\} \quad (22.16)$$

Або в іншій формі запису

$$\left. \begin{aligned} \underline{U} &= \underline{U}_2 \sqrt{1 + \left(\frac{z_c}{x_2}\right)^2} \cdot \cos(\beta x - \varphi) \\ \underline{I} &= -\underline{I}_2 \sqrt{1 + \left(\frac{x_2}{z_c}\right)^2} \cdot \sin(\beta x - \varphi) \end{aligned} \right\} \quad (22.17)$$

де :  $\varphi = \operatorname{arctg} \frac{z_c}{x_2}$  ;

Амплітуда напруги і струму в різних точках лінії будуть мати вигляд:

$$\left. \begin{aligned} U_m &= \sqrt{2} \cdot U_2 \sqrt{1 + \left(\frac{z_c}{x_2}\right)^2} \cdot \cos(\beta x - \varphi) \\ I_m &= \sqrt{2} \cdot I_2 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{x_2}{z_c}\right)^2} \cdot \sin(\beta x - \varphi) \end{aligned} \right\} \quad (22.18)$$

Звідси випливає , що вузли напруги будуть знаходитись в точках , де функція  $\cos(\beta x - \varphi) = 0$  ,

$$\text{тобто } \beta x_m = (2m + 1) \frac{\pi}{2} + \varphi , \quad x_m = (2m + 1) \frac{\lambda}{4} + \frac{\varphi}{2} \pi , \quad (22.20)$$

де  $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

Для лінії з малими втратами

$$\begin{aligned} \omega L_0 \gg r_0 , \quad \omega C_0 \gg g_0 ; \\ z_c = \sqrt{\frac{r_0 + j\omega L_0}{g_0 + j\omega C_0}} \approx \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \end{aligned} \quad (22.21)$$

Коефіцієнт поширення хвилі

$$\underline{\gamma} = \sqrt{(r_0 + j\omega L_0) \cdot (g_0 + j\omega C_0)} = j\omega \sqrt{L_0 \cdot C_0} \cdot \sqrt{1 - j \frac{r_0}{\omega L_0}} \cdot \sqrt{1 - j \frac{g_0}{\omega C_0}} \quad (22.22)$$

Використовуючи розклад  $\sqrt{1 + \Delta} = 1 + \frac{\Delta}{2} - \frac{\Delta^2}{4} \dots$  , при  $\Delta \ll 1$  будемо мати:

$$\sqrt{1 - j \frac{r_0}{\omega L_0}} \approx 1 - j \frac{r_0}{2\omega L_0} \quad (22.23)$$

$$\sqrt{1 - j \frac{g_0}{\omega C_0}} \approx 1 - j \frac{g_0}{2\omega C_0} \quad (22.24)$$

Підставляючи ( 22.23 ) і ( 22.24 ) і нехтуючи членами другого порядку малості , одержимо :

$$\underline{\gamma} \approx \frac{r_0}{2} \sqrt{\frac{C_0}{L_0}} + \frac{g_0}{2} \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} + j\omega \sqrt{L_0 \cdot C_0} \quad (22.25)$$

Звідки  $\alpha \approx \frac{r_0}{2z_c} + \frac{g_0}{2} z_c ; \beta \approx \omega \sqrt{L_0 C_0} ; U = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} ;$

Якщо провідність ізоляції дуже мала , то

$$\alpha = \frac{r_0}{2z_c} \quad (22.26)$$

Погонні параметри лінії при умові , що відстань між проводами  $D$  набагато більша радіуса проводу  $a$  :

$$C_0 = \frac{\pi \cdot E_0}{\ln \frac{D}{a}} ; \quad L_0 = \frac{\mu_0}{4\pi} \ln \frac{D}{a} ; \quad z_c = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_0}} \ln \frac{D}{a} = 2761 \ln \frac{D}{a} ;$$

$$r_0 = \frac{1}{\pi a} \sqrt{\frac{\pi f \mu}{\gamma}} \quad (22.27)$$

де :  $\gamma$  - питома провідність проводів ;

$\mu$  - магнітна проникність проводів ;

Якщо лінія виконана з мідних проводів то вирази для  $r_0$  та  $\alpha$  , можна записати в спрощеному вигляді :

$$r_0 \approx \frac{8,3\sqrt{f}}{a} \cdot 10^{-8} ; \quad \alpha \approx 1,5 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\sqrt{f}}{a \ln \frac{D}{a}} ;$$

де  $f$  - прийнято в герцах ;  $a$ - в сантиметрах .

### Література :

1. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Теоретические основы электротехники . Т.1 – М.Л ; Энергия , 1967 , С.470-488.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники .-М.: Высшая школа , 1967 С. 454-477.
3. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Т.1-М.: Энергия , 1964 ,С. 170-188.

## Порядок виконання роботи

1. Включити генератор в схемі ( рис.22.2 ) і з допомогою вимірювальної чвертьхвильової лінії зняти криву розподілення напруги вздовж довгої лінії в режимах : холостого ходу , короткого замикання , активного навантаження  $z_2 = 470 \text{ Ом}$  ;

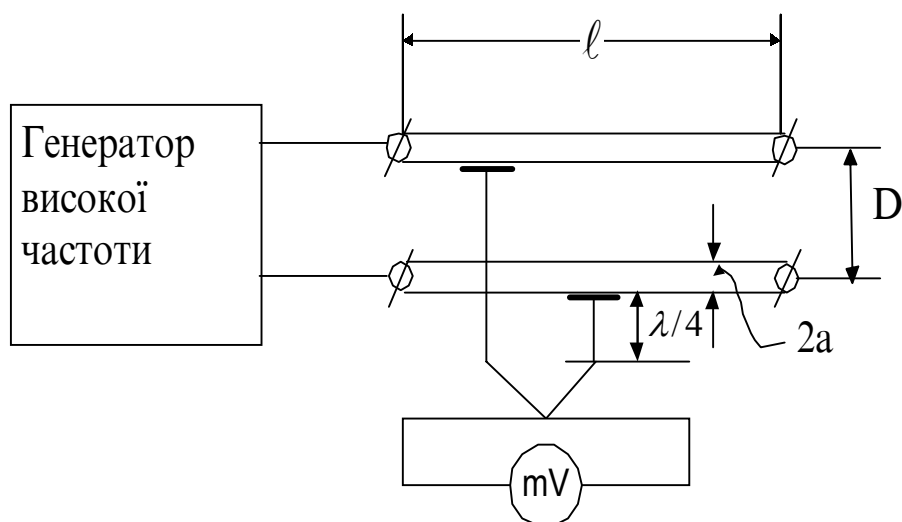


Рисунок 22.2

$$l = 530 \text{ см}$$

$$D = 7 \text{ см}$$

$$a = 0,2 \text{ см}$$

Примітка : Вимірювання необхідно проводити через 10 см , фіксуючи при цьому найточніше положення вузлів і пучностей напруги. Всі вимірювання потрібно починати від кінця лінії. Під час вимірювань потрібно слідкувати, щоб вимірювальна лінія була розташована під прямим кутом до дослідженої лінії .

Результати вимірювань звести в табл. 22.1:

Таблиця 22.1.

Відстань від початку лінії , ( см )						
Х.Х.						
К.З.						
Активне навантаження						

## Обробка результатів досліду

1. За геометричними вимірами двопровідної лінії потрібно обчислити її первинні параметри :  $L_0, C_0, r_0$  ;
2. Обчислити хвильовий опір лінії  $Z_c$  , постійну передачі  $\underline{\gamma}$  , коефіцієнти затухання  $\alpha$  та фази  $\beta$  ( врахувати , що  $r_0 \ll \omega L_0$  і  $g_0 = 0$  ) .
3. За даними досліду потрібно побудувати графік розподілення напруги вздовж лінії для кожного з режимів .
4. Зробити висновки по роботі .

## Контрольні питання:

1. Які кола називаються колами з розподіленими параметрами?
2. Які величини відносяться до первинних параметрів довгих ліній? Який фізичний зміст цих параметрів?
3. Наведіть рівняння, що описують процеси в колах з розподіленими параметрами.
4. Які величини відносяться до вторинних параметрів довгих ліній? Який фізичний зміст цих параметрів? Наведіть зв'язок між первинними та вторинними параметрами.
5. Що являють собою падаючі та відбиті хвилі напруги та струму?
6. В якому випадку в лінії відсутні відбиті хвилі?
7. Які лінії можна вважати лініями без втрат?
8. Наведіть умови виникання в лінії стоячих хвиль.
9. Як дослідним шляхом визначити довжину хвилі і частоту генератора, що живить лінію?

## Лабораторна робота №23

### Дослідження магнітного поля циліндричної котушки без магнітопроводу

**Мета роботи :** визначити експериментальним та аналітичним шляхом розподіл магнітного поля у циліндричній котушці без магнітопроводу, перевірити закон повного струму, засвоїти методи вимірювання напруженості магнітного поля балістичним гальванометром і падіння магнітної напруги за допомогою магнітного пояса .

### Теоретичні положення

Напруженість магнітного поля  $\vec{H}$  у будь-якій точці циліндричної котушки може бути визначена експериментальним і аналітичним шляхом. Розглянемо методику розрахунку напруженості магнітного поля  $\vec{H}$  на осі циліндричної котушки без магнітопроводу.

Сумістимо вісь ОХ з віссю котушки і розташуємо початок координат у центрі котушки. Для наближеного розрахунку напруженості  $\vec{H}$  на осі котушки замінимо реальну багат шарову котушку одношаровою з тією ж кількістю витків, з тією ж довжиною і з тим же радіусом витків, який дорівнює середньому радіусу витків реальної котушки.

Напруженість магнітного поля на осі котушки вираховуємо за законом Біо-Савара-Лапласа. Відповідно цьому закону струм  $I$ , який проходить по лінійному провіднику довжиною  $d\ell$ , створює магнітне поле, яке у точці, віддаленій від елемента  $d\ell$  на відстань  $r$ , має напруженість

$$d\vec{H} = \frac{I}{4\pi} \cdot \frac{[d\vec{\ell} \cdot \vec{r}]}{r^3}, \quad (23.1)$$

де :  $\vec{r}$  - радіус – вектор направлений від елемента струму до точки, в якій визначається напруженість.

Модуль вектора  $d\vec{H}$  визначається з виразу

$$dH = \frac{I}{4\pi} \cdot \frac{d\ell \cdot \sin \alpha}{r^2}, \quad (23.2)$$

де :  $\alpha$  - кут між векторами  $d\vec{\ell}$  та  $d\vec{r}$ .

Вектор  $d\vec{H}$  перпендикулярний до  $d\vec{\ell}$  та радіус-вектора  $\vec{r}$  і направлений у той бік, який визначається правилом правого гвинта.

Спочатку знайдемо напруженість магнітного поля у точці  $A$ , яка лежить на осі колового витка, по котрому тече струм  $I$  ( рис. 23.1 ).

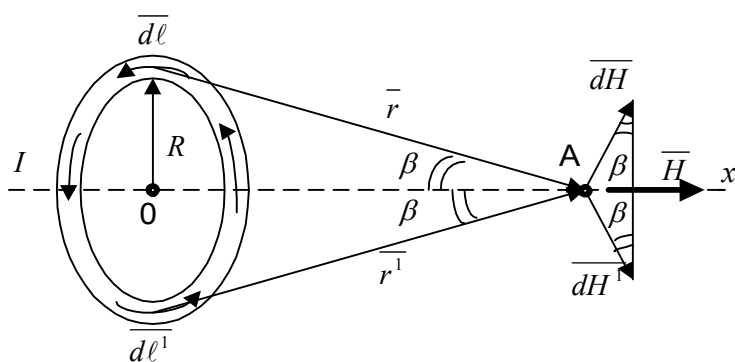


Рисунок 23.1.

Кожні два рівних елементи витка  $\overline{dl}$  і  $\overline{dl}^1$ , що лежать на протилежних кінцях діаметра витка, обумовлюють у точці  $A$  вектори  $\overline{dH}$  і  $\overline{dH}^1$ , складові яких нормальні до осі  $OX$ , взаємно компенсуються. Навпаки, складові цих векторів, що направлені вздовж осі  $OX$ , складаються. Отже виходить, що при обчисленні напруженості магнітного поля  $\overline{H}$  у точці  $A$ , обумовленої струмом у всьому витку, достатньо врахувати тільки складову кожного елементарного вектора  $\overline{dH}$ , що направлена вздовж вісі  $OX$ , яка дорівнює  $\overline{dH} \cdot \sin \beta$ , де  $\beta$  - кут між віссю  $OX$  і радіус-вектором  $\overline{r}$ .

Інтегруючи вираз ( 23.3 ) вздовж всього витка, одержимо формулу для напруженості магнітного поля на осі колового витка

$$H = \oint_{\ell} dH \cdot dl \cdot \sin \beta = \int_0^{2\pi R} \frac{I dl \cdot \sin \beta}{4\pi r^2} = \frac{I \cdot \sin \beta}{4\pi r^2} \cdot 2\pi R = \frac{I \cdot R}{2r^2} \cdot \sin \beta. \quad (23.4)$$

Оскільки  $\sin \beta = \frac{R}{r}$ , тоді 
$$H = \frac{I}{2} \cdot \frac{R^2}{r^3} = \frac{I}{2R} \cdot \sin^3 \beta \quad (23.5)$$

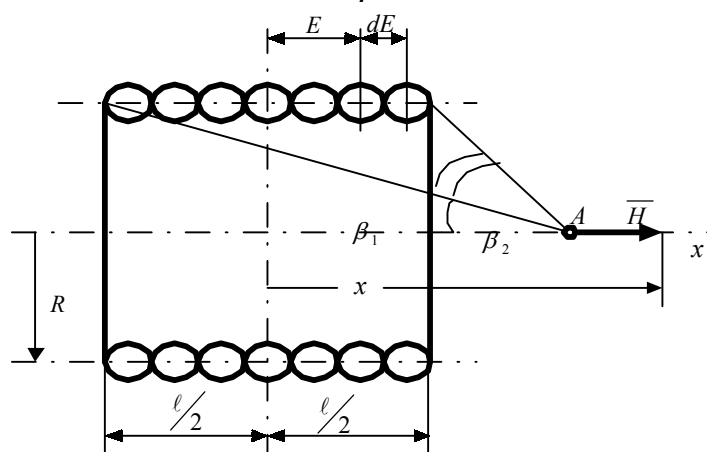


Рисунок 23.2

Нехай  $R$  - радіус витка.  
Для точок, що лежать на осі витка,  $\alpha = 90^\circ$  і  $r \perp dl$

$\sin \alpha = 1$ , тоді :

$$dH = \frac{I \cdot dl}{4\pi r^2} \quad (23.3)$$

Використовуючи вираз ( 23.5), знайдемо напруженість магнітного поля у точці  $A$ , яка лежить на осі одношарової котушки, яка має довжину  $\ell$ , число витків  $W$  і радіус витків  $R$  ( рис. 23.2 ).

Виділимо елемент довжини котушки  $dE$ . Його можна розглядати як дуже тонкий коловий контур зі струмом

$$di = \frac{I \cdot W}{\ell} \cdot dE. \quad (23.6)$$

Відповідно з ( 23.5 ), напруженість магнітного поля, яка буде викликана цим струмом становить

$$dH = \frac{di}{2R} \cdot \sin^3 \beta \quad (23.7)$$

Напруженість  $H$  у точці  $A$ , що створюється струмом всієї котушки, знайдемо інтегруванням виразу ( 23.7 ) по довжині всієї котушки , тобто :

$$H = \int_{-\ell/2}^{\ell/2} \frac{I^2 \cdot W}{2\ell} \cdot \frac{\sin^3 \beta}{R} \cdot dE ,$$

де  $\frac{x - E}{R} = \operatorname{ctg} \beta$  , тоді  $\frac{dE}{R} = \frac{d\beta}{\sin^2 \beta}$  .

Таким чином

$$H = \frac{IW}{2\ell} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \sin \beta \cdot d\beta = \frac{IW}{2\ell} (\cos \beta_1 - \cos \beta_2) \quad (23.8)$$

де:  $\beta_1, \beta_2$  - крайні значення  $\beta$  , які відповідають краям котушки ( рис.23.2 ).

Косинуси цих кутів можна визначити за формулами :

$$\cos \beta_1 = \frac{x + \ell/2}{\sqrt{R^2 + (x + \ell/2)^2}} , \quad \cos \beta_2 = \frac{x - \ell/2}{\sqrt{R^2 + (x - \ell/2)^2}} \quad (23.9)$$

де:  $x$  - відстань точки  $A$  до середини котушки .

### Література

1. Нейман Л.Р. , Демирчан К.С. Теоретические основы электротехники . т.2.- М.,Л.: Энергия , 1967 , с.270.
2. Нейман Л.Р. , Демирчан К.С., Юринов В.М. Руководство к лаборатории электромагнитного поля .-М.: Высшая школа , 1966 , с.31,245,249,253.

### Порядок виконання роботи:

1. Для експериментального визначення напруженості магнітного поля  $H$  потрібно зібрати схему відповідно рис.23.3.

а) При розімкненні кола соленоїда (котушки що досліджується) ключем  $K_1$  потрібно виміряти відхилення  $\alpha$  по шкалі балістичного гальванометра БГ, який підключений до кола вимірювальної котушки, розміщуючи останню послідовно в точках  $A, B, C, D, E$  на осі котушки.

б) Аналогічно вимірюють відхилення  $\alpha$  гальванометра, розміщуючи вимірювальну котушку в точках  $K, L, M$  зовні соленоїда. Дані вимірювань записати у таблиці 23.1.

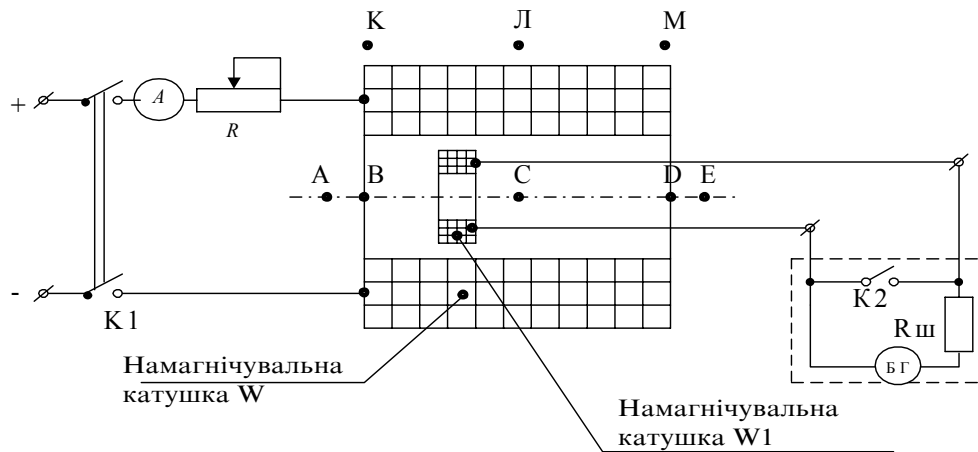


Рисунок 23.3

Всі вимірювання роботи при трьох значеннях струму в котушці.

2. Для вимірювання магнітної сили  $F$  і падіння магнітної напруги  $H \cdot \ell$  за допомогою магнітного пояса потрібно зібрати схему відповідно рис. 23.4.

а) При вимиканні соленоїда ключем  $K1$  потрібно виміряти значення відхилення  $\alpha$  по шкалі балістичного гальванометра БГ, який включений в коло магнітного пояса, розміщуючи останній вздовж замкнутого шляху  $AnBmA$ , який обіймає всі витки соленоїда.

m

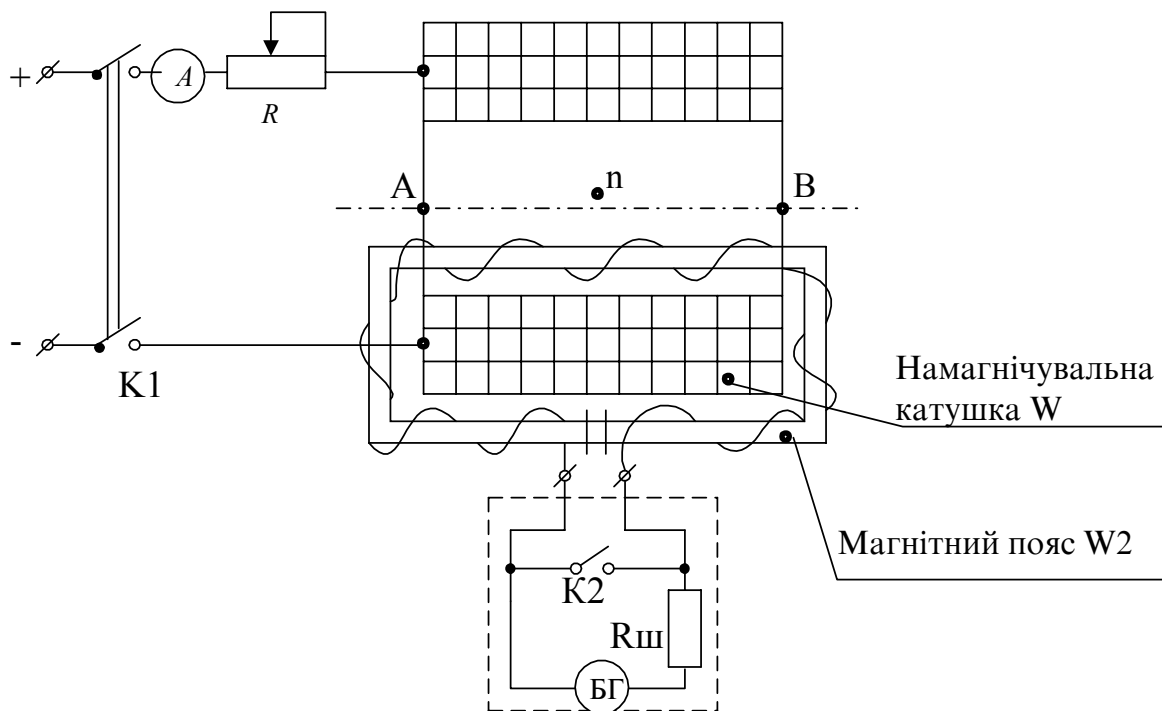


Рисунок 23.4.

Таблиця 23.1

№	Струм А	Величина	Одиниця Вимірю- ван-ня	Точки								
				А	В	С	Д	Е	К	Л	М	
1.		$\alpha$	поділ.	вим.								
		Н	А/м	вим.								
		Н	А/м	розр.								
2.		$\alpha$	поділ.	вим.								
		Н	А/м	вим.								
		Н	А/м	розр.								
3.		$\alpha$	поділ.	вим.								
		Н	А/м	вим.								
		Н	А/м	розр.								

б) Аналогічно вимірюють відхилення  $\alpha$  гальванометра, розміщуючи магнітний пояс всередині котушки між точками А і В. В цьому випадку пояс вкладають в середині котушки таким чином, щоб один його кінець був на одному рівні з одним торцем котушки, а другий вигинають і прикладають до другого кінця котушки.

в) Виміряти відхилення  $\alpha$  гальванометра, розміщуючи магнітний пояс зовні котушки між точками А і В. В цьому випадку весь пояс розміщується зовні котушки, а його кінці прикладають до торців котушки з обох боків.

Всі вимірювання виконуються при тих же значеннях струму, що і в першому експерименті. Результати вимірювання записати в таблицю 23.2.

Таблиця 23.2

№	Струм	Величина	Одиниця вимірюван- ня	Виміри		
				вздовж шля- ху АnВmА	всередині ко- тушки АnВ	зовні котушки АmВ
1		$\alpha$	поділ.			
		F	А			
2		$\alpha$	поділ.			
		F	А			
3		$\alpha$	поділ.			
		F	А			

## Обробка результатів досліду

1. За даними досліду 1 вирахувати напруженість магнітного поля  $H$  для всіх точок і значень струму за формулою

$$H = \frac{C_{\psi}}{\mu_0 \cdot S_1 \cdot W_1} \cdot \alpha \quad (23.10)$$

де :  $C_{\psi}$  - балістична постійна гальванометра при вимірюванні потоку;  
 $S_1$  - площа перерізу, яка обіймається середнім витком вимірювальної котушки;  $W_1$  - число витків вимірювальної котушки.

2. Вирахувати напруженість магнітного поля  $H$  на осі соленоїда в точках А, В, С, D і Е за законом Біо–Савара –Лапласа за формулою ( 23.8 ). Результати вимірювань і розрахунків записати у таблицю 23.1 і порівняти.

3. За даними досліду 2 вирахувати магніторухійну силу  $F$  вздовж замкненого шляху  $AnBmA$  а також його ділянок  $AnB$  та  $AmB$  за формулою

$$F = C \cdot C_{\psi} \cdot \alpha = K \cdot \alpha \quad (23.11)$$

де :  $C$  - постійна магнітного пояса ;

$K$  - постійна системи магнітний пояс-гальванометр.

Переконатися у справедливості закону повного струму.

Дані для розрахунків :  $D_{cp} = 53,5$  мм ;  $d_{cp} = 32,5$  мм;  $W = 520$  ;  
 $W_1 = 650$  ;

### Контрольні питання:

1. Які основні величини характеризують магнітне поле? Наведіть зв'язок між ними.
2. Як визначити величину і напрямок напруженості магнітного поля за законом Біо-Савара- Лапласа.
3. Як вимірюється напруженість магнітного поля за допомогою балістичного гальванометра?
4. Як вимірюється спад магнітної напруги за допомогою пояса Роговського та балістичного гальванометра?

## Лабораторна робота №24

### Дослідження переломлення силових ліній стаціонарного електричного поля на границі розділу двох середовищ

**Мета роботи:** дослідити характер переломлення силових ліній стаціонарного електричного поля на границі розділу двох середовищ з різними питомими опорами і засвоєння методики моделювання електричних полів на електропровідному папері.

#### Теоретичні положення

Основною характеристикою електропровідного паперу є питомий поверхневий опір на квадрат  $R_{\square}$ . Він дорівнює опору квадратного листа незалежно від його розмірів:

$$R_{\square} = \rho \cdot \frac{\ell}{\ell \cdot h} = \frac{\rho}{h} \quad (24.1)$$

де  $\rho$  - питомий опір матеріала листа  $[\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{М}}]$ ;

$\ell$  - розмір листа по ширині і по довжині ;

$h$  - товщина листа .

Величина  $R$  має розмірність опору і вимірюється у омах.

Електричне поле на границі розподілу двох провідникових середовищ підпорядковується таким граничним умовам [1] :

1. Дотичні складові вектора напруженості електричного поля на границі розділу обох середовищ збігаються:

$$E_{\tau_1} = E_{\tau_2} \quad (24.2)$$

2. На границі розділу обох середовищ нормальні складові вектора густини струму дорівнюють одне одному :

$$\delta_{n_1} = \delta_{n_2} \quad (24.3)$$

або згідно із законом Ома  $\gamma_1 \cdot E_{n_1} = \gamma_2 \cdot E_{n_2}$

звідки  $\frac{E_{n_1}}{E_{n_2}} = \frac{\gamma_2}{\gamma_1}$  ;  $\frac{E_{n_1}}{E_{n_2}} = R1_{\square} / R2_{\square}$  (24.4)

З цих умов випливає відомий закон переломлення силових ліній:

$$\frac{\text{tg} \theta_1}{\text{tg} \theta_2} = R1_{\square} / R2_{\square} \quad (24.5)$$

де  $\theta_1$  і  $\theta_2$  - кути в обох середовищах між лініями струму та нормальними до поверхні розділу.

Лінії рівного потенціалу також переломлюються на колі, яке розподіляє листи електропровідного паперу з різною  $R$ . Позначимо через  $\theta_1^1$  і  $\theta_2^1$  кути, які складаються дотичними до лінії рівного потенціалу з лежачою у площині листа нормаллю до лінії розділу обох середовищ. Оскільки лінії напруженості поля завжди перпендикулярні до ліній рівного потенціалу, то будуть мати місце такі співвідношення:

$$\theta_1^1 = \frac{\pi}{2} - \theta_1 ; \theta_2^1 = \frac{\pi}{2} - \theta_2 \quad (24.6)$$

Таким чином ми одержимо закон переломлення екіпотенціальних ліній

$$\frac{\operatorname{tg} \theta_1^1}{\operatorname{tg} \theta_2^1} = R_{\square 1} / R_{\square 2} \quad (24.7)$$

В свою чергу між тангенсами кутів падіння силових і екіпотенціальних ліній існують відомі співвідношення

$$\operatorname{tg} \theta_1 = \frac{1}{\operatorname{tg} \theta_1^1} = \frac{E_{\tau 1}}{E_{n 1}} \quad \text{і} \quad \operatorname{tg} \theta_2 = \frac{1}{\operatorname{tg} \theta_2^1} = \frac{E_{\tau 2}}{E_{n 1}} \quad (24.8)$$

В зв'язку з тим, що струм до електропровідного паперу підводиться за допомогою двох масивних алюмінієвих електродів, які мають малий електричний опір, можна наближено вважати, що вони є лініями рівного потенціалу, а поле у електропровідному листі є плоскопаралельним.

У роботі досліджується стаціонарне електричне поле у сусідніх середовищах з таким співвідношенням параметрів  $R_1=2R_2$ .

Характер поля в цьому випадку визначається стаціонарними зарядами, котрі наводяться на поверхні розділу і ослаблюють поле всередині кола. Таким чином напруженість електричного поля в середині кола зменшується пропорційно відношенню опорів електропровідного паперу зовні і всередині кола  $R_{1 \square} / R_{2 \square}$ .

Для зняття екіпотенціальних ліній використовується одинарний зонд. Потенціометром  $R$  задаємо потенціали з кроком  $\Delta U=1B$ . Одинарним зондом, з'єднаним з нуль-індикатором, починаючи з лівого або правого краю моделі, відшукуємо точки рівного потенціалу. Плавна з'єднуючи між собою знайдені точки, отримуємо екіпотенціальні лінії.

Для побудови силових ліній використовується подвійний зонд з базою 5мм. Суміщаючи середину зонда з заданою точкою поля і повертаючи зонд навколо неї, знаходимо положення, при якому стрілка мілівольтметра установлюється на нулі. Це буде означати, що електроди зонда розташовані вздовж екіпотенціальної лінії і вектор  $\vec{E}$  лежить на прямій, яка збігається зі стрілкою подвійного зонда. Залишається встановити, чи збіга-

ється цей напрямок стрілки подвійного зонда з напрямком вектора  $\vec{E}$  або протилежний йому. Для цього злегка повернемо зонд за годинниковою стрілкою і помітимо в якому напрямку відхиляється стрілка приладу .

Відхилення вправо означає, що падіння потенціалу навколо дослідної точки відбувається в напрямку стрілки. Тобто в вихідному положенні ця стрілка вказувала напрямок вектора  $\vec{E}$  . Відхилення стрілки приладу вліво вказує , що падіння потенціалу навколо зонда відбувається у оберненому напрямку і вектор  $\vec{E}$  направлений протилежно стрілці подвійного зонда .

Визначивши напрямок вектора  $\vec{E}$  у вихідній точці , переміщуємо подвійний зонд в цьому напрямку і повторюємо дослід . Потім знову переміщуємо зонд в напрямку вектора  $\vec{E}$  і визначимо його напрямок у третій точці і т.д.. Лінія, вздовж якої буде переміщуватись середня точка зонда, буде вказувати розташування силової лінії поля, яка буде проходити через вихідну точку [ 2 ] .

Для експериментальної перевірки законів переломлення силових і еквівалентних ліній необхідно виміряти нормальну  $E_n$  і тангенційну  $E_\tau$  складові напруженості електричного поля. Для цього проведемо олівцем вісім відрізків радіальних прямих, які будуть відображати нормалі до лінії розділу двох середовищ. Розташовуючи подвійний зонд з обох боків від границі розділу так, щоб лінія, яка з'єднує електроди зонда, збігалася з нормаллю до границі, з'ясуємо, що нормальні складові вектора  $\vec{E}$  в різних точках мають різні значення, але їх відношення відповідає другій граничній умові і для кожної моделі однакові. Наявність стрибка нормальної складової вектора  $\vec{E}$  означає, що поверхня розподілу двох середовищ вкрита стаціонарними електричними зарядами.

Для перевірки другої граничної умови подвійний зонд розташовуємо так, щоб лінія, яка з'єднує електроди, була направлена по дотичній до поверхні розділу (перпендикулярна до нормалі) і вимірюємо дотичні складові вектора  $\vec{E}$  з обох боків від границі розділу. Хоч значення  $E_\tau$  в різних точках границі розділу будуть різні, але їх значення в двох близьких точках, що розташованих з обох боків від границі розділу, повинні бути однакові , що відповідає другій граничній умові .

## Описання дослідної установки

Установка складається з прямокутного листа низькоомного електропровідного паперу, в центрі якого наклеєний кружок того ж паперу діаметром 22 см. Два протилежних краї моделі затиснуті за допомогою алюмінієвих електродів, з'єднаних з клемми.

Питомі поверхневі опори зовнішніх частин моделі і внутрішнього кола відповідають такому співвідношенню  $R_1 = 2 R_2$ .

Між електродами моделі пропускається постійний струм, який підтримується незмінним протягом досліду. Джерело живлення – акумуляторна батарея напругою 10 В. Вся вимірювальна схема ( рис. 24.1 ) зібрана у одному блоці з дослідною моделлю .

### Література.

1. Нейман Л.Р. , Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Т.2, с.199-271.
2. Рязанов Г.А. Опыты и моделирование при изучении электромагнитного поля. с.47-49, 73-79 .
3. Нейман Л.Р. и др. Руководство к лаборатории электромагнитного поля. с. 16-27.

### Порядок виконання роботи .

1. Включити живлення моделі ( рис.24.1. ) .
2. Потенціометром R задати потенціали ліній через 1 В.

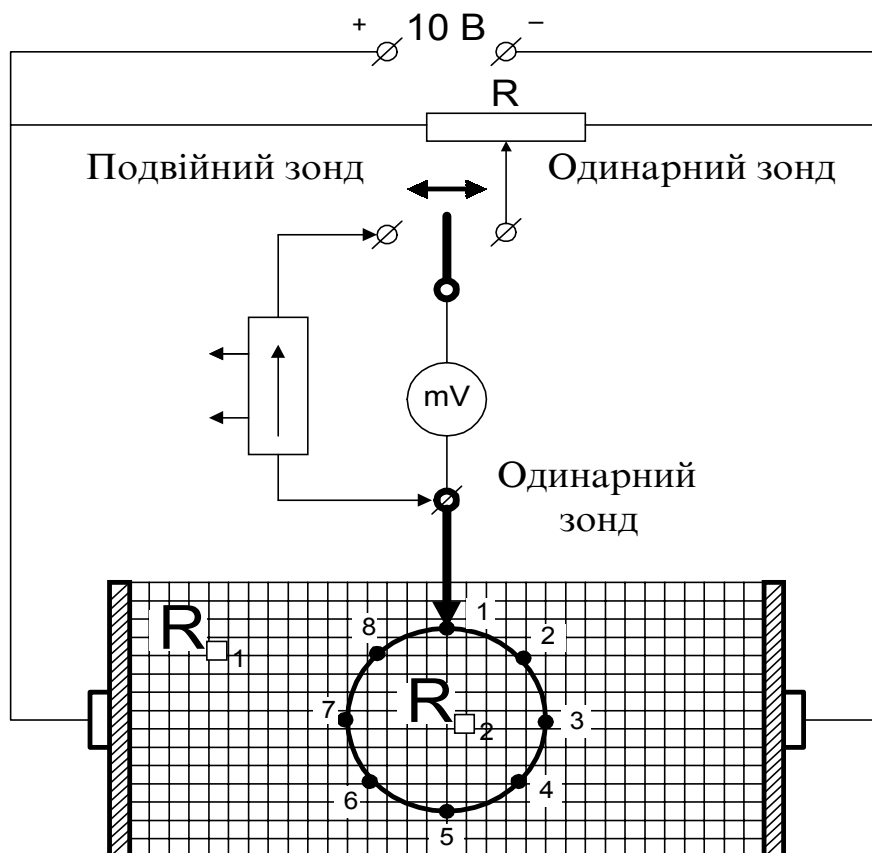


Рисунок 24.1.

3. Включити тумблер в положення “ Одинарний зонд ” і за допомогою одинарного зонда і нуль-індикатора знайти на моделі екіпотенціальні лінії, які відповідають заданим потенціалам. За початкову лінію прийняти лінію, проведenu вздовж внутрішнього краю одного з кутків.
4. Знайдені точки екіпотенціальних ліній нанести на міліметровий папір, зберігаючи нумерацію ліній і координатної сітки електропровідного паперу.
5. Включити тумблер в положення “ Подвійний зонд ” і за допомогою подвійного зонда та мілівольтметра знайти силові лінії електричного поля, яке утворюється двома паралельними електродами на моделі. Особливо ретельно необхідно досліджувати силові лінії на границі розділу двох середовищ .
6. Знайдені точки силових ліній нанести на той же міліметровий папір, де відмічались точки екіпотенціальних ліній моделі.
7. У восьми точках з обох боків границі розділу середовищ за допомогою подвійного зонда виміряти нормальну  $E_n$  і тангенційну  $E_\tau$  складові напруженості електричного поля.
8. Результати вимірювань занести в табл. 24.1.

Таблиця 24.1.

Точки вимірювань	$E_n$		$E_\tau$	
	внутр.	зовн.	внутр.	зовн.

### **Обробка результатів досліду**

1. Відповідно до експериментальних даних побудувати на міліметровому папері кольоровими олівцями зняту картину електричного поля: лінії рівного потенціалу і силової лінії .
2. Пояснити характер переломлення екіпотенціальних і силових ліній поля на границі розділу двох середовищ .
3. Перевірити теоретичні граничні умови і закони переломлення силових ліній на границі розділу двох середовищ .
4. Дати висновки по роботі .

### **Контрольні питання;**

1. Дайте визначення напруженості та потенціалу електричного поля та наведіть зв'язок між ними.
2. Наведіть граничні умови електричного поля.
3. За допомогою яких ліній графічно зображаються електричні поля?
4. Поясніть методику експериментального визначення картини електричного поля.

## Лабораторна робота №25

### Моделювання електричного поля двопровідної лінії на електропровідному папері

**Мета роботи** : дослідити електричне поле двопровідної лінії передачі на моделі і переконатися в існуванні аналогії між електричним полем постійного струму у провідному середовищі та електростатичним полем у діелектрику .

#### Теоретичні положення

Між величинами, що характеризують електричне поле постійних струмів у провідному середовищі зовні джерел енергії та величинами, які характеризують електростатичне поле у діелектрику поза зарядами, існує формальна аналогія і збігаються граничні умови.

Формальна аналогія встановлюється за видом рівнянь:

1) електричне поле у провідному середовищі:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \bar{E} &= 0 ; \quad \int_B^A \bar{E} \cdot d\bar{\ell} = \varphi_A - \varphi_B ; \quad \bar{\delta} = \gamma \bar{E} ; \\ \operatorname{div} \bar{\delta} &= 0 ; \quad \oint_S \bar{\delta} \cdot d\bar{S} = i ; \end{aligned}$$

2) електростатичне поле у діелектрику :

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \bar{E} &= 0 ; \quad \int_B^A \bar{E} \cdot d\bar{\ell} = \varphi_A - \varphi_B ; \quad \bar{D} = \varepsilon_a \bar{E} ; \\ \operatorname{div} \bar{D} &= 0 ; \quad \oint_S \bar{D} \cdot d\bar{S} = q ; \end{aligned}$$

з яких виходить, що вектору електричного зміщення  $\bar{D}$  у електростатичному полі відповідає вектор густини електричного струму  $\bar{\delta}$ , заряду  $q$  - струм  $i$ ,  $\varepsilon \rightarrow \gamma$  і т.д.. Крім того, у електричному полі провідне тіло, яке межує з діелектриком, є поверхнею рівного потенціалу, таким чином вектор  $\bar{D}$  до неї нормальний. При протіканні струму у середовищі з дуже малою питомою провідністю можна знехтувати падінням напруги в середині провідного тіла з високою провідністю і вважати його поверхнею рівного потенціалу.

При цих умовах картина поля провідного середовища буде збігатися з картою електростатичного поля, що оточує заряджене тіло. Установлена аналогія дозволяє замінити дослідження електростатичного поля в ді-

електричному середовищі експериментальним дослідженням поля струмів у провідному середовищі і навпаки.

В роботі двопровідна лінія представлена двома циліндричними нескінченно довгими електродами з нескінченно великою питомою провідністю, які оточує середовище з дуже малою питомою провідністю. Для дослідження картини поля двопровідної лінії достатньо дослідити плоскопаралельне поле, створене двома електродами у електропровідному папері, розташованому нормально до електродів. Як виходить з [ 2 ], при пропусканні струму через електропровідний папір від електрода I до електрода II лініями струму в ньому будуть кола, що проходять через електроди, а лініями рівного потенціалу – також кола з центрами на прямій, яка проходить через осі електродів.

Дослід полягає в тому, щоб одержати на електропровідному папері сімейство ліній рівного потенціалу. Для цього на електроди I і II електропровідного паперу подається постійна напруга 10 В. Для зняття екіпотенціальних ліній використовується одинарний зонд. Потенціометром R задаємо потенціали з кроком  $\Delta U=1\text{В}$ . Одинарним зондом, що з'єднаний з нуль-індикатором, починаючи з лівого або правого електродів, відшукуємо точки рівного потенціалу. Для симетричного розташування екіпотенціальних ліній за нульову точку вибираємо точку O, яка лежить на середині відстані між I та II електродами.

Для побудови силових ліній використовується подвійний зонд з базою 5 мм. Суміщаючи середину зонда з заданою точкою поля і повертаючи зонд навколо неї, знаходимо положення, при якому стрілка мілівольтметра устанавлюється на нулі. Це буде означати, що електроди зонда розташовані вздовж екіпотенціальної лінії і вектор  $\vec{E}$  лежить на прямій, яка збігається з стрілкою подвійного зонда. Залишається встановити чи збігається цей напрямок стрілки подвійного зонда з напрямком вектора  $\vec{E}$  або протилежний йому. Для цього злегка повернемо зонд за годинниковою стрілкою і помітимо в якому напрямку відхиляється стрілка приладу. Відхилення стрілки приладу вправо означає, що падіння напруги навколо дослідної точки відбувається в напрямку стрілки, таким чином в вихідному положенні ця стрілка вказує на напрямок вектора  $\vec{E}$ . Відхилення стрілки приладу вліво вказує, що падіння напруги навколо зонда відбувається у оберненому напрямку і вектор  $\vec{E}$  прямує протилежно стрілці подвійного зонда.

Визначивши напрямок вектора  $\vec{E}$  у вихідній точці, переміщуємо подвійний зонд в цьому напрямку і повторюємо дослід. Потім знову переміщуємо зонд в напрямку вектора  $\vec{E}$  і визначимо його напрямок у третій точці і т.д. Лінія, вздовж якої буде переміщуватись середня точка зонда,

вказує розташування силової лінії поля, яка буде проходити через вихідну точку [ 2 ] .

Рівняння лінії рівного потенціалу двопровідної лінії має вигляд :

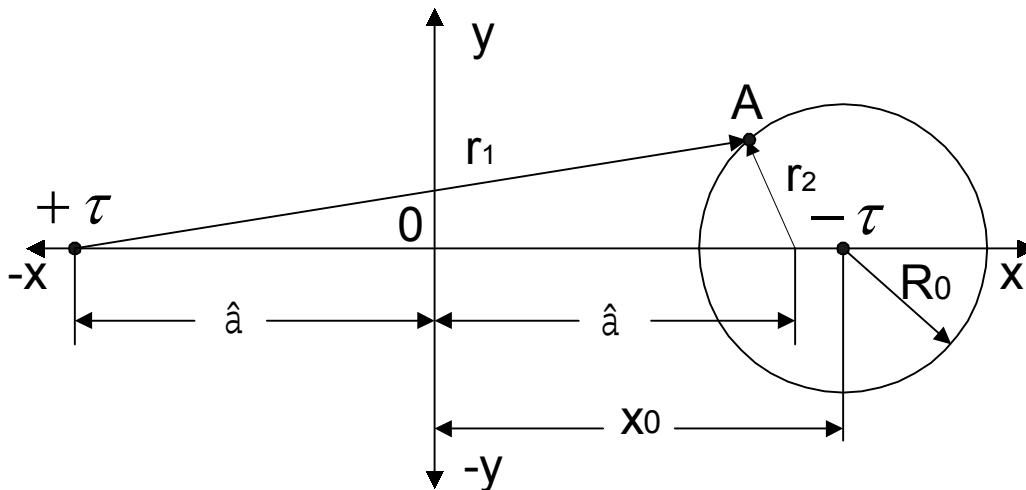
$$\varphi = \frac{\tau}{2\pi\epsilon} \ln \frac{r_2}{r_1} = const \quad \text{або} \quad \frac{r_2}{r_1} = k = const \quad (25.1)$$

і описує коло з центром на осі  $OX$  ( рис. 25.1 ) з координатою центра

$$x_0 = \frac{1+k^2}{1-k^2} \cdot \hat{a} \quad (25.2)$$

і радіусом

$$R_0 = \frac{2k}{|1-k^2|} \cdot \hat{a} \quad (25.3)$$



В зв'язку з тим, що радіус електродів значно менший в порівнянні з відстанню між ними, електричні осі  $\tau$ , які відображають лінії, можна вважати збіжними з геометричними осями електродів. Число  $k$  дорівнює відношенню відстаней від будь-якої точки  $A$  взятої на лінії рівного потенціалу, до електричних осей  $\tau$  електродів. Для середньої лінії  $k=1$ . Визначають  $k$  для крайньої лінії, знятої дослідним шляхом: для наступних ліній число  $k$  вибирають таким чином, щоб приріст потенціалу між сусідніми еквіпотенціальними лініями був однаковим. Для цього повинна виконуватись така умова

$$\frac{k_{n+1}}{k_n} = B = const \quad (25.4)$$

де  $n$  - порядковий номер лінії .

Таким чином, коефіцієнт  $k$  при збільшенні порядкового номера лінії повинен змінюватись за геометричною прогресією.

Кола, що відповідають лініям струму, будують таким чином, щоб одержати трубки рівного струму, які будуть відповідати трубкам рівного потоку вектора електричного зміщення для електростатичного поля. Ці кола проходять через центри електродів. Як виходить з рис. 25.2,  $\theta$  - кут, під яким бачиться відрізок, який з'єднує центри електродів, з точок, що лежать на лінії струму.

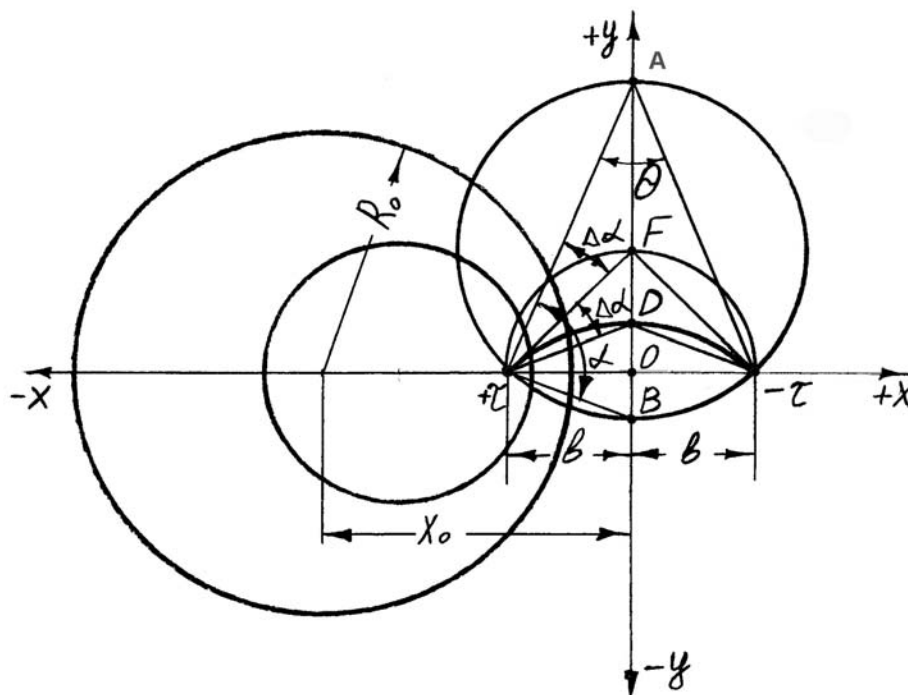


Рисунок 25.2

Для побудови трубок рівного струму необхідно будувати ці лінії так, щоб кут  $\theta$  змінювався на одну і ту ж величину  $\Delta\theta = const$ . З цією метою проводять з центра одного з електродів прямі до кінців діаметра АВ. Кут  $\alpha$  між цими прямими ділять на рівні частини  $\Delta\alpha$ . Проводять промені, які відстають один від одного на кут  $\Delta\alpha$ . Точки перетину F, D, O цих променів з прямою АВ лежать на шуканих лініях струму.

### Література

1. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. т.2, с.222-223.
2. Рязанов Г.А. Опыты и моделирование при изучении электромагнитного поля, с.66-67.
3. Нейман Л.Р. Демирчян К.С., Юринов В.М. Руководство к лаборатории электромагнитного поля с.174-181.

## Зміст роботи

Установка живиться від акумуляторної батареї напругою 10 В. Вся вимірювальна схема установки рис.25.3 зібрана в одному блоці з дослідною моделлю.

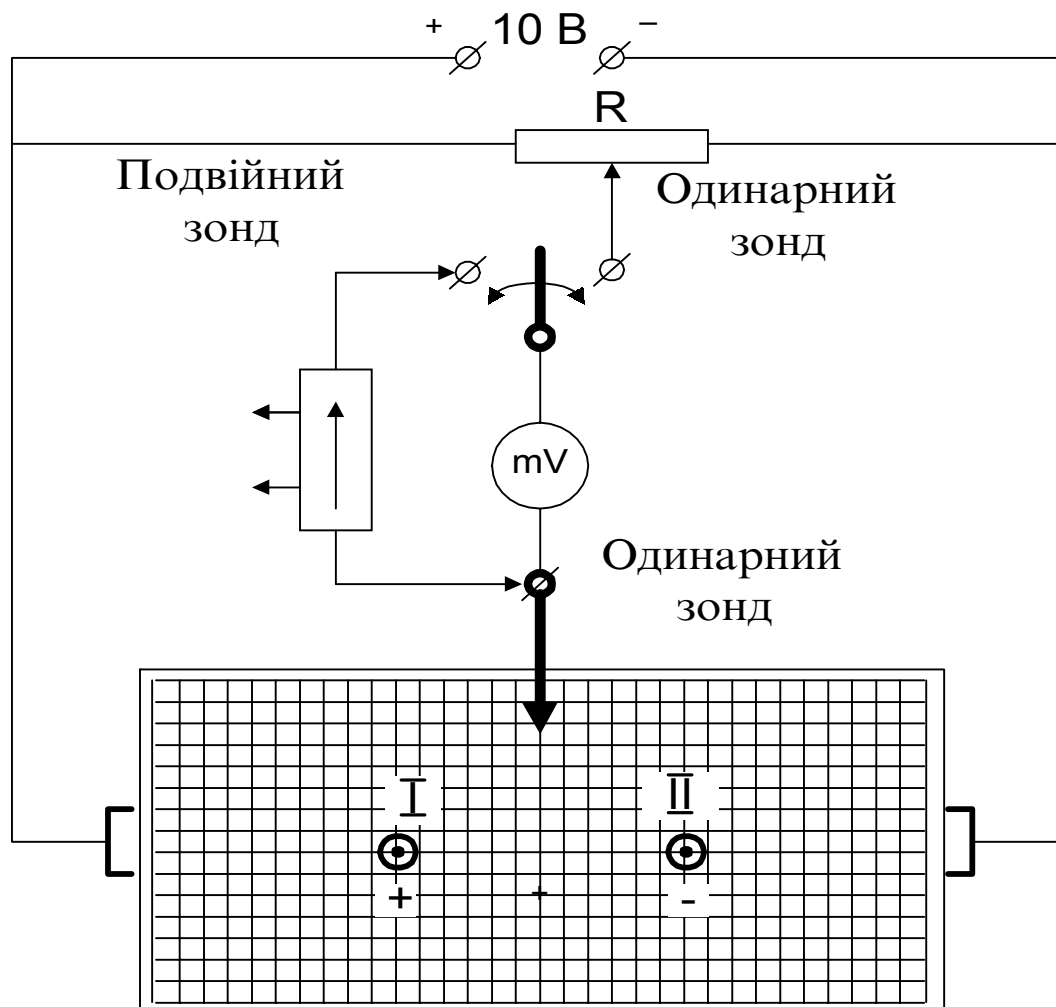


Рисунок 25.3

Експериментальним шляхом будується картина електричного поля двох електродів на електропровідному папері і встановлюється аналогія з картиною електричного поля у діелектрику ( повітрі ) навколо двопровідної лінії передачі .

### Порядок виконання роботи

1. Включити живлення установки ( рис.25.3 ).
2. Потенціометром R задати потенціали еквіпотенціальних ліній 0, 1, 2...
3. Включити тумблер в положення “Одинарний зонд” і за допомогою одинарного зонда і нуль-індикатора знайти на моделі еквіпотенціальні лінії,

які відповідають заданим потенціалам. Нульову лінію провести через точку  $O$ , яка лежить посередині відрізка, який з'єднує осі електродів.

4. Знайдені точки еквіпотенціальних ліній нанести на міліметровку, зберігаючи нумерацію ліній і координатної сітки електропровідного паперу.
5. Включити тумблер в положення “Подвійний зонд” і за допомогою подвійного зонда і мілівольтметра знайти силові лінії електричного поля, яке утворюється двома електродами у електропровідному папері.
6. Знайдені точки силових ліній нанести на ту ж міліметровку, де відмічались точки еквіпотенціальних ліній моделі.

### **Обробка результатів досліду**

5. Згідно з експериментальними даними побудувати на міліметровці кольоровими олівцями зняту картину електричного поля: лінії рівного потенціалу та силові лінії.
6. Розрахувати і побудувати теоретичну картину електричного поля двопровідної лінії.
7. На картину поля, одержану експериментально, нанести картину, одержану теоретично.
4. Зробити висновки по роботі.

### **Контрольні питання:**

1. Дайте визначення напруженості та потенціалу електричного поля та наведіть зв'язок між ними.
2. Наведіть граничні умови електричного поля
3. За допомогою яких ліній графічно зображаються електричні поля?
4. Поясніть методика експериментального визначення картини електричного поля.
5. Що собою являють еквіпотенціальні лінії електричного поля двох паралельних осей?
6. В чому зміст методу електростатичної аналогії і як він використовується в роботі?

## Лабораторна робота № 26

### Дослідження електричного поля кульового заземлювача

**Мета роботи:** - дослідження кульового заземлювача методом моделювання його електричного поля у електролітичній ванні.

### Теоретичні положення

На цій лабораторній установці відтворюється у невеликому масштабі явище розтікання струму в землі від заритих в неї металевих провідників, які використовуються для заземлення тих чи інших точок електричних пристроїв або електричних кіл. Систему таких заритих у землю провідників називають заземлювачем. Опір, який зустрічає струм при його розтіканні в землі від заземлювача, називають опором заземлення, при цьому опором самих металевих заземлювачів звичайно нехтують.

У електроенергетичних пристроях при коротких замиканнях на землю довільних точок електричного кола, які у нормальних умовах не повинні мати контакт з землею, виникають великі струми короткого замикання, які будуть проходити через заземлювачі, землю і місце ушкодження електричного кола. Падіння напруги на поверхні землі навколо заземлювача залежить від значення струму короткого замикання і від опору заземлення. Дуже важливо намагатися зменшувати по можливості це падіння напруги. Цього можна досягти зменшенням опору заземлення.

якій спад напруги від струмів короткого замикання, що виникає на поверхні землі на довжині кроку людини (так звана крокова напруга), ніде не перевищувала значення, при яких через людину може проходити небезпечний для його життя струм.

Формули для опору  $R$  заземлення можуть бути виведені на основі методу електростатичної аналогії за відомими формулами для ємності  $C$  певним чином розташованих тіл, оскільки основний опір розтіканню струму зосереджується поблизу електрода, де густина струму в землі найбільша.

Оскільки ємність кульового заземлювача

$$C = 4\pi\epsilon \cdot r_{\text{ш}} \quad (26.1)$$

тоді провідність і опір кульового заземлення будуть

$$G = 4\pi\gamma \cdot r_{\text{ш}}; \quad R = \frac{1}{4\pi\gamma \cdot r_{\text{ш}}} \quad (26.2)$$

Аналогічно визначають опір напівкульового заземлювача

$$R = \frac{1}{2\pi\gamma \cdot r_{\text{ш}}} \quad (26.3)$$

де:  $\mathcal{U}$  - провідність середовища, навколо кулі;

$r_{ш}$  - радіус кулі.

Знаючи опір заземлення, можна вирахувати струм розтікання

$$I = \frac{U}{R}$$

### Література

1. Нейман Л. Р., Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники. т. 2, с. 266 – 269.
2. Нейман Л. Р., Демирчян К. С. Юринов В. М. Руководство к лаборатории электромагнитного поля. с. 191 – 204.

### **Описання дослідної установки**

Установка (рис. 26.1) складається з електромагнітної ванни, пантографного пристрою та електродів. Живлення установки відбувається від джерела змінної напруги через автотрансформатор. Ванна розміром 250 x 500 x 240 мм виконана з нержавіючої сталі. Розміри ванни в порівнянні з розміром електродів вибрані значно більшими, щоб форма ванни менше відбивалася на результатах дослідів.

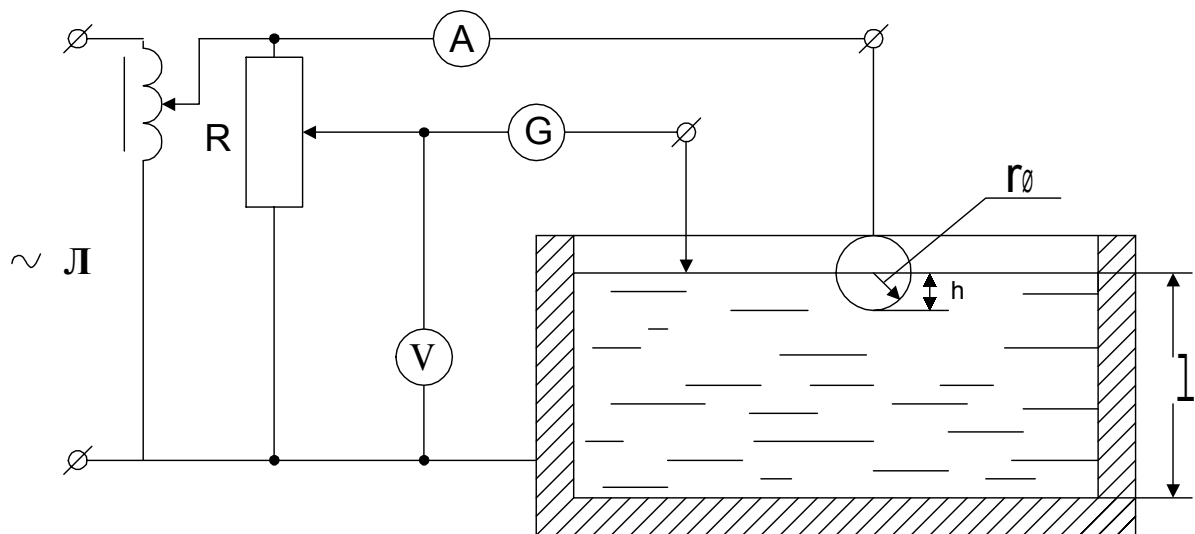


Рисунок 26.1

Пантограф складається з двох взаємно перпендикулярних лінійок і каретки. Одна з лінійок може вільно пересуватись по відношенню до каретки. Зонд, який представляє собою тонку ізолювану проволочку, закріплюється на каретці. Один кінець зонда може опускатись в воду на довільну глибину, а другий кінець підключений до вимірювальної схеми.

У якості заземлювача використовується металева куля радіусом  $r_{ш} = 13,5$  мм. Провідним середовищем може бути звичайна водопровідна вода з питомою провідністю  $\gamma = 4,3 \cdot 10^6$  сім/м.

### Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему відповідно рис. 26.1. Між ванною і кулькою підтримується напруга 10 В.
2. Занурюючи кульку на глибину, яка дорівнює його радіусу  $h = r_{ш}$ , вимірюємо струм розтікання, а за допомогою одинарного зонда і вимірної схеми знімаємо криву розподілу потенціалу по поверхні води вздовж радіальної лінії від поверхні кульки до стінки бака.
3. Занурюючи кульку на глибину, яка дорівнює половині висоти рівня води  $h = \frac{\ell}{2}$ , повторюємо вимірювання.

### Обробка результатів дослідів

1. Відповідно експериментальних даних вирахувати опори заземлення при  $h = r_{ш}$  та  $h = \frac{\ell}{2}$ ;
2. Побудувати криві розподілення потенціалу на поверхні води вздовж радіальної лінії при  $h = r_{ш}$  та  $h = \frac{\ell}{2}$  в функції відстані від кульки.
3. Теоретично вирахувати опори заземлення і струм розтікання для заземлювачів, які мають форму кулі та напівсфери, результати порівняти з експериментом.
4. Зробити висновки по роботі.

### Контрольні питання:

1. Які рівняння описують поле в провідному середовищі?
2. Наведіть граничні умови поля в провідному середовищі.
3. Дайте визначення крокової напруги.
4. Як визначити опір заземлення?
5. В чому зміст методу електростатичної аналогії?

**Лабораторна робота № 27**  
**Визначення коефіцієнтів електростатичної**  
**індукції та часткових ємностей трифазного кабелю**

**Мета роботи:** визначити дослідним шляхом коефіцієнти електростатичної індукції та часткових ємностей трифазного кабелю зі свинцевою оболонкою і перевірити існуючі зв'язки між ними. В задачу дослідження входить також графічна побудова картини електростатичного поля трифазного кабелю.

**Теоретичні положення**

При проведенні роботи застосовується стенд, схема якого відображена на рис. 27.1. Виводи від оболонки та трьох жил кабелю приєднані до затискачів, що помічені на стенді номерами: 0, 1, 2, 3.

Провід від одного з полюсів балістичного гальванометра БГ постійно повинен бути приєднаним до затискача  $f$  перемикача К1, а провід від другого полюса гальванометра – до оболонки кабелю (затискача 0), планки А з трьома затискачами і затискача d перемикача К1. Це необхідно для того, щоб виключити можливість помилкового вмикання гальванометра під напругу джерела живлення. Ключ К2 призначений для заспокоєння коливань гальванометра. Оболонка кабелю (затискач 0) і планка А завжди повинні бути приєднані до від'ємного полюсу мережі. Додатний полюс мережі приєднується до затискачів С і Е перемикачем К1.

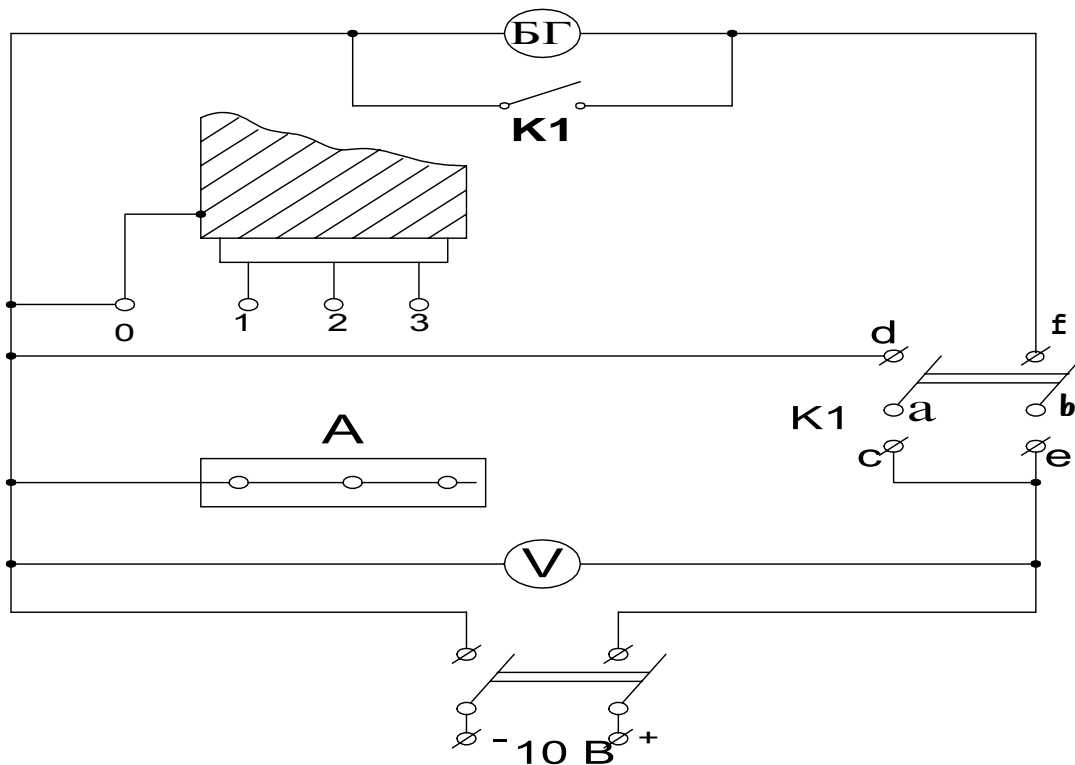


Рисунок 27.1

Схема відображена на рис.27.1 і залишається незмінною на час всіх дослідів.

Зв'язок між потенціалами та зарядами жил трифазного кабелю встановлюється такою системою рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= \beta_{11} \cdot \varphi_1 + \beta_{12} \cdot \varphi_2 + \beta_{13} \cdot \varphi_3, \\ q_2 &= \beta_{21} \cdot \varphi_1 + \beta_{22} \cdot \varphi_2 + \beta_{23} \cdot \varphi_3, \\ q_3 &= \beta_{31} \cdot \varphi_1 + \beta_{32} \cdot \varphi_2 + \beta_{33} \cdot \varphi_3, \end{aligned} \right\} \quad (27.1)$$

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= C_{11}(\varphi_1 - 0) + C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) + C_{13}(\varphi_1 - \varphi_3) \\ q_2 &= C_{21}(\varphi_2 - \varphi_1) + C_{22}(\varphi_2 - 0) + C_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) \\ q_3 &= C_{31}(\varphi_3 - \varphi_1) + C_{32}(\varphi_3 - \varphi_2) + C_{33}(\varphi_3 - 0), \end{aligned} \right\} \quad (27.2)$$

де:  $\beta$  і  $C$  - відповідно коефіцієнти електростатичної індукції та часткових ємностей.

Для визначення будь-якого власного коефіцієнта електростатичної індукції, наприклад  $\beta_{11}$  (див. рис. 27.1), оболонку кабелю (затискач 0) і жили 2, 3 приєднують до затискачів планки А, а жилу 1 кабелю – до затискача в перемикача 1. Далі перемикачем К1 заряджають жили кабелю до напруги  $U=10$  В і розряджають через балістичний гальванометр. Перемикач К1 потрібно перекидати по можливості швидко, щоб жила не встигала за час перемикачання розрядитись через опір витoku.

Коефіцієнт  $\beta_{11}$  обчислюють за формулою

$$\beta_{11} = \frac{C_{\psi} \cdot \alpha_1}{U} = \frac{q_1}{U}, \quad (27.3)$$

де:  $C_{\psi}$  - балістична постійна гальванометра,  $\alpha_1$  - максимальне відхилення зайчика гальванометра,  $U$  - напруга зарядки кабелю.

Аналогічно визначають коефіцієнти  $\beta_{22}$  та  $\beta_{33}$ .

Для визначення взаємних коефіцієнтів електростатичної індукції, наприклад  $\beta_{23}$ , оболонку кабелю і жилу 1 приєднують до планки А, жилу 2 – до затискача  $f$ , жилу 3 – до затискача а перемикача К1. Потім повторюють дії по зарядженні і розрядженні жил кабелю.

Коефіцієнт  $\beta_{23}$  обчислюють за формулою:

$$\beta_{23} = \frac{C_{\psi} \cdot \alpha_2}{U} = \frac{q_2}{U}, \quad (27.4)$$

Аналогічно визначають  $\beta_{12}$  та  $\beta_{13}$ .

Для визначення власних часткових ємностей, наприклад  $C_{33}$ , необхідно оболонку кабелю приєднати до планки А, жили 1, 2 – до затискача **a** перемикача К2, а жилу 3 – до затискача **b** того ж перемикача. Часткова ємність  $C_{33}$  обчислюється за формулою

$$C_{33} = \frac{C_{\psi} \cdot \alpha_3}{U} = \frac{q_3}{U}. \quad (27.5)$$

Аналогічно визначають часткові ємності  $C_{11}$  та  $C_{22}$ .

Вимірювати взаємні часткові ємності не має потреби, оскільки має місце співвідношення

$$C_{кр} = -\beta_{кр}. \quad (27.6)$$

При обробці результатів досліду необхідно переконатися в справедливості співвідношень:

$$C_{кр} = C_{рк}, \quad \beta_{кр} = \beta_{рк}, \quad (27.7)$$

$$\left. \begin{aligned} C_{11} &= \beta_{11} + \beta_{12} + \beta_{13}, \\ C_{22} &= \beta_{21} + \beta_{22} + \beta_{23}, \\ C_{33} &= \beta_{31} + \beta_{32} + \beta_{33}. \end{aligned} \right\} \quad (27.8)$$

### Література

1. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Т.2, с. 243-247.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники с. 568-573.
3. Нейман Л. Р., Демирчян К. С. Юринов В. М. Руководство к лаборатории электромагнитного поля. М.- 1966. с. 112-120.

### Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему відповідно рис. 27.1.
2. Визначити власні коефіцієнти електростатичної індукції  $\beta_{11}$ ,  $\beta_{22}$ ,  $\beta_{33}$ .
3. Визначити взаємні коефіцієнти електростатичної індукції  $\beta_{12}$ ,  $\beta_{23}$ ,  $\beta_{13}$ .
4. Визначити власні часткові ємності  $C_{11}$ ,  $C_{22}$ ,  $C_{33}$ .

### **Обробка результатів досліду**

1. Порівняти співвідношення, які мають місце між частковими ємностями та коефіцієнтами електростатичної індукції.
2. Побудувати наближену картину електростатичного поля трифазного кабелю за умовами дослідів у пп. 2 та 4.

### **Контрольні питання:**

1. Дайте визначення часткових ємностей.
2. Дайте визначення коефіцієнтів електростатичної індукції.
3. Наведіть зв'язок між частковими ємностями і коефіцієнтами електростатичної індукції.