

**Міністерство освіти і науки України**

**ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**ДОСЛІДЖЕННЯ КОМУТАЦІЙНИХ ЯВИЩ  
В ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТАХ**

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни:  
**"Основи теорії електричних апаратів"**

для студентів усіх форм навчання спеціальності  
**141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**  
(освітня програма "Електричні та електронні апарати")

**2018**

Дослідження комутаційних явищ в електричних апаратах: Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни "Основи теорії електричних апаратів" для студентів усіх форм навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (освітня програма "Електричні та електронні апарати")/ Укл.: О.В. Близняков, Л.С. Скрупська. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2018. – 26 с.

Укладачі: О.В. Близняков, доцент, к.т.н.,  
Л.С. Скрупська, ст. викладач.

Рецензент: О.І. Афанасьєв, доцент, к.т.н.

Відповідальний за випуск: Р.Е. Мохнач

Затверджено на засіданні кафедри  
“Електричні та електронні апарати”.  
Протокол № 11 від 1 червня 2018 р.

Рекомендовано до видання на засіданні  
навчально-методичної комісії  
електротехнічного факультету.  
Протокол № 11 від 21 червня 2018 р.

## З М І С Т

1. Лабораторна робота № 5. Дослідження вольт-амперних характеристик електродугового розряду .....	4
1.1 Мета роботи .....	4
1.2 Предмет дослідження .....	4
1.3 Опис лабораторної установки .....	6
1.4 Завдання .....	8
1.5 Методичні вказівки .....	8
1.6 Питання для самоперевірки .....	10
2. Лабораторна робота № 6. Дослідження процесу поновлення напруги при вимиканні коротких замикань .....	10
2.1 Мета роботи .....	10
2.2 Предмет дослідження .....	10
2.3 Опис лабораторної установки .....	15
2.4 Завдання .....	16
2.5 Методичні вказівки .....	17
2.6 Питання для самоперевірки .....	18
3. Лабораторна робота № 7. Дослідження перенапруг при вимиканні малих індуктивних струмів .....	18
3.1 Мета роботи .....	18
3.2 Предмет дослідження .....	18
3.3 Опис лабораторної установки .....	21
3.4 Завдання .....	22
3.5 Методичні вказівки .....	23
3.6 Питання для самоперевірки .....	24
Література.....	25

# 1. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5. ДОСЛІДЖЕННЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОДУГОВОГО РОЗРЯДУ

Тривалість лабораторного заняття – 4 години.

## 1.1. Мета роботи.

Визначити експериментальним шляхом статичні та динамічні вольт-амперні характеристики електродугового розряду.

## 1.2. Предмет дослідження.

Практично кожне реальне електричне коло має певний запас електромагнітної енергії, що накопичується в її індуктивних елементах. При вимиканні кола контактами комутаційного апарату цей запас розсіюється у формі виникнення електродугового розряду, який є одним з різновидів газового розряду. Окрім електродугового, до газових розрядів відносяться:

- *темний розряд (dark discharge)*: є т.з. *несамостійним* розрядом бо носії електричного струму виникають виключно за рахунок зовнішніх факторів (космічне та рентгенівське випромінювання і т.п.), тому величини струму темного розряду дуже малі ( $10^{-11}$  і менше);

- *Таунсендівський розряд (Townsend discharge)* (названий по імені вченого, який розробив теорію цього виду розряду): є т.з. *самостійним* розрядом; носії електричного струму у цьому випадку виникають внаслідок т.з. *ударної іонізації*, тобто за рахунок потужного електричного поля при високій напрузі джерела живлення;

- *тліючий розряд (glow discharge)* відрізняється від Таунсендівського підвищеною щільністю струму на катоді;

*Електродуговий розряд (електрична дуга) (arc discharge, electric arc)* виникає у тому випадку якщо напруга і струм більше відповідних критичних величин дугоутворення і являє собою плазмовий канал, по якому електричний струм тече від одного електрода (контакту) до іншого. По довжині електродуговий розряд має неоднорідну структуру, він містить три характерні зони (області), які якісно відрізняються: *катодна область (cathode region)*, *стовбур дуги (arc column)* та *анодна область (anode region)*. Але, враховуючі, що катодна та анодна області мають досить малі протяжності ( $10^{-4} \dots 10^{-5}$  см) і відносно постійні величини падіння напруги (10...30 В у катодній і до 10...12 В у анодній), можна вва-

жати, що властивості електродугового розряду і його вольт-амперна характеристика визначається процесами, що протікають у стовбурі.

Стовбур електричної дуги являє собою сильно іонізований об'єм газу, внаслідок чого має досить високу електропровідність (яка наближується до електропровідності металів) і має властивості *квазінейтральності* (тобто концентрації іонізованих позитивних і негативних частинок однакові) та *термодинамічної рівноваги* (тобто фізичні властивості електродугової плазми є однозначними функціями її температури).

У стовбурі дуги безперервно проходять процеси іонізації та деіонізації. *Іонізація (ionization)* це процес утворення іонізованих частинок, який здійснюється, головним чином, шляхом розпаду нейтральних атомів, що знаходяться у газі, на позитивний іон і вільний електрон. Розрізняють два типи іонізації ударну та термічну.

*Ударна іонізація (field or shock ionization)* обумовлена зіткненням вільного електрона, який прискорюється електричним полем, з нейтральним атомом. Слід відзначити, що ударна іонізація відіграє ключову роль в утворенні іонізованих частинок у таунсендівському та тліючому розрядах і дуже незначну роль в електродуговому розряді, де їх утворення здійснюється майже виключно шляхом *термічної іонізації (thermal ionization)*. При підвищенні температури газу зростає середньостатистична швидкість атомів, зростає їх кінетична енергія і зростає ймовірність їх зіткнення з утворенням іонізованих частинок. Процесу термічної іонізації передуює процес *дисоціації (dissociation)*, тобто розпад молекул на атоми в результаті їх зіткнення при тепловому русі.

Поряд з іонізацією, в стовбурі електричної дуги відбувається зворотний процес – *деіонізація (deionization)*, яка здійснюється двома шляхами: *рекомбінацією (recombination)*, тобто возз'єднанням двох протилежно заряджених іонізованих частинок та *дифузією (diffusion)*, тобто виходом іонізованих частинок зі стовбура електричної дуги у навколишнє середовище.

При розмиканні електродів (контактів) електрична дуга стає елементом електричного кола, що вимикається, і суттєво впливає на процес його вимикання. Як елемент електричного кола електрична дуга характеризується *вольт-амперною характеристикою*, яка являє собою залежність падіння напруги від струму дуги  $u_d = f(i_d)$ . Існує два різновиду характеристик електричної дуги: статичні та динамічні.

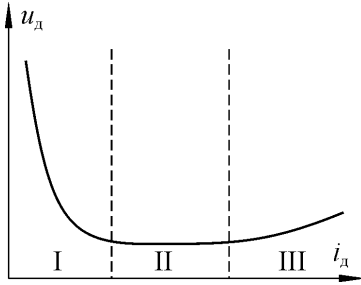


Рисунок 1.1 – Типова статична характеристика електричної дуг, що горить у атмосферному повітрі

дуже великий діапазон струмів (до 5–8 кА), у якому напруга дуги практично не залежить від величини струму, що пояснюється пропорційним зростанням перетину стовбура дуги з підвищенням струму; зона III – при надто великих струмах внаслідок пінч-ефекту напруга дуги дещо зростає при підвищенні струму [10].

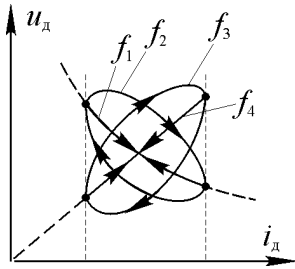


Рисунок 1.2 – Динамічні характеристики дуги при різних частотах змінної складової струму

які здобуті при незмінних (усталених) значеннях струму та напруги. Типова статична характеристика дуги, що вільно горить у атмосферному повітрі (тобто не використовуються будь-які міри, що сприяють її гасінню) надана на рисунку 1.1. Вона має три характерні зони: зона I – при досить малих струмах (до 10–15 А) спостерігається падаюча характеристика; зона II – охоплює

*Динамічні вольт-амперні характеристики* – це характеристики, які здобуті у процесі змінення струму. Їх характер суттєво залежить від швидкості змінення струму. Наглядним прикладом динамічних характеристик є характеристики дуги, які здобуті для струму, що має дві складові: постійну та синусоїдальну, що змінюється з різними частотами, рисунок 1.2, де  $f_1$  – дуже низька частота, при якій динамічна характеристика практично співпадає зі статичною;  $f_2$  – низька частота,  $f_3$  – висока частота, при якій динамічна характеристика суттєво відрізняється від статичної;  $f_4$  – дуже висока частота, при якій динамічна характеристика дуги практично співпадає з характеристикою омичного опору [10].

### 1.3. Опис лабораторної установки.

Електродуговий розряд утворюється за допомогою спеціальної установки. Її зовнішній вигляд надано на рисунку 1.3. Електрична схема дослідження надана на рисунку 1.4.

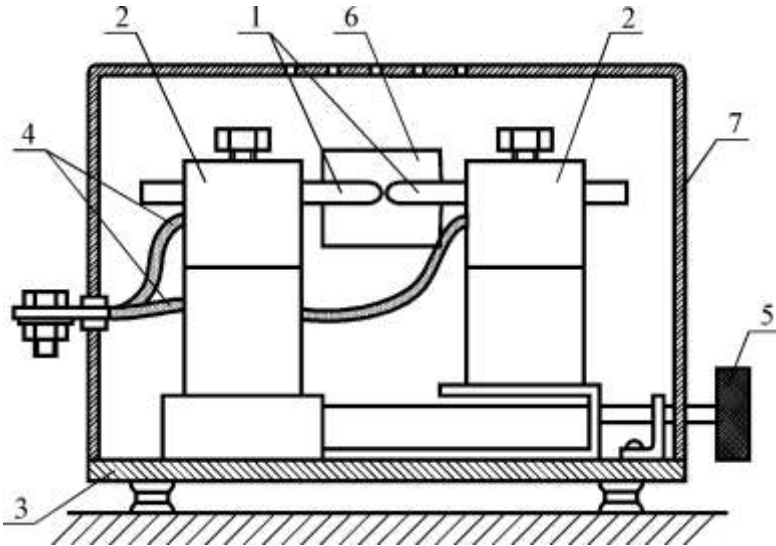


Рисунок 1.3 – Лабораторна установка для дослідження електричної дуги.

Основним елементом установки є вугільні електроди 1, які закріплені спеціальними держачками 2, встановленими на основі 3 і підключені до електричного кола за допомогою гнучких провідників з клемми 4. При обертанні рукоятки 5 рухомий електрод спочатку розмикає електричне коло, утворюючи електродуговий розряд, і далі рухається вздовж своєї осі, визначаючи довжину дуги. Дуговий розряд можна візуально спостерігати і приблизно визначати довжину дуги через затемнюване вікно 6. Установка закрита кожухом 7 з зазорами у верхній частині.

Окрім вугільних електродів, що утворюють електродуговий розряд (дуговий проміжок) ДП, схема містить також дросель  $L$  для підвищення стійкості горіння дуги, вимірювальний шунт  $R_{ш}$  та резистори  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ . Резистором  $R_1$  за допомогою багатопозиційного перемикача  $S_2$  перемикача здійснюється ступінчасте регулювання величини струму у колі. Перемикачем  $S_1$  схема підключається до джерела постійного або змінного струму напругою. У першому випадку досліджуються статичні характеристики дуги, у другому – динамічні характеристики при синусоїдальному змінному струмі. Вимірювання струму у колі при дослідженні статичних характеристик здійснюється амперметрами  $PA_9$ , а

напруги – вольтметром PV. При дослідженні динамічних характеристик струм вимірюється приладом А10 за допомогою шунта  $R_{ш}$  (покази приладу А10 необхідно помножити на 10). За допомогою резистора R3 здійснюється осцилографування форми кривої струму дуги при змінному струмі. Струмове реле КА здійснює захист вольтметра та осцилографа від підвищеної поновлюваної напруги при згасанні дуги.

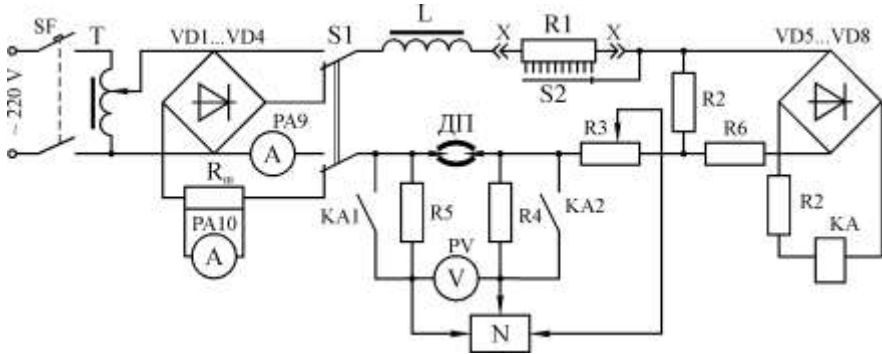


Рисунок 1.4 – Принципова електрична схема зняття статичних та динамічних характеристик електричної дуги

#### 1.4. Завдання.

1.4.1. Експериментально визначити статичні вольт-амперні характеристики дуги при довжині дуги 3 та 5 мм.

1.4.2. Експериментально визначити динамічну вольт-амперну характеристику при струмі і довжині дуги, вказаних викладачем.

1.4.3. Зробити висновки по роботі.

#### 1.5. Методичні вказівки.

1.5.1. Підготувати експериментальну установку до роботи, для чого потрібно:

- а) вивести повністю резистор R1 у стан 3;
- б) підняти кришку кожуха установки і очистити вугільні електроди від нагару;
- в) встановити вугільні електроди таким чином, щоб дуга горіла напроти віконцю з затемнювачем.
- г) звести вугільні електроди до замикання, обертаючи рукоятку;
- д) перемикачем S1 перевести схему в заданий режим роботи.

1.5.2. Підключити установку до блоку живлення і вимірювальних приладів за допомогою коротких переминок



1.5.3. Увімкнути автоматичний вимикач SF та за допомогою резистора R3 встановити струм у колі величиною 5 А.

1.5.4. Розвести електроди приблизно на 1,5–2 мм і дати їм прогрітись упродовж 3–5 хвилин, а потім розвести електроди на задану відстань (тобто встановити довжину дуги такою, що дорівнює 3 або 5 мм).

1.5.5. Переконавшись в тому, що відбувається стале горіння дуги, зняти вольт-амперну характеристику, використовуючи ступінчате регулювання струму в колі перемикачем S2. Результати вимірів занести до таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Статичні характеристики дуги.

$l_d = 3 \text{ мм}$	$I_d, \text{ А}$	
	$U_d, \text{ В}$	
$l_d = 5 \text{ мм}$	$I_d, \text{ А}$	
	$U_d, \text{ В}$	

1.5.6. По результатам вимірів побудувати графіки статичних вольт-амперних характеристик  $U_d = f(I_d)$ .

1.5.7. Підключити осцилограф до мережі і дати йому прогрітись упродовж 3–5 хвилин. Підключити осцилограф до об'єкта дослідження за допомогою високочастотного кабелю згідно схеми, наданої на рис. 1.4. Відрегулювати осцилограф таким чином, щоб здобути на екрані стійке зображення часової діаграми.

1.5.8. Зняти на кальку з екрану осцилографа динамічну вольт-амперну характеристику дуги (величину струму та довжину дуги задає викадач).

1.5.9. УВАГА ! Після закінчення дослідів відключити осцилограф від мережі і вимкнути автомат SF.

1.5.10. Звіт до лабораторної роботи повинен містити:

- а) завдання на дослідження;
- б) принципову схему;
- в) список електрообладнання і приладів;
- г) таблицю і побудовані статичні вольт-амперні характеристики дуги постійного струму;
- д) динамічні вольт-амперні характеристики електричної дуги, відзняті на кальку;
- е) висновки по роботі.

### **1.6. Питання для самоперевірки**

- 1.6.1. Різновиди газового розряду та їх стисла характеристика.
- 1.6.2. Що являє собою електродуговий розряд?
- 1.6.3. Складові напруги на міжконтактному проміжку при наявності електродугового розряду.
- 1.6.4. Процеси іонізації та деіонізації дугового проміжку.
- 1.6.5. Термічна іонізація і її роль у процесі утворення стовбуру електричної дуги.
- 1.6.6. Статичні та динамічні характеристики електричної дуги.
- 1.6.7. Умова згасання електричної дуги постійного струму. Поняття критичної довжини дуги.
- 1.6.8. Фактори, що впливають на характер динамічних воль-амперних характеристик дуги.

## **2. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПОНОВЛЕННЯ НАПРУГИ ПРИ ВИМИКАННІ КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ**

Тривалість лабораторного заняття – 4 години.

### **2.1 Мета роботи**

Метою лабораторної роботи є експериментальне визначення параметрів перехідної поновлюваної напруги на контактах комутаційного апарата при вимиканні короткого замикання за вимикачем та невіддаленого короткого замикання.

### **2.2 Предмет дослідження**

Електрична дуга, що виникає при вимиканні електричного кола змінного струму, згасає, як правило в момент переходу струму через нульове значення. Отже процеси, що відбуваються в області нуля струму є дуже важливими, бо відіграють ключову роль у процесі вимикання електричного кола. Безпосередньо за нулем струму за дуже короткий відрізок часу опір міжконтактного проміжку зростає від дуже малого (опір електродугового розряду) до дуже великого (опір майже повністю деіонізованого проміжку) значення. У цей час відбувається дуже інтенсивний процес деіонізації і швидкий розпад електродугової

плазми. В результаті цього стовбур дуги набуває якісно нових властивостей *залишкового стовбура дуги (residual arc column)*. Ці явища за звичаєм називають процесом *поновлення міцності (recovery dielectric)*.

Поряд з цим у цей період відбувається також процес *поновлення напруги (recovery voltage)*. Перед згасанням дуги напруга між контактами комутаційного апарату визначається вольт-амперною характеристикою електродугового розряду і в момент переходу струму через нульове значення дорівнює напрузі згасання дуги. Після переходу струму через нульове значення між контактами комутаційного апарату поновлюється напруга промислової частоти, яку називають *зворотною напругою (power frequency recovery voltage)*.

Звичайно, що поновлення зворотної напруги не може статися миттєво, бо реальні електричні кола завжди містять в собі ємнісні елементи, і, таким чином, виникає перехідний процес поновлення напруги. Миттєве значення напруги у процесі поновлення напруги називають *перехідною поновлюваною напругою (ППН) (transient recovery voltage – TRV)*.

Найбільш важливим для практики випадком є поновлення напруги при вимиканні короткого замикання (к.з.), яке відбулося безпосередньо за вимикачем. Схема заміщення для визначення поновлюваної напруги у цьому випадку являє собою активно-індуктивне коло, рисунок 2.1.

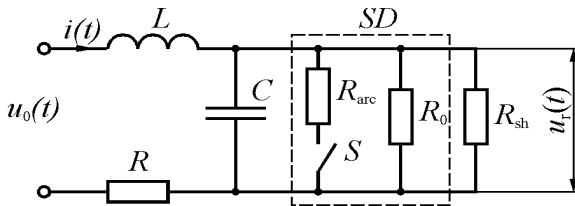


Рисунок 2.1 – Схема заміщення для визначення поновлюваної напруги

У наданій схемі  $L$ ,  $R$ ,  $C$  – це параметри електричного кола, яке виникає при виникненні к.з. Слід відзначити, що ємність  $C$  у даному випадку відіграє суттєву роль у процесі поновлення напруги, але зовсім не впливає на величину струму к.з., що вимикається.  $R_d$ ,  $R_0$  – це параметри комутаційного апарату, що вимикає к.з.  $SD$ : опір, відповідно, електричної дуги в момент її згасання та залишкового стовбура після згасання дуги.  $S$  – т.з. *ідеальний вимикач (ideal switch)*, що вимикає коло без утворення електричної дуги в момент переходу струму через нуль;

він має нульовий опір у замкненому положенні і безкінечне – у розімкненому.  $R_{ш}$  – шунтуючий опір, тобто опір, що включається паралельно по відношенню до комутаційного апарата  $SD$ .  $u_0(t)$  – змінювана у часі зворотна напруга; слід відзначити, що процес поновлення напруги протікає досить швидко і вона не встигає істотно змінитися, тому приймається не змінній у часі і дорівнює її миттєвому значенню при переході струму дуги через нульове значення:

$$U_0 = \sqrt{2}U_{\phi} K_{cx} \sin\phi, \quad (2.1)$$

де  $U_{\phi}$  – фазна напруга;

$\phi$  – кут зсуву фаз між струмом та напругою;

$K_{cx}$  – коефіцієнт схеми кола, що викається.

Таким чином, характер поновлюваної напруги визначається параметрами електричного кола, що вимикається  $L, R, C, R_{ш}, U_0$ , а також властивостями комутаційного апарата  $R_d(t), R_o(t)$ . Поновлювана напруга, яка визначається з урахуванням властивостей комутаційного апарата, є *дійсною ППН (actual TRV)*; вона має виключно наукове значення, але не має практичного використання. Практичне значення має т.з. *власна ППН (system TRV)*, яка визначається без урахування властивостей комутаційного апарата і дозволяє однозначно та об'єктивно визначити умови комутації, що утворюються виключно електричною мережею, в якій апарат здійснює вимикання електричного кола. У нинішній час певно встановлено, що власна поновлювана напруга відіграє значну роль в процесі вимикання електричного кола і, в значній мірі, визначає спроможність вимикача до вимикання короткого замикання.

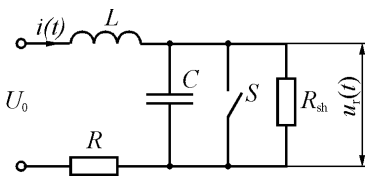


Рисунок 2.2 – Одночастотний контур для визначення ППН

Отже, при визначенні власної ППН виходять з того, що електричне коло вимикається ідеальним вимикачем, і схема заміщення набуває більш простого вигляду, рисунок 2.2. Це найпростіший випадок визначення ППН, який називають *однчастотним контуром*.

При заданих параметрах контуру к.з., що вимикається, характер ППН суттєво залежить від величини шунтуючого опору  $R_{ш}$ , яка, у свою чергу, залежить від місця розташування комутаційного апарата у мережі. Якщо шунтуючий опір достатньо великий (100 кОм і вище) або зовсім

відсутній ( $R_{ш} = \infty$ ) процес поновлення напруги має яскраво виражений коливальний характер з дуже повільним затуханням, рисунок 2.3а.

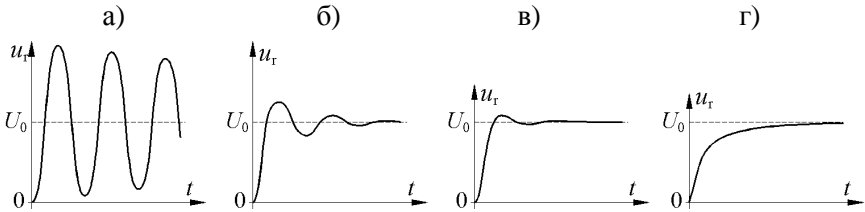


Рисунок 2.3 – Процеси поновлення напруги при різних величинах  $R_{ш}$

Якщо величина шунтуючого опору складає одиниці або десятки кілоом, також буде спостерігатись коливальний процес поновлення напруги, але він затухає значно швидше (відбувається т.з. *демпфування* поновлюваної напруги), рисунки 2.3б та 2.3в. При подальшому зниженні величини шунтуючого опору процес поновлення напруги стає аперіодичним, рисунок 2.3г.

Основними параметрами ППН є:

а) частота власних коливань (для коливального процесу поновлення напруги);

б) коефіцієнт перевищення амплітуди, тобто відношення максимального значення поновлюваної напруги до миттєвого значення зворотної напруги;

в) швидкість зростання поновлюваної напруги

На практиці часто є необхідність вимикання електричних кіл, які містять ділянки ліній електропередачі (коротке замикання в лінії). В таких випадках характер ППН визначається не тільки елементами, що розташовані з боку джерела живлення, але й властивостями лінії.

Найпростіша схема заміщення для визначення ППН для такого випадку надана на рисунку 2.4, де  $L_n C_n$  – це параметри кола з боку джерела живлення,  $L_l C_l$  – параметри ділянки лінії. При короткому замиканні (ідеальний вимикач  $S$  увімкнений) зворотна напруга  $U_0$  розподіляється на дві складові: напругу з боку джерела  $U_{0н}$ , та напругу з боку лінії  $U_{0л}$  (розподіл потенціалу у колі див. рис. 2.4). Після вимикання кола (ідеальний вимикач  $S$  вимкнений) потенціал точки А зросте на величину  $U_{0н}$  (з  $U_{0л}$  до  $U_0$ ), а потенціал точки В зменшиться з  $U_{0л}$  до нуля. Поновлення напруги з боку джерела має, як правило, аперіодичний ха-

рактер. Поновлення ж напруги з боку лінії буде визначатись хвилювими процесами у лінії, тобто набіганням та відбиттям хвилі напруги з амплітудою  $U_{0л}$ . Форма кривої ППН з боку лінії з урахуванням відбиття хвилі від місця к.з. буде мати вид трикутних коливань з затуханням.

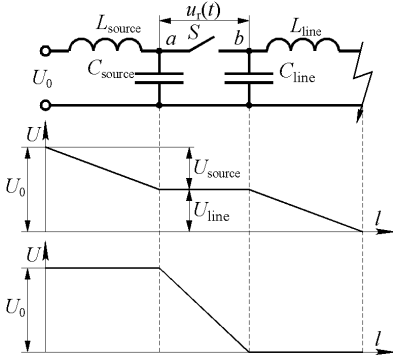


Рисунок 2.4 – Схема заміщення для визначення ППН при наявності лінії

Якщо ділянка лінії має достатньо велику довжину (50...100 км), то відбита хвиля напруги приходить вже після завершення процесу поновлення напруги і практично не впливає на характер ППН. При малій довжині ділянки (до 1 км) амплітуда трикутних коливань дуже мала і не відіграє ролі у процесі поновлення напруги. При довжині ділянки від 2 до 5 км має місце т.з. *невіддалене к.з.* (*short-line fault*). У цьому випадку створюються особливо тяжкі умови для вимикача, що вимикає к.з., оскільки спостерігається сполучення достатньо великого струму к.з., що вимикається, з високою швидкістю зростання ППН. У зв'язку з цим різко зростає імовірність теплового пробою при переході струму через нуль і повторного запалювання дуги, тобто відмова вимикача при вимиканні к.з.

При невеликій відстані місця к.з. спостерігається висока частота пилоподібних коливань ППН при невеликій його амплітуді. У цьому випадку крива поновлюваної міцності лежить вище за криву ППН, внаслідок чого відбувається успішне вимикання к.з., рисунок 2.5а.

При невеликій відстані місця к.з. спостерігається висока частота пилоподібних коливань ППН при невеликій його амплітуді. У цьому випадку крива поновлюваної міцності лежить вище за криву ППН, внаслідок чого відбувається успішне вимикання к.з., рисунок 2.5а.

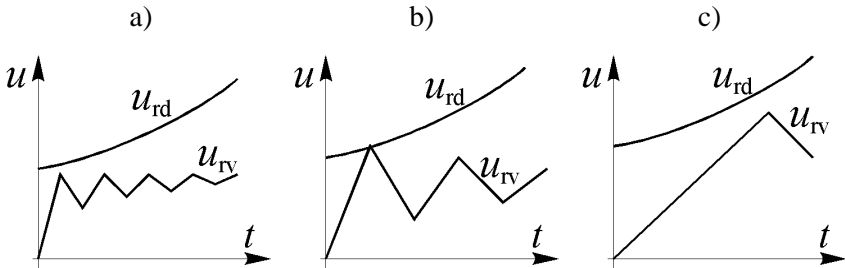


Рисунок 2.5 – Характер ППН та поновлюваної міцності при (а) малій, (б) середній та (в) великій відстані місця к.з.

При певному зростанні відстані к.з. частота пилоподібних коливань ППН, а отже й швидкість його зростання дещо зменшуються, але зростає їх амплітуда, зокрема його перший пік. У цьому випадку, коли поновлювана міцність ще недостатньо зростає, може спостерігатись тепловий пробій і, відповідно, поновлення горіння дуги, що порушує встановлений режим роботи вимикача, тобто неуспішне вимикання к.з., рисунок 2.5б. Подальше віддалення місця к.з. приводить до ще більшого зниження струму к.з і, відповідно, до зростання поновлюваної міцності міжконтактного проміжку. При цьому зменшується частота пилоподібного ППН і швидкість його зростання, тому перший пік досягає максимуму, коли поновлювана міцність вже достатньо зростає, рисунок 2.5в.

### 2.3. Опис лабораторної установки.

Усі елементи лабораторної установки розташовуються у середині лабораторного стенду. На зовнішній стороні лабораторної панелі зображена спрощена схема випробувань, рисунок 2.6, з гніздами для осцилографування (точки А та Б), а також розташовується апаратура керування дослідом. Принципова електрична схема лабораторної установки зображена на рис. 2.7.

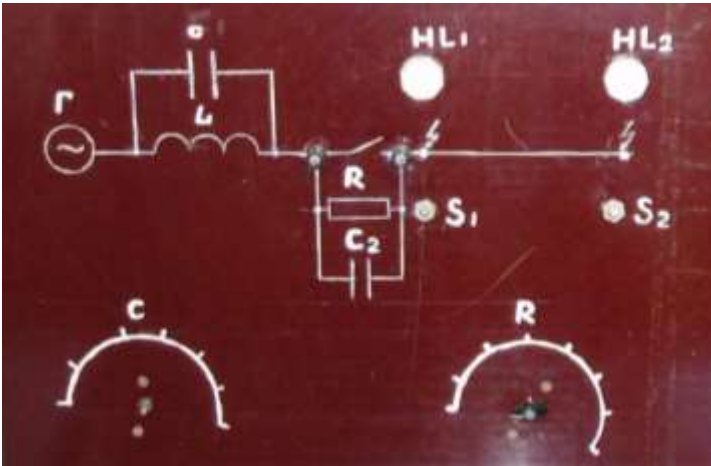


Рисунок 2.6 – Зовнішня сторона лабораторної панелі

Автоматичний вимикач QF здійснює подачу живлення на установку. Досліджуване коло вмикається за допомогою магнітного пускача КМ натисненням кнопки SB (Пуск).  $L_k$  і  $C_k$  – параметри кола короткого

замикання з боку джерела живлення. Процес вимикання струму к.з. моделюється діодом VD. У кінці кожного провідного півперіоду при переході струму через нульове значення діод вимикається і на ньому відбувається поновлення зворотної напруги (напруги джерела живлення G). Отже, на екрані звичайного електронного осцилографу можна спостерігати стійку картину поновлення напруги. Лінія передачі моделюється за допомогою індуктивно-ємнісних LC-елементів (у даному випадку Г-елементів). Тумблерні вимикачі S1 і S2 призначені для утворення того чи іншого виду короткого замикання. При дослідженні поновлюваної напруги при к.з. за вимикачем вмикається тумблер S1. При дослідженні поновлюваної напруги при невіддаленому к.з. тумблер S1 вимикається, а тумблер S2 вмикається. Перемикач S3 призначається для змінення опору шунтуючого резистору  $R_{ш}$ . Перемикач S4 для змінення ємності шунтуючого конденсатора  $C_{ш}$ .

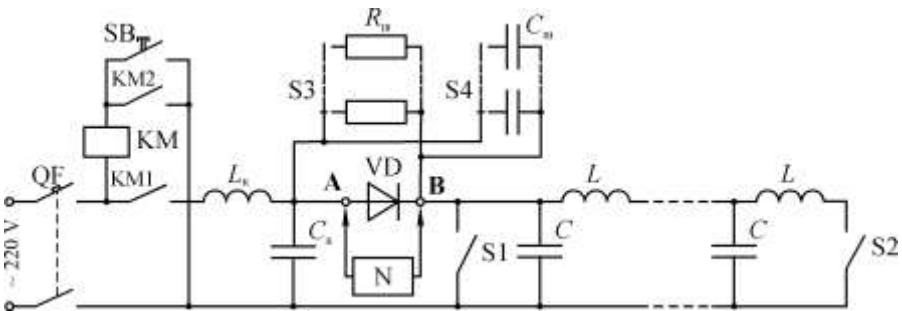


Рисунок 2.7 – Принципова схема лабораторної установки

## 2.4. Завдання.

2.4.1. Ознайомитись з лабораторною установкою та принципом її роботи.

2.4.2. Експериментально визначити характер поновлюваної напруги  $u_B(t)$  при короткому замиканні за вимикачем і його параметри:

- максимальне значення поновлюваної напруги;

- середню швидкість поновлення напруги при різних значеннях опору шунтуючого резистора  $R_{ш}$  та ємності шунтуючого конденсатора  $C_{ш}$ ; визначити опір  $R_{ш}$  при якому здійснюється перехід коливального процесу поновлення напруги до аперіодичного;



2.4.3. Експериментально визначити характер поновлення напруги при невіддаленому к.з. і його параметри при фіксованих значеннях опору та ємності шунтучих відповідно резистора та конденсатора. Їх значення вказуються викладачем.

2.4.4. Розрахувати параметри поновлюваної напруги для обох видів к.з. при умовах, що вказані в пп. 2.4.2 і 2.4.3 і порівняти їх з експериментальними значеннями.

## **2.5. Методичні вказівки.**

2.5.1. Всі виміри в даній лабораторній роботі виконуються за допомогою осцилографу, тому перед тим як її виконувати необхідно привести налагодження осцилографа, тобто налагодити його таким чином, щоб масштаб по амплітуді і розверстці відповідали вказаним на лицевій панелі. Це здійснюється за допомогою каліброваної напруги, що подається на робочий вхід осцилографа. У відповідності з його параметрами встановити масштаби осцилографа.

2.5.2. Для виконання п. 2.4.2 завдання необхідно тумблерний вимикач S3 встановити в положення "увімкнуто", а S4 – "вимкнуто". Вхід осцилографа підключити до клем А і Б. При різних значеннях  $R_{ш}$  і  $C_{ш}$  добитись стійкої картини процесу поновлення напруги і зняти на кальку криві поновлення напруги Враховуючи масштаби по амплітуді і розверстці визначити параметри процесу поновлення напруги у відповідності до завдання.

2.5.3. Для виконання п. 2.4.3 завдання необхідно тумблерний вимикач S3 поставити в положення "вимкнуто", а S4 – в положення "увімкнуто". Добитись стійкої картини процесу поновлення напруги з урахуванням трикутної форми напруги з боку лінії передачі і за допомогою кальки зняти криву процесу поновлення напруги. Враховуючи масштаби осцилографа визначити параметри процесу поновлення напруги у відповідності до завдання.

2.5.4. Користуючись літературними джерелами, а також матеріалами лекцій розрахувати параметри процесу поновлення напруги у відповідності до завдання.

2.5.5. Звіт до лабораторної роботи повинен містити:

- а) найменування та мету роботи;
- б) осцилограми процесів поновлення напруги при короткому замиканні за вимикачем та невіддаленого к.з.;
- в) визначені параметри процесів поновлення напруги;

- г) розрахунки параметрів поновлюваної напруги;
- д) висновки по роботі.

### **2.6. Питання для самоперевірки**

- 2.6.1. Чому виникає процес поновлення напруги?
- 2.6.2. Що таке зворотна напруга і від чого вона залежить?
- 2.6.3. Що таке поновлювана напруга?
- 2.6.4. Назвіть параметри поновлюваної напруги.
- 2.6.5. Від чого залежить характер і параметри поновлюваної напруги?
- 2.6.6. Дати визначення дійсної та власної перехідної поновлюваної напруги.
- 2.6.7. Які особливості процесу поновлення напруги при вимиканні к.з. в лінії?
- 2.6.8. Що таке невіддалене к.з. і чому воно є найбільш важким режимом вимикання к.з.?

## **3. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7. ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕНАПРУГ ПРИ ВИМИКАННІ МАЛИХ ІНДУКТИВНИХ СТРУМІВ**

Тривалість лабораторного заняття - 4 години.

### **3.1. Мета роботи.**

Метою лабораторної роботи є дослідження особливостей вимикання малих індуктивних струмів, спостереження явищ зрізу струму, перенапруг і визначення їх параметрів.

### **3.2. Предмет дослідження.**

Якщо високовольтний вимикач вимикає відносно великі струми, згасання електричної дуги відбувається у мить його природного нульового значення, коли запас електромагнітної енергії електричного кола, що вимикається, практично дорівнює нулю. В таких випадках амплітуда поновлюваної напруги, як правило, не перевищує подвійної величини миттєвого значення зворотної напруги.

При вимиканні ж малих індуктивних струмів, наприклад, струму холостого ходу силового трансформатора (50–100 А), вимикачем, що має потужну дугогасильну систему і, відповідно, високу комутаційну спроможність, можуть мати місце так звані *зрізи струму* (*current chopping*), тобто

різкі зменшення струму до нуля. Зріз струму може відбутись у будь-який момент, у тому числі і на максимумі струму. У момент зрізу струму індуктивний контур має, як правило, значний запас електромагнітної енергії, який при його вимиканні повинен повністю розсіятись у ємнісних його елементах. Тому вимикання малих індуктивних струмів дуже часто супроводжується з'явленням значних *перенапруг* (*overvoltage*).

Сама природа явища зрізу струму ще не вивчена належним чином, але на сьогоднішній день достовірно встановлено, що він виникає в результаті накладення на синусоїду струму промислової частоти високочастотних коливань, обумовлених ємнісними елементами кола, що розташовані по обох боках вимикача та індуктивністю, що зв'язує їх. Як показують дослідження, амплітудні значення високочастотних струмів можуть сягати величин, які значно перевищують миттєві значення струмів промислової частоти, і, таким чином при протилежних напрямках струмів можливе з'явлення нульових значень струму і згасання електричної дуги до природного переходу струму через нуль. Основною причиною виникнення високочастотної складової струму дуги вважається різкі змінення напруги дуги при активній деіонізації міжконтактного проміжку вимикача, що особливо проявляються при малих струмах і, відповідно, малому діаметрі дуги.

Якщо зневажити властивостями комутаційного апарату і припустити найгірший випадок, що зріз струму стався на максимумі струму, то максимально можливу величину поновлюваної напруги можна визначити з закону збереження енергії [5, 6]:

$$\eta^2 L \frac{i_{зр}^2}{2} = C \frac{U_{в макс}^2}{2} \quad (3.1)$$

де  $i_{зр}$  – величина зрізу струму; при прийнятому припущенні про зріз струму на максимумі ця величина дорівнює амплітудній величині струму холостого ходу, що вимикається  $\sqrt{2} I_0$ ;

$L$  – індуктивність трансформатора в режимі холостого ходу;

$C$  – ємність фази трансформатора;

$\eta$  – коефіцієнт, що враховує втрати енергії у міді та сталі трансформатора (0,3...0,45).

Отже, максимально можливе амплітудне значення поновлюваної напруги буде визначатись наступним виразом:

$$u_{\text{в макс}} = \eta \cdot I_o \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (3.2)$$

Амплітудне значення струму холостого ходу трансформатора визначається відповідно до наступного виразу:

$$I_{\text{ом}} = \frac{U_m}{2\pi f L}. \quad (3.3)$$

Підставляючи цей вираз до формули (3.2) отримаємо:

$$u_{\text{в макс}} = \eta \frac{U_m}{2\pi f \sqrt{LC}}, \quad (3.4)$$

де  $\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  – це вираз, який визначає власну частоту трансформатора в режимі холостого ходу  $f_0$ .

Таким чином, вираз, який визначає максимально можливу кратність перенапруги, буде мати наступний вигляд:

$$K_{\text{н/б}} = \frac{u_{\text{в макс}}}{U_m} = \eta \cdot \frac{f_0}{f} \quad (3.5)$$

Тобто, максимально можлива кратність перенапруги при вимиканні холостого трансформатора буде визначатись кратністю власної частоти трансформатора в режимі холостого ходу по відношенню до промислової частоти, а також відносною величиною втрат у в міді та сталі трансформатора.

Втрати у трансформаторі суттєво знижують перенапруги при вимиканні струму холостого ходу, однак вони достатньо великі і являють собою серйозну небезпеку для ізоляції електроустаткування. Основними способами обмеження перенапруг є використання вентильних розрядників, оксидно-цинкових варисторів, а також шунтування комутаційних апаратів резисторами з активним опором.

Якщо контакти вимикача шунтовані активним опором, то поновлювана напруга (при коливальному характері процесу) після зрізу на максимумі струму буде визначатись наступним виразом [5, 6]:

$$u_{\text{в}} = e^{-at} i_{\text{сп}} \sqrt{L/C} \sin \omega_0 t. \quad (3.6)$$

Отже, кратність перенапруги у цьому випадку з урахуванням формули (3.3), буде визначатись наступним виразом:

$$K = \frac{f_0}{f} e^{-a/(4f_0)}, \quad (3.7)$$

де  $a$  – коефіцієнт затухання кривої поновлюваної напруги, який визначається наступним виразом:

$$a = \frac{1}{2R_{ш}C} \quad (3.8)$$

Таким чином, величина шунтуючого опору може бути обрана виходячи з допустимої кратності перенапруги  $\kappa_{доп}$ :

$$R_{ш} = \frac{1}{8Cf_0 \ln \frac{f_0}{\kappa_{доп}f}} \quad (3.9)$$

Слід зазначити, що рівняння (3.6) і, як наслідок, формула (3.9) не враховують втрати у сталі та міді трансформатора.

### 3.3. Опис лабораторної установки.

Лабораторна установка складається з лицевої панелі і елементів схеми досліджень. На лицевій панелі, рис. 3.1, показана силова схема установи, а також розташовуються кнопки S1 (Вкл) і S2 (Откл) і перемикач S3, що призначені для керування дослідом, а також гнізда для осцилографування і запуску осцилографа.



Рисунок 3.1 – Зовнішній вигляд лицевої панелі лабораторної установки.

Принципова схема лабораторної установки показана на рис. 3.2. Вона містить у собі силову частину, схему керування і вимірювальну частину. Силова частина складається з джерела живлення 220 В, яке подається в схему автоматичним вимикачем QF, трансформатора Т, шунта для зняття осцилограми струму і комутаційного апарату Q, що

вимикає малий індуктивний струм (у даному випадку використовується вакуумний контактор КВМ-10-5/400). Схема керування містить в собі електромагнітний привод вимикача YA з кнопками SB1 (Вкл) і SB2 (Откл), перемикач S3, що призначений для змінення величини опору шунтуючого резистора  $R_{ш}$ . Вимірювальна частина містить у собі вимірювальний шунт і запам'ятовуючий осцилограф N.

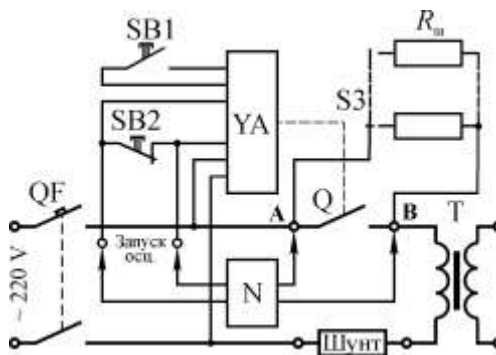


Рисунок 3.2 – Електрична схема лабораторної установки.

Вимикання кола здійснюється шляхом зняття живлення з приводу контактора Q. Одночасно з цим з дільника напруги подається напруга на вхід зовнішньої синхронізації осцилографа, він запускається і зберігає отриману осцилограму процесу зрізу струму і поновлення напруги.

### 3.4. Завдання.

3.4.1. Ознайомитись з лабораторним стендом і методами вимірювання параметрів за допомогою запам'ятовуючого осцилографа.

3.4.2. При відсутності шунтуючого опору експериментально визначити частоту поновлюваної напруги і залежність величини перенапруги від фази комутації.

3.4.3 Експериментально визначити залежність перенапруги від величини шунтуючого опору.

3.4.4 Розрахувати залежність перенапруги від величини шунтуючого опору і порівняти її з отриманою експериментально.

3.4.5 Зняти осцилограми струму при вимиканні індуктивного кола при різноманітних фазах зрізу струму.

### 3.5. Методичні вказівки.

3.5.1. Увімкнути осцилограф і дати йому прогрітисся впродовж 10 хв.

3.5.2. Ознайомитись з принципом роботи запам'ятовуючого осцилографа і методами вимірювань з його допомогою одноразових процесів.

3.5.3. Встановити перемикач осцилографа "Режим работы" в положення "Автомат".

3.5.4. За допомогою джерела каліброваної прямокутної напруги осцилографа призвести налагодження масштабів розгортання по часу і напрузі.

3.5.5. Підключити вхід осцилографа до місць схеми, що досліджуються, а вхід зовнішньої синхронізації до гнізд "Запуск осцилографа", що розташовані на зовнішньої стороні лицевої панелі установки. Перемикач осцилографа "Режим работы" встановити у положення «Ждущий».

3.5.6. Увімкнути автомат QF.

3.5.7. Увімкнути вимикач Q натисненням кнопки SB1 (Вкл)

3.5.8. Привести осцилограф в стан готовності до роботи натисненням кнопки "Готов". При цьому повинна загорітися неонева лампочка.

3.5.9. Вимкнути вимикач Q натисненням кнопки SB2 (Откл).

3.5.10. Зняти отриману осцилограму на кальку. Величина перенапруги визначається по першому піку процесу поновлення напруги.

3.5.11. При виконанні п. 3.4.2 зняти якомога більше осцилограм (не менше 15–20) з метою отримання максимального діапазону фази початку процесу поновлення напруги. Під час побудови графіка всі отримані точки повинні бути відображені на експериментальній залежності.

3.5.12. При виконанні п. 3.4.3 рекомендується кожному точку отримувати як середнє арифметичне трьох-чотирьох вимірювань.

3.5.13. Розрахункові залежності рекомендується будувати на одному графіку з експериментальними.

3.5.14. Звіт по лабораторній роботі повинен містити:

- а) найменування теми і мети роботи;
- б) принципову схему лабораторної установки;
- в) осцилограми процесу поновлення напруги, отримані при різних фазах зрізу струму  $i$ , відповідно, начала процесу поновлення напруги і величинах шунтуючого опору;
- г) осцилограми струму при різних фазах зрізу струму;
- д) експериментальні і розрахункові залежності у відповідності до завдання;
- е) висновки по роботі, де пояснити характер отриманих осцилограм і експериментальних залежностей.

### **3.6. Питання для самоперевірки**

3.6.1. Чому вимикання ненавантажених трансформаторів (малих індуктивних струмів) є важким режимом комутації електричного кола?

3.6.2. Що таке зріз струму?

3.6.3. Чим пояснюється явище зрізу струму при вимиканні малого індуктивного струму?

3.6.4. Як здійснюється визначення перенапруги при вимиканні малих індуктивних струмів?

3.6.5. Назвіть основні методи обмеження перенапруг при вимиканні малих індуктивних струмів.



## Література

1. Таев И.С. Электрические аппараты: Общая теория / И.С. Таев. – М.: Энергия, 1977. – 272 с.
2. Основы теории электрических аппаратов: Учеб. для вузов/ [И.С. Таев, Б.К. Буль, А.Г. Годжелло и др.]; под ред. И.С. Таева. – М.: Высшая школа, 1987. – 352 с.
3. Теория электрических аппаратов/ [Г.Н. Александров, В.В. Борисов, Г.С. Каплан и др.]; под ред. Г.Н. Александрова. – [2-е изд., перераб и доп.] – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. – 540 с.
4. Справочник по электрическим аппаратам высокого напряжения / [Н.М. Адоньев, В.В. Афанасьев, И.М. Бортник и др.]; под ред. В.В. Афанасьева. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 544 с.
5. Белкин Г. С. Коммутационные процессы в электрических аппаратах/ Г. С. Белкин. – М. : Знак, 2003. – 244 с.
6. Буткевич Г.В. Дуговые процессы при коммутации электрических цепей / Г.В. Буткевич. – М.: Высшая школа, 1967. – 195 с.
7. Самервилл Дж. М. Электрическая дуга/ Самервилл Дж. М. Пер. с англ. – М.-Л. Госэнергоиздат, 1962. – 120 с.
8. Брон О.Б. Электрическая дуга в аппаратах управления / О.Б. Брон. – М.: Госэнергоиздат, 1954. – 532 с.
9. Акодис М.М. Определение восстанавливающегося напряжения на контактах выключателя / М.М. Акодис, П.А. Корзун. – М.: Энергия, 1968. – 192 с.
10. Тиховод С. М. Метод ускоренного численного расчета переходных процессов в электрических цепях на основе аппроксимации решения алгебраическими полиномами / С. М. Тиховод, Т. М. Корнус, Д. Г. Паталах // Электротехніка та електроенергетика. – 2015. – № 2. – С. 48–54.
11. Ярымбаш Д. С. Особливості розподілення магнітних потоків у режимі неробочого ходу силових трансформаторів / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, Т. Є. Дівчук, І. М. Килимник // Электротехніка та електроенергетика. – 2016. – № 2. С. 5–12.
12. Дивчук Т. Е. Подход к определению токов холостого хода силовых трехфазных трансформаторов с плоскими стержневыми магнитными системами / Т. Е. Дивчук, Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, И. М. Килимник, М. И. Коцур, Ю. С. Безверхняя // Электротехніка та електроенергетика. – 2017. – № 2. – С. 56–66.

13. Circuit interruption: Theory and Techniques/ Edited by Jr. Thomas E. Browne, Taylor & Francis, New York, 1984. – 701 p.
14. Switching Phenomena in High-Voltage Circuit Breakers/ Edited by Kunio Nakanishi, Marcel Dekker, New York, 1991. – 292 p.
15. Van der Sluis L. Transients in power systems/ by Lou van der Sluis, John Wiley & Sons Ltd, New York, 2001. – 217 p.