

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**Є. Д. Дьяков, В. Г. Воропай**

**КАБЕЛЬНІ ТА ПОВІТРЯНІ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ  
ШИНОПРОВОДИ**

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

*(для студентів 4 курсу денної, 5 курсу заочної і прискореної форм навчання  
освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю  
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

**Харків  
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова  
2019**

**Дьяков Є. Д.** Кабельні та повітряні лінії електропередачі. Шинопроводи : конспект лекцій для студентів 4 курсу денної, 5 курсу заочної і прискореної форм навчання освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Є. Д. Дьяков, В. Г. Воропай; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 38 с.

Автори:

канд. техн. наук, доц. Є. Д. Дьяков  
ст. викл. В. Г. Воропай

Рецензент

**В. М. Охрименко**, кандидат технічних наук, доцент кафедри електропостачання та електроспоживання міст (Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова)

*Рекомендовано кафедрою систем електропостачання та електроспоживання міст, протокол №6 від 28.12.2018*

Конспект лекцій складено з метою допомогти студентам електротехнічних спеціальностей при підготовці до занять, заліків та іспитів із розділу «Шинопроводи» курсу «Кабельні та повітряні лінії електропередачі».

© Є. Д. Дьяков, В. Г. Воропай, 2019  
© ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019

## ЗМІСТ

Вступ .....	4
1 Призначення шинопроводів.....	5
2 Переваги сучасних шинопровідних систем в порівнянні з кабельними лініями.....	6
3 Конструкції шинопроводів .....	8
4 Визначення активного і реактивного опорів шинопроводу .....	14
5 Вибір перерізу шинопроводів.....	17
6 Втрати потужності і напруги в шинопроводах.....	21
7 Моделювання режимів роботи шинопроводів.....	24
7.1 Призначення програмного комплексу ELCUT.....	24
7.2 Моделювання електричних полів у шинопроводах.....	30
Список джерел .....	34
Додаток А .....	35

## ВСТУП

Постійне зростання енергонасиченості будівель і споруд, будівництво багатопверхових будівель з великою щільністю розподілу енергії між поверхами і на поверхах поставили перед енергетиками актуальне завдання знайти альтернативне рішення застосуванню традиційних методів розподілу електричної енергії.

Використання силових кабелів у зв'язку з великими номінальними струмами і значними струмами короткого замикання, окрім збільшення капітальних витрат, також підвищує вартість монтажних робіт і витрат на забезпечення пожежної безпеки при експлуатації цих мереж. Одним з можливих рішень цієї проблеми є застосування шинопроводів для передачі і розподілу електроенергії. Це забезпечить ефективну побудову розподільних мереж, починаючи від трансформаторної підстанції і закінчуючи споживачами, а також створенням мобільної мережі освітлення. Сфери застосування шинопроводів у будівлях дуже широкі. Вони можуть використовуватися практично у будь-яких будівлях – житлових і адміністративних, промислових і складських, на об'єктах інфраструктури (вокзали, лікарні), в супермаркетах і готелях. При цьому шинопроводи дозволяють підвищити електробезпеку і зменшити рівень магнітного випромінювання в порівнянні з кабельними лініями.

## 1 ПРИЗНАЧЕННЯ ШИНОПРОВОДІВ

Шинопровід – це компактна система, що складається з ізольованих мідних або алюмінієвих провідників, що знаходяться в алюмінієвому кожусі.

Підрозділяються шинопроводи на низьковольтні (до 1кВ) і високовольтні (6 кВ і вище). Зі свого боку шинопроводи можна розділити на відкриті і закриті.

Низьковольтні шинопроводи закритого виконання також називають комплектними. Вони зібрані з прямокутних алюмінієвих шин, розташованих вертикально і затиснутих між спеціальними ізоляторами в середині перфорованого корпусу.

За призначенням комплектні шинопроводи підрозділяються на наступні групи:

- магістральні – застосовуються для передачі електроенергії від підстанцій до розподільних шинопроводів і силових розподільних пунктів;
- розподільні – призначені для передачі електроенергії до електроприймачів;
- тролейні – призначені для передачі електроенергії до рухливих електроприймачів;
- освітлювальні – призначені для передачі електроенергії до світильників і приймачів малої потужності.

Умовно шинопроводи можна розділити на дві категорії – шинопроводи живлення і шинопроводи розподілу електроенергії.

Шинопроводи розподілу передають електроенергію через відвідні блоки, які розташовані, як правило, через 0,5 або 1,0 метр. Відвідні блоки включаються в спеціальні гнізда шинопроводу для забезпечення живлення розподільчих щитів або безпосередньо машин і механізмів. Монтувати відвідні блоки можливо під навантаженням не зупиняючи процес виробництва. Змонтований вертикально цей шинопровід може використовуватися для магістралі живлення з відвідними блоками на поверхах будівлі.

Застосування пристроїв захисту (плавких запобіжників, автоматичних вимикачів та рубильників), розподілених по довжині шинопроводу, скорочує кількість провідникової продукції, яка використовується для підключення устаткування.

Високовольтні шинопроводи використовуються для передачі електричної енергії, зазвичай, від трансформаторів до розподільчих щитів.

## **2 ПЕРЕВАГИ СУЧАСНИХ ШИНОПРОВІДНИХ СИСТЕМ ПОРІВНЯНО З КАБЕЛЬНИМИ ЛІНІЯМИ**

Сучасні шинопроводи мають наступні переваги:

1. Шинні системи компактніші і вимагають менше місця, ніж кабельні системи, особливо при навантаженнях на лінії в декілька сотень або тисяч ампер.

2. Модульна конструкція шинних систем відрізняється гнучкістю і мобільністю. На відміну від кабельних систем, шинні можливо легко змінювати, доповнювати або переносити в інше приміщення і встановлювати наново без особливих капітальних витрат.

3. Відсутні сполучні і кінцеві муфти. Приєднання шинопроводів здійснюється безпосередньо до виведень трансформаторів або шин розподільних пристроїв за допомогою спеціальних блоків. Повороти траси виконуються під необхідним кутом в габариті шинопровода.

4. У шинних системах ефективніше здійснюється охолодження, в порівнянні з кабельними системами. Щільно стислі шини, поміщені в металевий корпус з сильно розвиненою поверхнею, здатні добре відводити вироблене тепло на стінки кожуха і від нього в довкілля.

5. У шинних системах використовуються матеріали робоча температура яких вище за робочу температуру ізоляції силових кабелів. Шинні системи не горючі, не сприяють поширенню полум'я, завдяки вмонтованим внутрішнім протипожежним перемичкам і не виділяють шкідливих газів при пожежі.

6. Жорстка конструкція елементів шинних систем забезпечує підвищену стійкість до дії струмів короткого замикання в порівнянні з кабельними системами.

7. Мінімальна відстань між осями провідників зменшує їх індуктивний опір, а плоска форма (відносно тонка шина) сприяє оптимальному розподілу щільності струму в ній, зменшуючи активний опір. У зв'язку з цим втрати напруги при одній і тій же довжині і навантаженні в шинних системах значно нижче, ніж в кабельних системах.

8. Компактність конструкції і наявність кожуха забезпечують зменшення електромагнітного поля навколо шинної системи в порівнянні з кабельною системою.

9. Використання в шинних системах стандартних елементів, дозволяє виключити помилки в процесі їх експлуатації і забезпечити безпечні умови роботи.

10. Шинні системи виключають різницю в довжині між провідниками, мають точні параметри активного і індуктивного опору, а також забезпечують рівне навантаження на кожній фазі.

11. З'єднання секцій при монтажі виконується за допомогою штепсельних роз'ємів, що виключає невірне з'єднання фаз.

12. Надійність приєднання усіх елементів шинної системи практично не залежить від кваліфікації монтажників.

13. Використання моментних ключів або болтів із зривними голівками виключає надмірний тиск на контакти, що забезпечує збереження захисного покриття і надійне контактне з'єднання на протязі усього періоду експлуатації.

14. Монтажна готовність шинних систем вище, ніж у кабельних, що дозволяє скоротити час на виконання монтажних робіт і відповідно їх вартість.

15. В порівнянні з кабельними системами, шинні конструкції не можуть бути пошкоджені різними гризунами.

### 3 КОНСТРУКЦІЇ ШИНОПРОВODІВ

По конструктивному виконанню шинопроводи на напругу до 1 кВ під-розділяють на: трифазні; трифазні з нульовим робочим провідником; трифазні з нульовим робочим і нульовим захисним провідником [2].

Основними елементами розподільчих шинопроводів є:

– прямі секції, вживані на прямолінійних ділянках ліній (рис. 3.1, а);

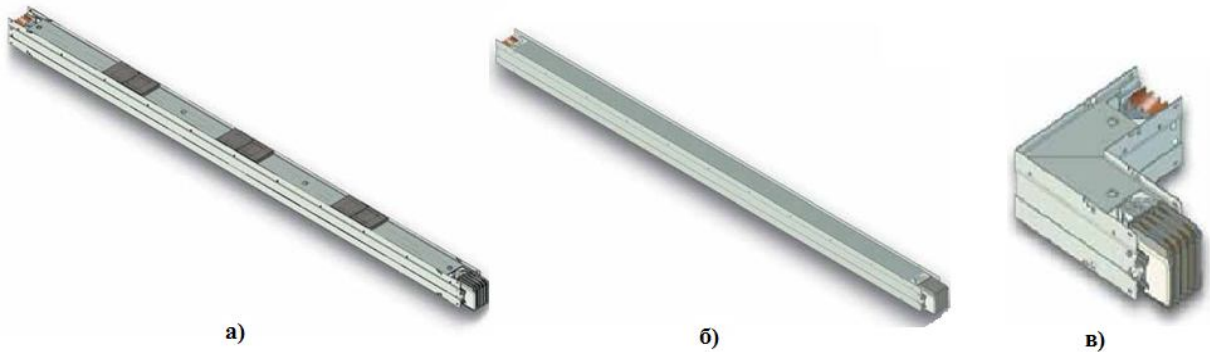


Рисунок 3.1 – Секції шинопроводу:

а – пряма; б – пряма підганяльна; в – кутова горизонтальна

– прямі підганяльні секції (рис. 3.1, б);

– кутові секції, які використовуються для повороту ліній на  $90^\circ$  у горизонтальній і вертикальній площинах (рис. 3.1, в);

– Z-подібні секції застосовуються для обходу лінією різних перешкод (рис 3.2, а, б);

– ввідні секції або ввідні коробки з комутаційною, захисною і комутаційною апаратурою або без неї – для підведення живлення до шинопроводів кабелем, проводами або магістральним шинопроводом (рис 3.2,в);



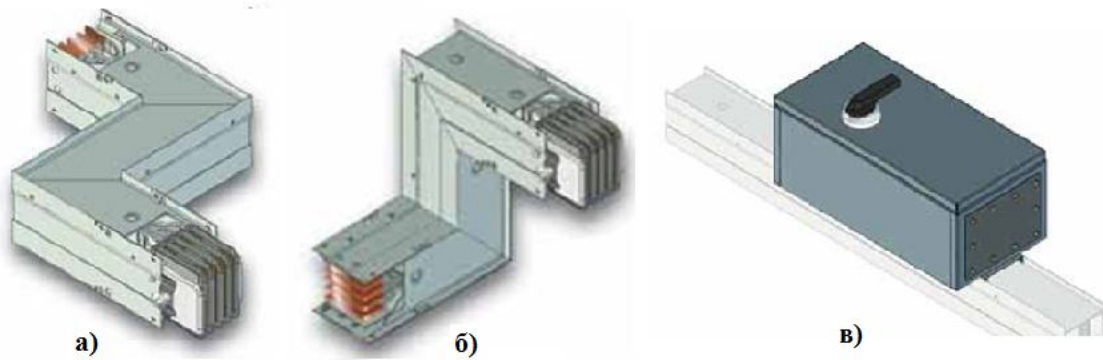


Рисунок 3.2 – Секції шинопроводу :

а – Z-подібна горизонтальна секція; б – Z-подібна вертикальна секція зі зміною напрямку траси; в – секція з відгалужувальною коробкою

- перехідні секції або пристрої для з'єднання двох шинопроводів на різні номінальні струми, або шинопроводів різних конструкцій;
- відгалужувальні пристрої (коробки, штепселі) – для роз'ємного приєднання приймачів електричної енергії. Коробки випускаються: з роз'єднувачем; з роз'єднувачем і з запобіжниками або автоматичним вимикачем (рис 3.2,в);
- приєднувальні фланці – для з'єднання оболонок шинопроводів з оболонками щитів або шаф;
- торцеві кришки (заглушки) – для закриття торців крайніх секцій шинопроводів;
- пристрої для кріплення шинопроводів до елементів будівельних конструкцій будівель і споруд.

Основними елементами магістральних шинопроводів є:

- прямі секції – для прямолінійних ділянок ліній;
- кутові секції – для поворотів ліній на  $90^\circ$  в горизонтальній і вертикальній площинах;
- трійникові (Т-подібні) секції – для розгалуження в трьох напрямках під кутом  $90^\circ$  в горизонтальній і вертикальній площинах (рис. 3.3,а);

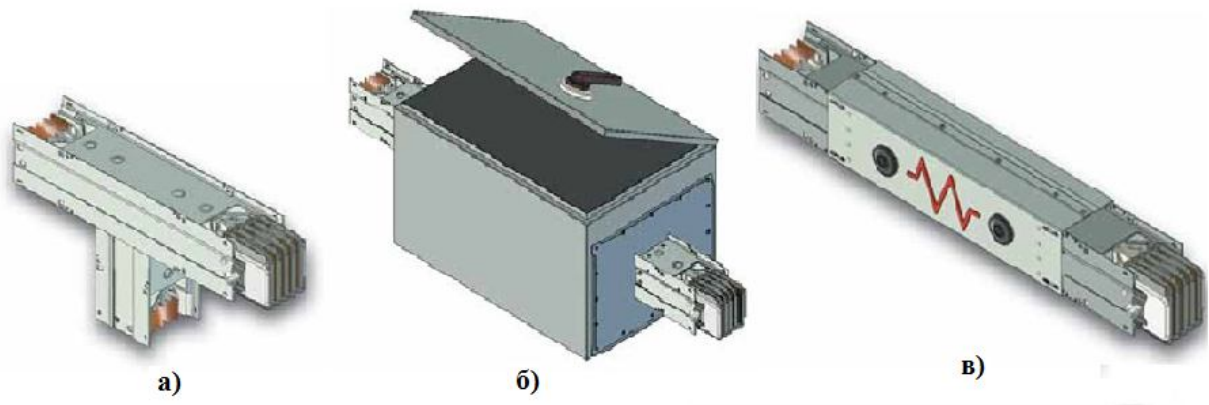


Рисунок 3.3 – Секції шинопроводу :

а – трійникова вертикальна; б – розділова; в – компенсаційна

- підганяльні секції – для підгонки ліній шинопроводів до необхідної довжини;
- розділові секції з роз'єднувачем – для секціонування магістральних ліній шинопроводів (рис. 3.3,б);
- компенсаційні секції – для компенсації температурних змін довжини ліній шинопроводів (рис. 3.3,в);
- переходні секції – для з'єднання шинопроводів на різні номінальні струми;
- відгалужувальні пристрої (секції, коробки) – для нерозбірного, розбірного або роз'ємного приєднання розподільних пунктів, розподільних шинопроводів або приймачів електричної енергії. Коробки випускаються з роз'єднувачем, з роз'єднувачем і запобіжниками або з автоматичним вимикачем;
- приєднувальні секції – для приєднання шинопроводів до комплектних трансформаторних підстанцій (рис. 3.4, а);
- прохідні секції – для проходження через стіни і перекриття;
- пристрої для кріплення шинопроводів до елементів будівельних конструкцій будівель і споруд;
- кришки (заглушки) торцеві і кутові для закриття торців кінцевих секцій шинопроводу і кутів (рис. 3.4,б). [1].

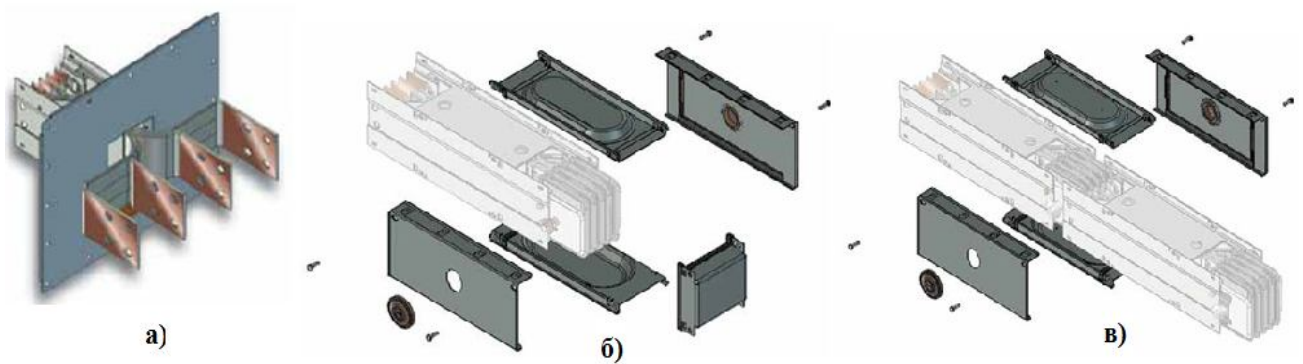


Рисунок 3.4 – Елементи шинопроводу: а – приєднувальна секція;  
 б – торцева заглибка; в – корпус стикового з'єднання

З окремих секцій і елементів збирається траса шинопроводу.

Конструкції освітлювальних шинопроводів принципово не відрізняються від розглянутих вище розподільних і магістральних шинопроводів. Вони також складаються з прямих, підганяльних, ввідних і відгалужувальних секцій.

Тролейні шинопроводи відрізняються від освітлювальних наявністю суцільної подовжньої щілини в нижній частині. В середині короба шинопроводу укріплені мідні шини – тролєї. Рухлива каретка пересувається уздовж щілини по нижніх внутрішніх краях короба і за допомогою встановлених на ній мідно-графітових щіток підключає приймачі до тролєї (рис.3.5).

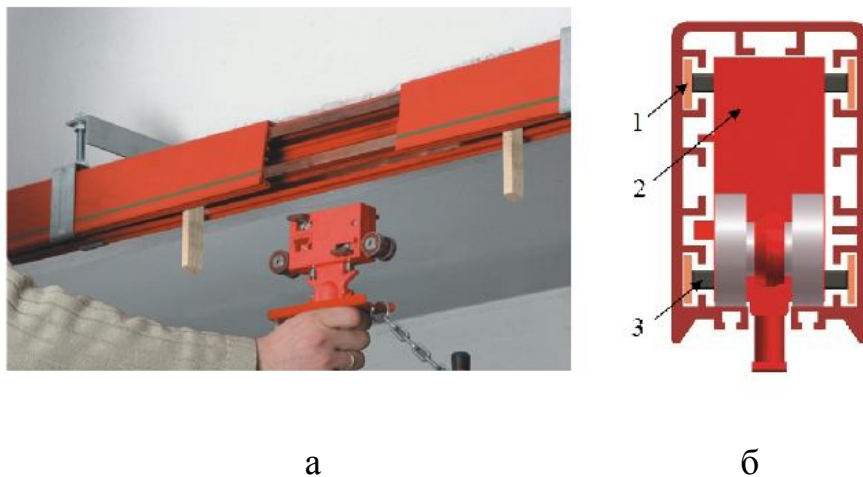


Рисунок 3.5 – Тролейний шинопровід:  
 а – вигляд збоку; б – вигляд в розрізі: 1 – мідна шина; 2 – рухлива каретка;  
 3 – мідно-графітова щітка

Необхідна номенклатура елементів шинопроводів встановлюється в технічних умовах на конкретні типи шинопроводів.

Розрахункові довжини прямих секцій рекомендується вибирати з ряду: 0,75; 1,00; 1,50; 2,00; 3,00; 4,50; 6,00 метрів.

При з'єднанні шинопроводів перехідними секціями або пристроями їх номінальні струми не повинні перевищувати відношення 2:1.

Номінальні струми ввідних секцій і коробок розподільних шинопроводів вибираються рівними номінальним струмам шинопроводів або подвоєному їх значенню, залежно від місця підведення живлення на початку або середині лінії.

У таблиці 3.1 приведені значення номінальних струмів шинопроводів і їх відгалужувальних пристроїв.

Таблиця 3.1 – Номінальні струми шинопроводів і їх відгалужувальних пристроїв

Номінальний струм шинопроводу, А	Номінальний струм відгалужувальних пристроїв, А	Номінальний струм шинопроводу, А	Номінальний струм відгалужувальних пристроїв, А
100	10; 16; 25; 63	1 000; 1 250	250; 400; 630
160	16; 25; 63; 100	1 600; 2 000	250; 400; 630; 1 000
250	25; 63; 100; 160	2 500; 3 200	400; 630; 1 000; 1 600
400	63; 100; 160; 250	4 000; 5 000	400; 630; 1 000; 1 600; 2 500
630	100; 160; 250; 400	6 300	400; 630; 1 000; 1 600; 2 500; 4 000

Допускається зменшувати номінальні струми шинопроводів і відгалужувальних пристроїв за умовами допустимого нагріву окремих елементів. Відповідне зниження струмового навантаження в порівнянні з номінальним вказується в експлуатаційній документації на конкретні типи шинопроводів.

Рекомендовані [2] значення температури нагріву струмоведучих частин і елементів корпусу шинопроводу номінальним струмом з урахуванням ефективного значення температури довкілля приведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Температури нагріву струмоведучих частин і елементів корпусу шинопроводу

Найменування частин шинопроводу	Температура нагріву, °С
Шини	95
Розбірні і нерозбірні контактні з'єднання	Згідно з ГОСТ 10434
Роз'ємні контактні з'єднання	100
Корпус	Згідно з технічними умовами на шинопроводи конкретних типів

Вказані значення температур нагріву струмоведучих частин передбачає застосування електричної ізоляції, допустима температура нагріву якої відповідає класу нагрівостійкості А, згідно з ГОСТ 8865. При застосуванні ізоляції, що має нижчу нагрівостійкість, температура нагріву струмоведучих частин, що впливають на нагрів ізоляції, має бути знижена.

У аварійних режимах шинопроводи повинні витримувати одноразову дію трифазного струму короткого замикання, значення якого вказані в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Значення трифазного струму короткого замикання

Номинальний струм шинопроводу, А	Амплітудне значення струму КЗ в перший напівперіод, кА, не менше	Діюче значення періодичної складової струму КЗ, кА, не менше	Час дії одноразового струму короткого замикання, с
100; 150	7	4,0	0,3
250	10	5,0	
400	15	7,5	
630	25	12,5	
1 000; 1 250	30	15,0	0,5
1 600; 2 000	50	25,0	
2 500; 3 200	70	30,0	
4 000; 5 600	100	45,0	
6 300	170	75,0	

Приєднувальні секції магістральних шинопроводів повинні витримувати струм короткого замикання, що перевищує не менше чим на 40% значень вказаних в таблиці 3.3. Температура струмоведучих частин при дії струмів корот-

кого замикання не повинна більш ніж на 50°C перевищувати ту температуру, яку вони мали до початку протікання струмів короткого замикання. Характер і допустимі деформації, що виникають під дією струмів короткого замикання, вказуються в технічних умовах для конкретних типів.

Критеріями відмов шинопроводів є:

- пробій ізоляції;
- займання елементів шинопроводів;
- викид розжарених або розплавлених часток елементів шинопроводів.

#### **4 ВИЗНАЧЕННЯ АКТИВНОГО І РЕАКТИВНОГО ОПОРІВ ШИНОПРОВОДУ**

Омічний опір обчислюється за формулою:

$$R = \frac{\rho l}{S} [1 + \alpha(\theta_2 - \theta_1)] , \quad (4.1)$$

де  $\rho$  – питомий опір провідника при температурі  $\theta_1$ ;

$l$  – довжина провідника, м;

$S$  – площа поперечного перетину провідника, мм<sup>2</sup>;

$\alpha$  – температурний коефіцієнт зміни опору (для міді і алюмінію  $\alpha = + 0,004$ );

$\theta_2$  – температура, при якій визначається опір провідника, °C.

Активний опір перевищує омічний у зв'язку з проявом поверхневого ефекту, ефекту близькості, а також втрат на гістерезис і вихрові струми в металевих конструкціях і навколишній арматурі.

Збільшення опору провідника за рахунок поверхневого ефекту і ефекту близькості враховується введенням коефіцієнта додаткових втрат

$$R_{\Sigma} = R_{\Omega} \cdot K_{\text{д.п.}} . \quad (4.2)$$

Зміна активного опору шинопроводу в результаті втрат в металевих конструкціях, що оточують шинопровід, враховується введенням коефіцієнта  $K_k$

$$R'_k = R_k \cdot K_k \quad (4.3)$$

Повний активний опір шинопроводу визначається по формулі:

$$R_{\text{акт}} = R_k + R'_k \quad (4.4)$$

Для визначення індуктивного опору шинопроводів великої протяжності (довжина значно перевищує лінійні розміри поперечного перетину шинопроводу) використовується формула:

$$L = 2 \left( \ln \frac{2l}{g} - 1 \right) \cdot 10^{-4}, \quad (4.5)$$

де  $l$  – довжина шинопроводу, см;

$g$  – середньгеометрична відстань площі поперечного перетину пакету шин, см.

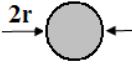
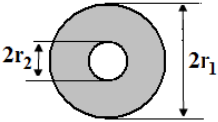
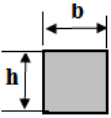
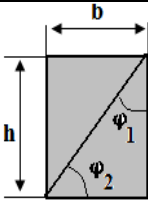
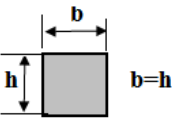
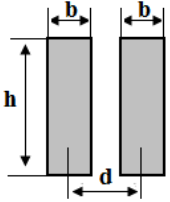
Взаємна індуктивність, Гн/км, для цього ж випадку визначається як:

$$M = 2 \left( \ln \frac{2l}{g_{12}} - 1 \right) \cdot 10^{-4}, \quad (4.6)$$

де  $g_{12}$  – середньгеометрична відстань між двома пакетами шинопроводу, см.

Рекомендується розглядати пакет шин що складається з декількох смуг як один провідник з відповідним для його виконання середньгеометричною відстанню [3]. Деякі середньгеометричні відстані площ перетину один від одного і самих від себе приведені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Формули для визначення середньгеометричної відстані шин залежно від конструктивного виконання шинопроводу

Фігура і позначення розмірів на ній	Формула для визначення середньгеометричної відстані фігури самої від себе	Параметри фігури
	$g = r e^{-0,25} \approx 0,782r$	Площа круга
	$l n g = l n r_1 - \frac{r_2^4}{(r_1^2 - r_2^2)} - l n \frac{r_1}{r_2} + 0,25 \frac{3r_2^2 - r_1^2}{r_1^2 - r_2^2}$	Площа кільця
	$g = 0,224(b + h)$	Площа прямокутника
	$(b + h)^2 l n g = b^2 l n b + h l n h + 2 b h l n d + h(b + h)\varphi_1 + b(b + h)\varphi_2 - \frac{2}{3}(b + h)^2$ $\varphi_1$ и $\varphi_2$ в радіанах $1^\circ = 0,017453$	Периметр прямокутника
	$l n g = l n b = 0,54 \text{ рад}$	Периметр квадрату
	$l n g + l n d + f$ $f$ – функція, визначувана по таблиці $\left(\frac{h}{d}; \frac{b}{h}\right)$ при $b < h$ $\left(\frac{b}{d}; \frac{b}{h}\right)$ при $b > h$	Між площами двох однакових прямокутників

Значення функції  $f$  приведені в таблиці 1 додатка А.

При розташуванні шин у вигляді рівностороннього трикутника, коли  $M_{12} = M_{23} = M_{13} = M$ , реактивний опір шинопроводу дорівнює:

$$X_1 = X_2 = X_3 = X = \omega(L - M) \quad (4.7)$$

При частоті  $f = 50$  Гц і довжині  $L = 1$  км, використовуючи формули (4.5) і (4.6) знаходимо:



$$x_1 = x_2 = x_3 = 628 \left( \ln \frac{d}{g} \right) 10^{-4}, \quad (4.8)$$

де  $d$  – відстань між осями фаз, см.

Коли шини розташовані в одній площині (вертикально або горизонтально) і відстані між осями шин 1 – 2 і 2 – 3 рівні  $d$ , а між осями 1 – 3 відповідно –  $2d$ , то

$$\begin{aligned} x_1 = x_3 &= \omega [L - 0,5(M_{13} + M_{12})] \\ x_1 = x_3 &= 628 \left( \ln \frac{d}{g} + 0,5 \ln 2 \right) = 628 \left( \ln \frac{d}{g} + 0,346 \right) 10^{-4} \\ x_2 &= \omega (L - M_{12}) = 628 \left( \ln \frac{d}{g} \right) 10^{-4} \end{aligned} \quad (4.9)$$

## 5 ВИБІР ПЕРЕРІЗУ ШИНОПРОВІДІВ

Кількість енергії, яка виділяється у провіднику при проходженні незмінного електричного струму визначається з виразом:

$$\Delta Q = I^2 \cdot R \cdot t, \quad (5.1)$$

де  $\Delta Q$  – кількість тепла, що виділилося;

$I$  – струм в провіднику;

$R$  – опір провідника, Ом;

$t$  – час проходження струму, с.

Частина тепла, що виділилося, витрачається на нагрів провідника, а частина відводиться в довкілля.

Коли шини знаходяться в повітрі, їх охолодження здійснюється в основному шляхом конвенції, яка обумовлена рухом повітря поблизу їх поверхні. Відведення тепла за рахунок теплопровідності і випромінювання незначне у зв'язку з низькою теплопровідністю повітря і невисокою температурою провідника. Через деякий проміжок часу настає теплова рівновага, коли кількість тепла, що виділилося, в провіднику стає рівною кількості тепла, що відводиться з його поверхні в довкілля.

Перевищення температури провідника над температурою довкілля пропорційно кількості тепла, що виділилося, тобто квадрату струму, що тривало проходить по провідникові і умов відведення тепла.

Гранично допустиму температуру нагріву шин при тривалій їх роботі рекомендується вибирати рівною 70 °С. Ця температура прийнята в основному для забезпечення задовільної роботи болтових з'єднань, наявних в ошиновках.

Значення гранично допустимих температур при короткочасних нагрівах, наприклад, при струмах кз прийняті рівними для мідних шин 300 °С і для алюмінієвих – 200 °С. При перевищенні температури вище 110 °С тривала робота шин, призводить до зниження їх механічних характеристик, внаслідок відпау.

Температура довкілля при проведенні розрахунків відповідно до ПУЭ рекомендується приймати рівною 25 °С.

Завдання розрахунку шин на нагрівання, як правило, зводиться до визначення струму, при якому температура провідника не перевищує допустимого значення. При цьому вказується допустима температура нагріву провідника, умови його охолодження і температура довкілля.

Здатність навантаження провідника характеризується тривало допустимим струмом навантаження, який визначається з умов його нагріву при заданих різницях температур провідника  $\theta$  і довкілля  $\theta_{\text{ср}}$ .

Розглянемо визначення здатності навантаження однорідних неізольованих провідників. При тепловій рівновазі кількість тепла, що виділяється за одиницю часу струмом  $I$  у проводі з опором  $R$ , дорівнює кількості тепла, що відводиться в довкілля за той же час:

$$\Delta Q = I^2 \cdot R_{\text{л}} = k_{\theta} \cdot F(\theta - \theta_{\text{ср}}), \quad (5.2)$$

де  $k_{\theta}$  – коефіцієнт тепловіддачі шляхом конвекції і випромінювання рівний кількості тепла, що відводиться в довкілля з 1 см<sup>2</sup> поверхні провідника при різниці температур між провідником і довкіллям 1 °С, Вт/(см<sup>2</sup>·°С);

$F$  – поверхня охолодження провідника, см<sup>2</sup>;

$\theta, \theta_{\text{ср}}$  – температури провідника і довкілля, °С.

Якщо температуру нагріву провідника прирівняти до тривало допустимої, то з рівняння (5.2) можна визначити тривало допустимий струм

$$I_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{k_{\text{доп}} \cdot F(\theta_{\text{доп}} - \theta_{\text{ос}})}{R_{\text{л}}}} \quad (5.3)$$

На практиці, для спрощення розрахунків електричних мереж, тривало допустимі струми навантаження для шин з різних матеріалів і за різних умов прокладення визначають по таблицях з урахуванням тривало допустимої температури довкілля. У зв'язку з цим перевірка шинопроводів на нагрівання зводиться до перевірки виконання умови:

$$I_{\text{доп}} \geq I_{\text{р.л}} , \quad (5.4)$$

де  $I_{\text{доп}}$  – максимальний робочий струм ланцюга, в який включений провідник;  
 $I_{\text{р.л}}$  – тривало допустимий з умов нагріву струм навантаження шинопроводу.

Допустимий струм навантаження провідника при змінному струмі дещо менший, ніж при постійному, оскільки при змінному струмі активний опір завжди дещо більше, ніж при постійному у зв'язку з проявом поверхневого ефекту. Розглянемо суть поверхневого ефекту на прикладі круглого провідника. Переріз провідника, і простір за його межами можна розділити на ряд циліндричних шарів, паралельних осі провідника. Чим ближче шар до осі провідника, тим з більшим числом індукційних ліній він зчеплений.

При зміні струму, що проходить через провідник, змінюється і магнітне поле. У шарах провідника це поле наводить е.р.с, яка протидіє зміні струму. Ця протидія тим більше, чим більше наведена е.р.с. тобто чим більше індукційних ліній має зчеплення з розглядаємим шаром, а отже, тим більше, чим ближче шар до осі провідника. Таким чином, поверхневі шари провідника мають менші е.р.с, які протидіють зміні струму, а шари, що лежать біля осі провідника, мають великі е.р.с, які протидіють струму провідника, внаслідок чого відбувається витіснення струму до периферії провідника. Особливо це явище проявляється при суцільному перерізі шинопроводу, наприклад, шинопроводу прямокутного перерізу (рис. 5.1).

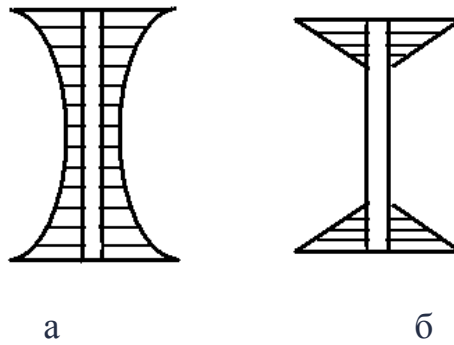


Рисунок 5.1 – Розподіл поверхневої щільності струму по периметру прямокутної шини : а – при частоті  $f = 50\text{Гц}$ ; б – при частоті  $f = 400\text{Гц}$

На поверхневий ефект роблять вплив геометричні розміри шинопроводу, магнітна проникність матеріалу середовища та шинопроводу, а також питома провідність матеріалу шинопроводу.

Для зменшення впливу поверхневого ефекту застосовують шинопроводи трубчастого перерізу, в яких шар, що проводить, розташований тільки по поверхні перерізу. В результаті цього опір провідника тільки трохи збільшується.

Збільшити здатність навантаження шин дозволяє фарбування шин. Відведення тепла за рахунок випромінювання пофарбованих шин значно більше, чим нефарбованих, і тому охолодження шин шляхом випромінювання покращується. За незмінних температурних умов допустимий струм навантаження пофарбованих шин на 12 – 15 % більше, чим нефарбованих.

Здатність навантаження пакету з декількох шин менша, ніж сумарна здатність навантаження тієї ж кількості однакових шин таких же розмірів. Зі збільшенням числа смуг на фазу допустиме навантаження зростає непропорційно числу смуг в пакеті оскільки при змінному струмі позначається ефект близькості.

При близько розташованих, декількох провідниках, їх магнітні поля впливають один на одного і в них відбувається перерозподіл струму по перерізу. Якщо струми в провідниках спрямовані однаково (рис. 5.2, а), найбільша щільність струму буде в найбільш віддалених одна від однієї частинах перерізів; при різних напрямках струмів (рис. 5.2, б) найбільша щільність струму спостерігається в найбільш близьких одна до однієї частинах перерізів провідників.

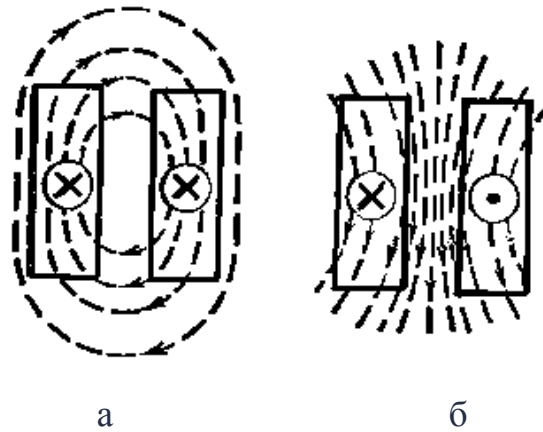


Рисунок 5.2 – Картина магнітного поля в площині поперечного перерізу двох паралельних провідників: а – струми в провідниках мають однаковий напрям: б – струми в провідниках мають різний напрям

Допустимі тривалі струми для пофарбованих шин приведені в таблицях А.2–А.5 додатка А.

Допустимі тривалі струми для чотирьох шин з розташуванням смуг по сторонам квадрата (рис. А.1 дод. А) приведені в таблиці А.4 додатка А, тривалі струми для шин коробчатого перерізу (рис. А.2 дод. А) приведені в таблиці А.5 додатка А.

Допустимі тривалі струми приведені з розрахунку допустимою температурою нагріву провідників рівної 70 °С, при температурі довкілля 25 °С.

## 6 ВТРАТИ ПОТУЖНОСТІ І НАПРУГИ В ШИНОПРОВОДАХ

У загальному вигляді втрати активної потужності, в трифазному шинопроводі без урахування втрат в конструкціях можуть бути визначені по формулі:

$$\Delta P_{\text{ш}} = I_A^2 \cdot R_A + I_B^2 \cdot R_B + I_C^2 \cdot R_C, \quad (6.1)$$

де  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  – струми у фазах;

$R_A$ ,  $R_B$ ,  $R_C$  – активні опори відповідних фаз.

При однакових опорях шин і рівномірному завантаженні фаз втрати потужності визначаються по формулі:

$$\Delta P_{\text{ш}} = 3I^2 R_{\text{д.п}} \cdot 10^{-3} \quad (6.2)$$

При відомих втратах в конструкції шинопроводу, повні втрати визначаються як:

$$\Delta P_{\text{ш}} = 3I^2 R_{\text{д.п}} \cdot 10^{-3} + \Delta P_{\text{ш.к}} , \quad (6.3)$$

де  $\Delta P_{\text{ш.к}}$  – втрати в конструкції шинопроводу, кВт;

$K_{\text{дп}}$  – коефіцієнт збільшення втрат за рахунок конструкції шинопроводу, поверхневого ефекту і ефекту близькості.

Приблизно визначити втрати потужності в симетричному шинопроводі можна по кривих, приведених на рисунках 6.1 і 6.2. При побудові графіків враховувався нагрів шин розрахунковим струмом. Коефіцієнт додаткових втрат в шинопроводі був прийнятий рівним 1,5.

Ці графіки можуть бути використані і для розрахунку несиметричних шинопроводів, але при цьому отримане значення втрат активної потужності слід помножити на відношення  $K_{\text{д.п.}}/1,5$ .

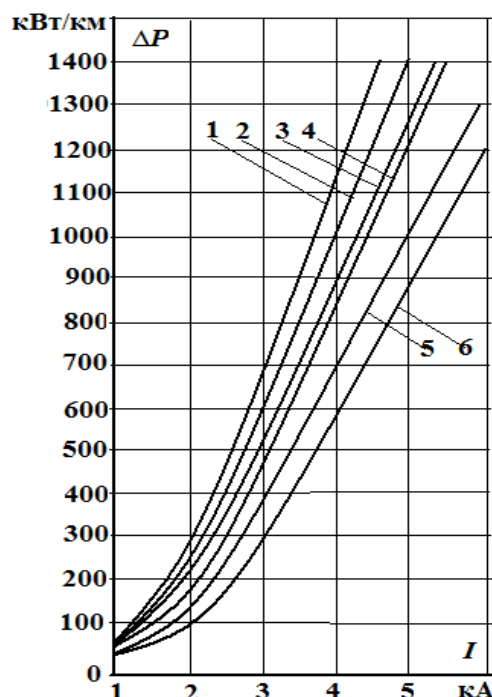


Рисунок 6.1 – Криві для визначення втрат активної потужності в трьох фазах симетричного шинопроводу з шинним пакетом з двох шин коробчатого перерізу. 1 – АД31Т 2 (100 x 45x6); 2 – А2 (100x45x6); 3 – АД31Т 2 (125x55x6); 4 – А2(125x55x6); 5 – АД31Т 2(175x80x8); 6 – А2(175x80x8).

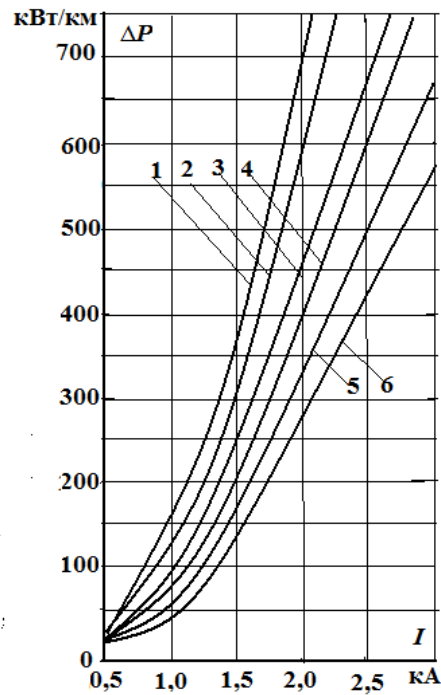


Рисунок 6.2 – Криві для визначення втрат активної потужності в трьох фазах симетричного шинопроводу з одинарними шинами коробчатого перерізу. 1 – АД31Т 2 (100x45x6); 2 – А2 (100x45x6); 3 – АД31Т 2 (125x55x6); 4 – А2 (125x55x6); 5 – АД31Т 2 (175x80x8); 6 – А2 (175x80x8)

Для визначення втрат реактивної потужності використовується формула:

$$\Delta Q_{\text{ш}} = I_A^2 \cdot X_A + I_B^2 \cdot X_B + I_C^2 \cdot X_C, \quad (6.4)$$

де  $X_A, X_B, X_C$  – індуктивні опори відповідних фаз.

При однакових струмах, що протікає по фазах, маємо:

$$\Delta Q_{\text{ш}} = 3I^2 \cdot X \cdot 10^{-3} \quad (6.5)$$

Приблизно визначити втрати реактивної потужності можливо по графіках (рис. 6.3).

Для визначення втрат напруги використовується формула:

$$\Delta U_{\text{ш}} = I(R_{\text{ш}} \cdot \cos\varphi + X \cdot \sin\varphi) \quad (6.6)$$

Фазна напруга у кінці шинопроводу визначається за формулою:

$$U_2 = U_1 - I(R_{\text{ш}} \cdot \cos\varphi + X \cdot \sin\varphi) \quad (6.7)$$

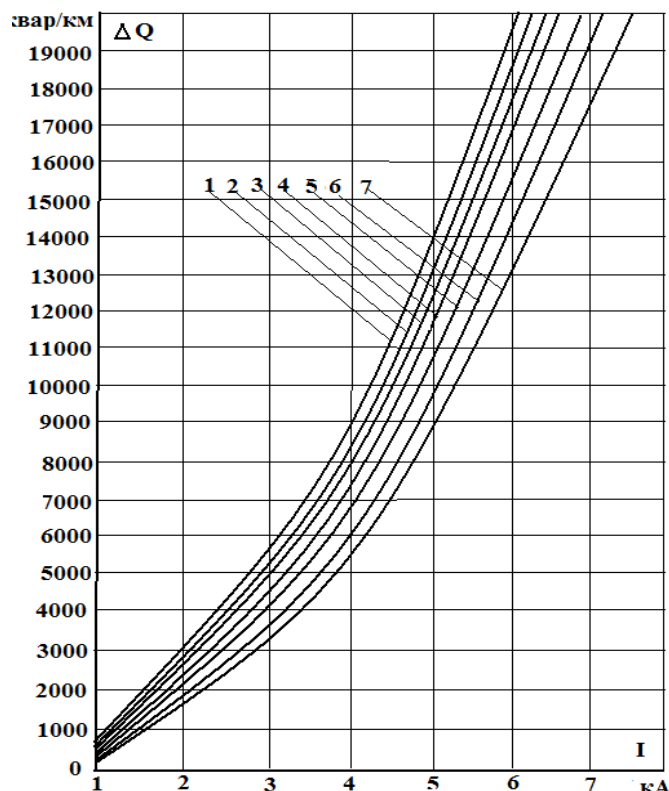


Рисунок 6.3 – Криві для визначення втрат реактивної потужності в трьох-фазних симетричних шинопроводах з шинними пакетами з двох шин коробчастого перерізу при відстані між фазами 650 і 1 000 мм:  
 1 – 2 (100x45x6) -1000; 2 – 2 (125x55x6)-1000; 3 – 2 (150x65x7)-1000;  
 4 – 2 ( 175x80x8)-1000; 5– 2 (100x45x6)-650; 6 – 2 (150x65x7)-650;  
 7 – 2 ( 175x80x8)-650.

## 7 МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ШИНОПРОВОДІВ

### 7.1 Призначення програмного комплексу ELCUT

Останнім часом для аналізу режимів роботи електрообладнання активно застосовується комп'ютерне моделювання їх електромагнітних і теплових полів. Однією з таких програм є програмний комплекс ELCUT, який представляє діалогову систему програм для розрахунку і зображення картини обчисленого поля [4].

Основні типи завдань, які вирішуються в ELCUT наступні: магнітостатика, нестационарне магнітне поле, магнітне поле змінних струмів, електростатика, електричне поле постійних струмів, електричне поле змінних струмів, не-



стаціонарне електричне поле, теплопередача і задачі теорії пружності. Розглянемо можливості програмного комплексу ELCUT при вирішенні зазначених типів завдань.

#### *Магнітостатика.*

Пакет ELCUT може застосовуватися для вирішення лінійних і нелінійних задач магнітостатики в плоскій і осесиметричній постановці. У результаті розрахунку можуть бути визначені такі величини, як магнітна індукція, напруженість магнітного поля, магнітні сили й моменти, індуктивність, а також потокозщеплення з різними обмотками. Дані параметри використовуються при проектуванні і дослідженні режимів роботи електричних машин, постійних магнітів, реакторів, магнітних екранів і т.д.

#### *Нестаціонарне магнітне поле.*

При вирішенні завдань даного типу пакет ELCUT дозволяє розраховувати поле, яке збуджене струмами довільної форми і проводити аналіз перехідних процесів. Моделювати нестаціонарне магнітне поле можливо спільно з приєднаним електричним ланцюгом, яке містить довільну кількість пасивних елементів (резисторів, конденсаторів, котушок) з'єднаних між собою і з джерелами струму і напруги. У результаті розрахунку нестаціонарного магнітного поля визначаються змінні в часі магнітна індукція, напруженість магнітного поля, індуквані струми, індуктивності, потокозщеплення і механічні сили.

#### *Магнітне поле змінних струмів.*

Даний вид аналізу рекомендується використовувати для розрахунку магнітних полів, створених синусоїдальними струмами, а також для розрахунку струмів, індукованих змінним магнітним полем в провідному середовищі. Такі завдання виникають при розрахунку параметрів електричних машин, індукторів, соленоїдів і т.д. У процесі розрахунку визначаються індукція і напруженість магнітного поля, індуктивність, комплексний опір, потужність тепловиділення, магнітні сили і їх моменти. Особливий вид завдання магнітного поля змінних струмів нелінійний аналіз. Він дозволяє оцінити з певним ступенем точності поведінку систем з феромагнітними сердечниками.

### *Електростатика.*

Розрахунок електростатичного поля виконується при проектуванні і дослідженні режимів роботи ізоляційних конструкцій, ліній електропередач, силових кабелів, конденсаторів, високовольного устаткування, а також при аналізі поширенні електромагнітних хвиль. При цьому визначаються наступні фізичні величини: електричний потенціал, напруженість поля, електростатичний зсув, заряд, ємність і електростатична сила.

### *Електричне поле постійних струмів.*

Розрахунок параметрів електричного поля постійних струмів виконується при аналізі різних провідних систем, а також при розрахунку опору заземлення. Для цього обчислюється напруга, щільність струму, а також потужність тепло-виділення. Крім того, пакет ELCUT дозволяє визначати залежність електропровідності використаного матеріалу від температури.

### *Електричне поле змінних струмів*

Завдання розрахунку параметрів електричних полів викликане змінними струмами і напругами виникає при аналізі цих полів в різних системах ізоляції, що містять неідеальні діелектрики. Програмний комплекс ELCUT дозволяє виконати розрахунок омичних втрат у діелектриках, реактивну потужність, напруженість електричного поля, потенціал, а також сили і обертаючі моменти. Результати розрахунку електричних сил можуть використовуватися при вирішенні задачі визначення механічних напружень, а результати розрахунку електричних втрат – при вирішенні задачі теплопередачі.

### *Нестаціонарне електричне поле.*

Завдання розрахунку параметрів нестаціонарного електричного поля виникає в тих випадках, коли прикладений до електродів потенціал може змінюватися у часі; діелектрик має невелику провідність, властивості діелектрика (діелектрична проникність і електропровідність) залежать від напруженості електричного поля.

Такий аналіз виконується при розрахунку ізоляційних систем, що містять нелінійні і напівпровідникові елементи, а також при впливі на ізоляційну сис-

тему імпульсних впливів. При цьому визначаються струми витоку і зсуву, омічні втрати у діелектрику, розподіл потенціалу та напруженості електричного поля, а також сили і обертаючі моменти.

#### *Теплопередача.*

Аналіз температурних режимів виконується при проектуванні різних електромагнітних і механічних пристроїв. Для цієї мети виконується розрахунок теплового потоку, температурного градієнту, теплових втрат і розподілу температури. За допомогою програмного комплексу ELCUT можна провести лінійний і нелінійний стаціонарний температурний аналіз в плоскій і осесиметричній постановці. Крім того, можна розрахувати тепловий перехідний процес з постійними в часі граничними умовами.

#### *Задачі теорії пружності.*

Пакет ELCUT дозволяє вирішувати лінійну задачу пружності суцільного середовища для плосконапруженого, плоскодеформованого або осесиметричного напруженого стану. Розрахунок пружно-напруженого стану застосовується при проектуванні більшості електричних або механічних конструкцій. На підставі отриманих даних визначаються можливі деформації в проєктованих об'єктах.

Застосування програмного комплексу ELCUT передбачає виконання операцій з різними типами документів. Кожен документ відкривається у своєму окремому вікні всередині головного вікна. У ELCUT використовуються наступні типи документів:

*Опис завдання* відповідає кожній фізичній задачі, розв'язуваної за допомогою ELCUT. Цей документ містить такі загальні характеристики, як тип завдання («Електростатика», «Магнітостатики», «Теплопередача» та ін.), клас моделі (плоска або осесиметрична) і т.д.

*Геометрична модель*, – документ, який містить повний опис геометрії завдання, мітки різних її частин і розрахункову сітку кінцевих елементів.

*Фізичні властивості, або Дані.* Ці документи містять значення властивостей матеріалів, джерел поля і граничних умов для різних помічених геометричних об'єктів моделі.

*Електричний ланцюг* – документ, який містить схему приєднаного електричного ланцюга і параметри, що входять в цей ланцюг елементів. Спільне рішення задачі розрахунку магнітного поля з рівняннями приєднаного електричного ланцюга можливе для нестационарного магнітного поля і магнітного поля змінних струмів.

У процесі виконання завдання створюється файл результатів, який має розширення **.res**, і ім'я, що збігається з ім'ям файлу. Переміщується даний файл у ту ж папку, в якій знаходиться файл опису завдання.

Для проведення аналізу результатів у ELCUT дані можуть бути представлені наступними способами:

- картини поля; локальні польові значення;
- інтегральні величини;
- графіки і таблиці в просторі;
- графіки і таблиці у часі;
- таблиці і графіки напруг і струмів в елементах приєднаного електричного ланцюга.

Будь-яка картина або фізична величина, що відображається при аналізі результатів рішення, може бути скопійована в буфер обміну для подальшого використання.

Послідовність операцій при вирішенні тієї чи іншої задачі представлена на блок-схемі (рис. 7.1).



Рисунок. 7.1 – Блок-схема послідовності виконання операцій

Розглянемо застосування програмного комплексу ELCUT для розрахунку теплових та електромагнітних полів в шинопроводах методом кінцевих елементів. Вибір температури та напруженості електричного поля для дослідження режимів роботи шинопроводів обумовлен суттєвим впливом на їх характеристики.

## 7.2 Моделювання електричних полів у шинопроводах

Використаємо програму EICUT для вивчення розподілу напруженості електричного поля в шинопроводі, конструкція якого приведена на рисунку 7.2.

Шинопровід призначений для роботи в трифазних мережах з напругою 1000 В,

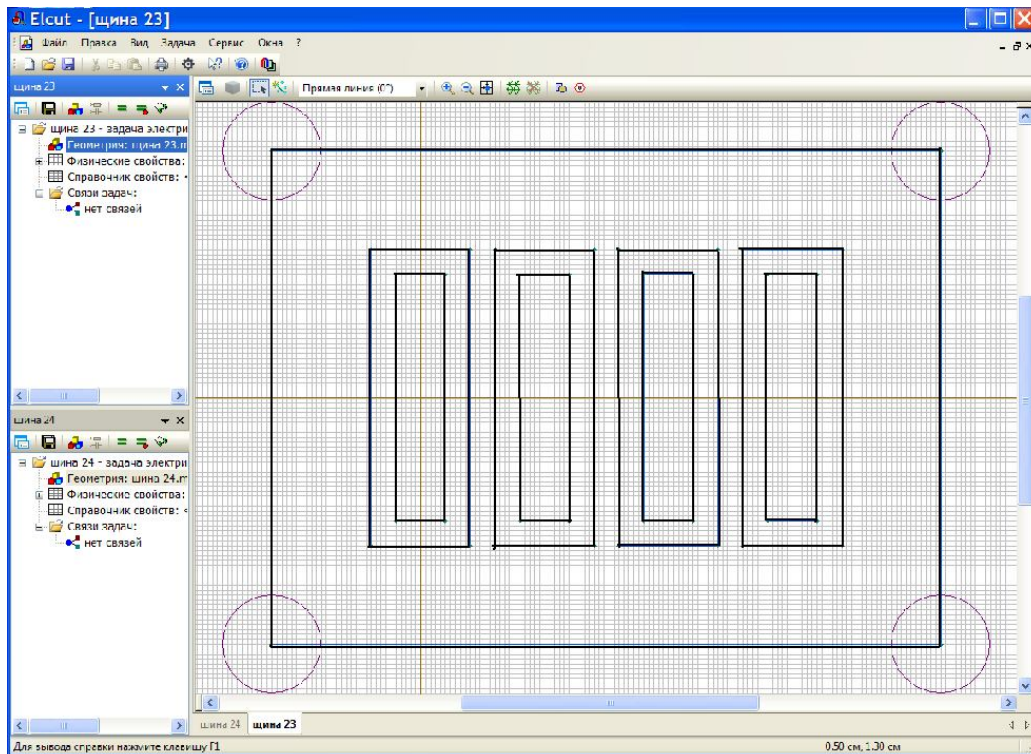


Рисунок 7.2 – Конструкція шинопроводу

Розрахункова область, в якій програмою проводиться розрахунок поля може бути виділена будь-якої геометричної фігурою (квадратом, прямокутником, колом і т.д.) в залежності від геометричних особливостей завдання. У нашому випадку для виділення розрахункової області будемо використовувати прямокутник. Фігуру будемо з відрізків прямих, які називаються ребрами. Кінці ребер називаються вершинами.

Струмopровідні шини мають наступні геометричні розміри: висота – 50 мм, товщина шини – 10 мм. Всі шини, включаючи нульову, мають ізоляцію, то-

вшина якої 5 мм, відносна діелектрична проникність – 4. Відстань між ізолюваними шинами – 5 мм. Висота корпусу 100 мм, ширина –135 мм.

Розподіл напруженості електричного поля наведено на рисунку 7.3.

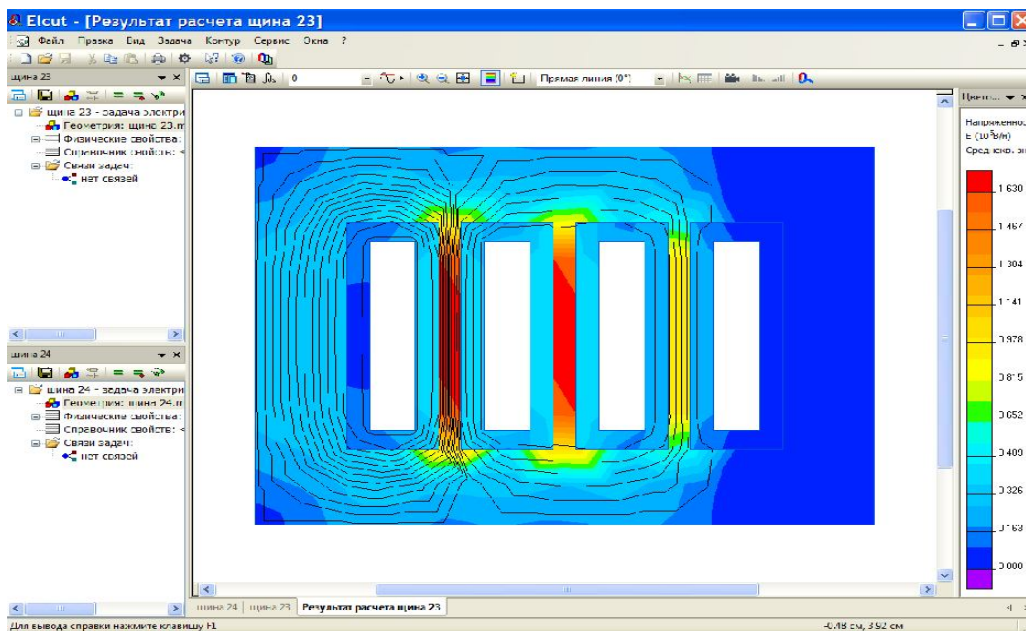


Рисунок 7.3 – Розподіл напруженості електричного поля в шинопроводі

Розподіл напруги, показано на рисунку 7.4.

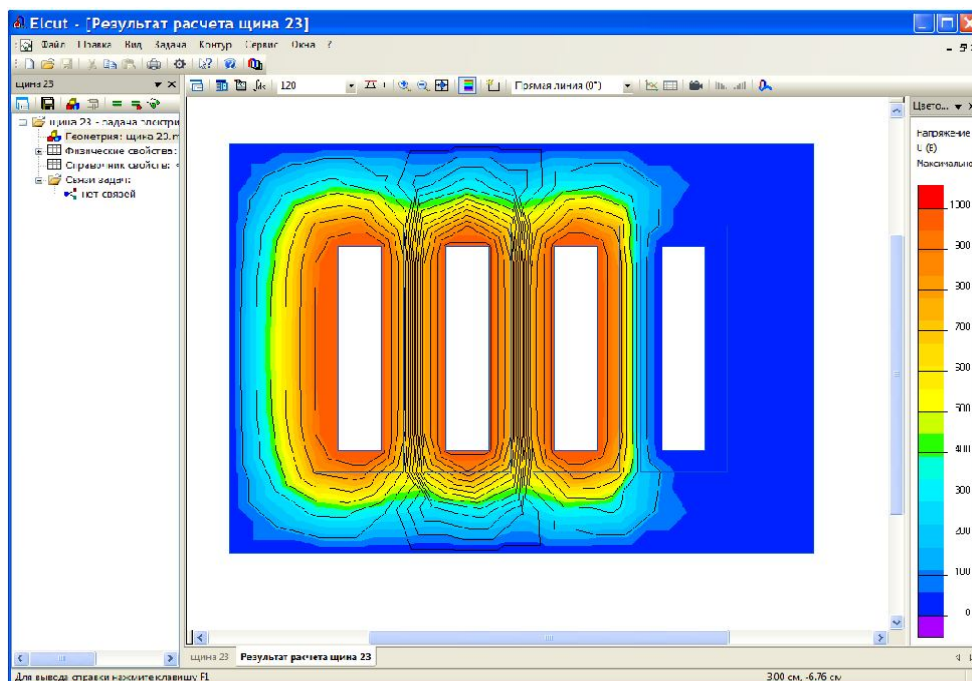


Рисунок 7.4 – Розподіл напруги в перетині шинопровода

Аналогічні розрахунки проведені для шинопровода, що має ті ж геометричні параметри, але в якому нульова шина не мала ізоляції. Розподіл напруженості поля наведено на рисунку 7.5 і напруги – на рисунку 7.6.

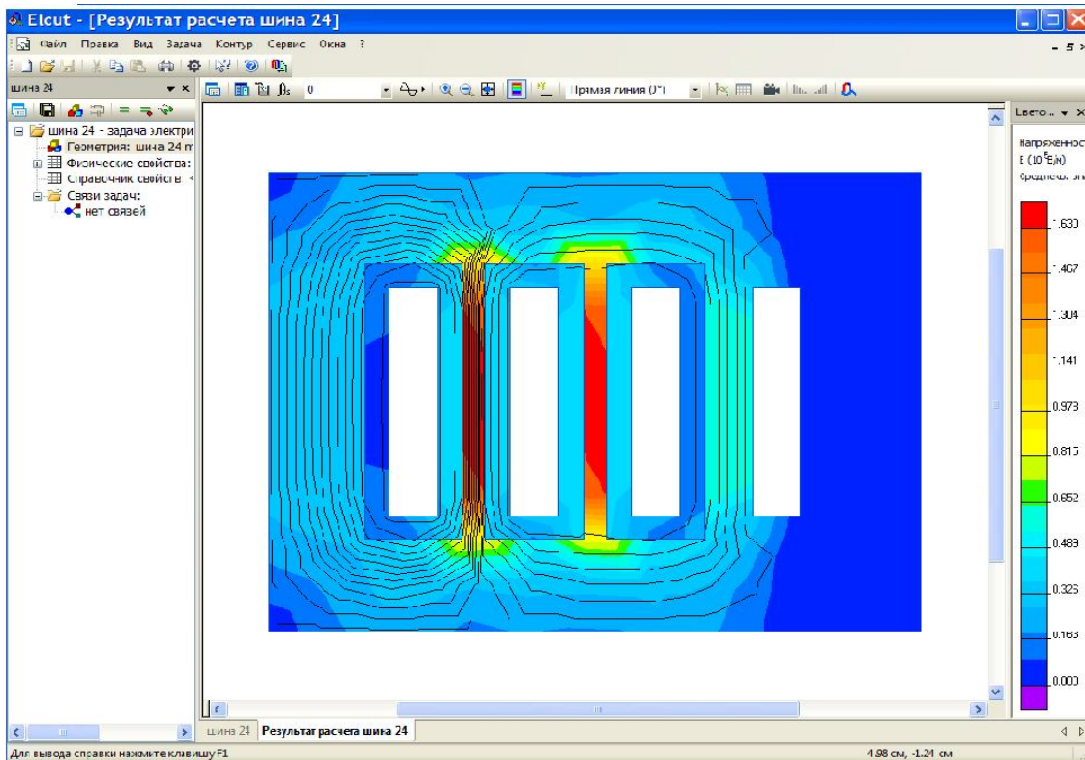


Рисунок 7.5 – Розподіл напруженості електричного поля

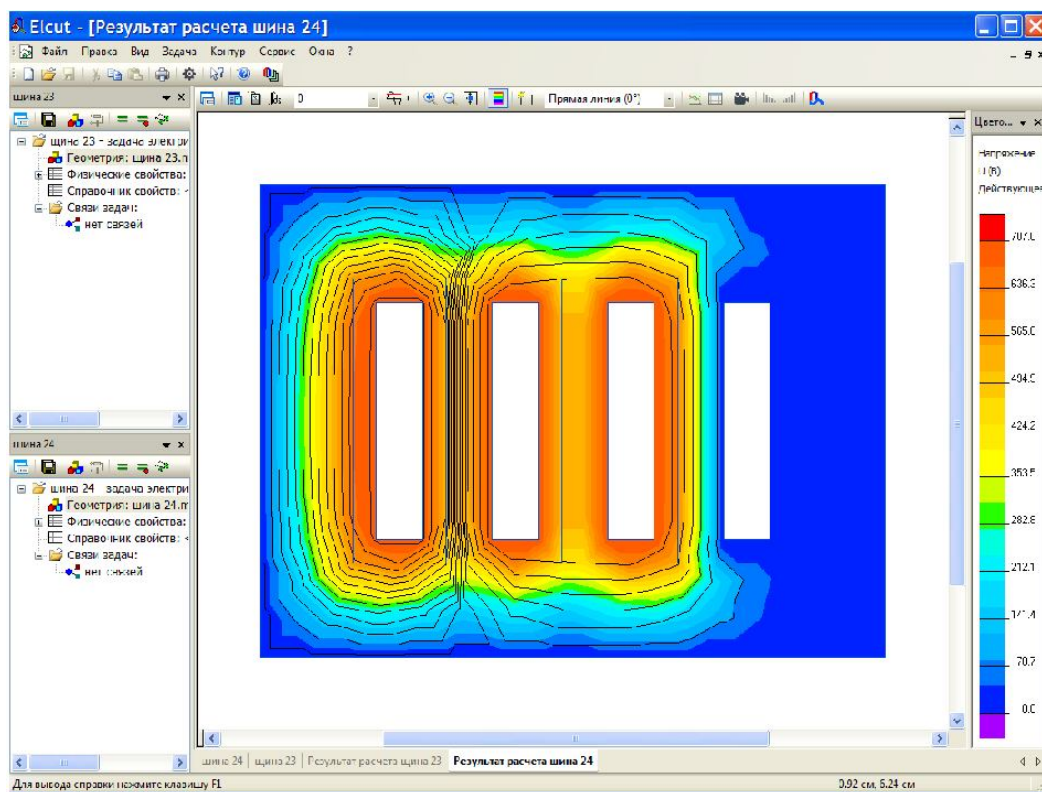


Рисунок 7.6 – Розподіл напруги в перетині шинопровода



Програмний комплекс дозволяє представити рішення задачі не тільки у вигляді розподілу напруженості електричного поля або напруги, але також і у вигляді безлічі екіпотенційних областей. Областям з більш темними кольорами відповідає менший потенціал.

Як впливає з наведених рисунків, максимальне значення напруженості електричного поля мають ділянки, розташовані між струмоведучими шинами.

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Рудченко Ю. А. Монтаж и эксплуатация электрических сетей [Электронный ресурс] / Ю.А. Рудченко. – Режим доступа: <https://elektro-montagnik.ru>
2. Межгосударственный стандарт ГОСТ 6815-79. Шинопроводы магистральные и распределительные переменного тока на напряжение до 1000 В. Общие технические условия. – М. : Госстандарт, 2003. – 17 с.
3. Определение активного и реактивного сопротивления шинпровода [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.ess-ltd.ru/elektro/-shinoprovod-opred.php>
4. Elcut. Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов. Руководство пользователя. – Санкт-Петербург : ООО «Тор», 2013. – 37 с.

## ДОДАТОК А

### Таблиця А.1– Значення функції $f$

Значення $f$ в формулі $\ln G = \ln d + f$												
b>c	b/d	c/b=0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,05	-0,0002	-0,0002	-0,0002	-0,0002	-0,0002	-0,0002	-0,0002	-0,0001	-0,0001	-0,0001	-0,0001	+0,000
0,10	-0,0008	-0,0008	-0,0008	-0,0008	-0,0008	-0,0007	-0,0006	-0,0005	-0,0004	-0,0003	-0,0002	+0,000
0,15	-0,0019	-0,0019	-0,0018	-0,0017	-0,0017	-0,0016	-0,0014	-0,0012	-0,0010	-0,0006	-0,0003	+0,000
0,20	-0,0034	-0,0033	-0,0032	-0,0030	-0,0028	-0,0025	-0,0021	-0,0017	-0,0012	-0,0006	-0,0006	+0,000
0,25	-0,0053	-0,0052	-0,0051	-0,0048	-0,0044	-0,0039	-0,0034	-0,0027	-0,0019	-0,0010	-0,0010	+0,0000
0,30	-0,0076	-0,0076	-0,0073	-0,0069	-0,0064	-0,0057	-0,0048	-0,0038	-0,0027	-0,0014	-0,0014	+0,0001
0,35	-0,0105	-0,0104	-0,0100	-0,0095	-0,0087	-0,0078	-0,0066	-0,0052	-0,0036	-0,0018	-0,0018	+0,0002
0,40	-0,0138	-0,0136	-0,0132	-0,0125	-0,0115	-0,0102	-0,0086	-0,0068	-0,0047	-0,0024	-0,0024	+0,0002
0,45	-0,0176	-0,0174	-0,0169	-0,0159	-0,0146	-0,0130	-0,0110	-0,0086	-0,0059	-0,0029	-0,0029	+0,0003
0,50	-0,2020	-0,0217	-0,0210	-0,0198	-0,0182	-0,0161	-0,0136	-0,0106	-0,0073	-0,0036	-0,0036	+0,0005
0,55	-0,0269	-0,0266	-0,0257	-0,0243	-0,0222	-0,0197	-0,0164	-0,0128	-0,0087	-0,0042	-0,0042	+0,0007
0,60	-0,0325	-0,0321	-0,0310	-0,0292	-0,0267	-0,0235	-0,0196	-0,0152	-0,0103	-0,0048	-0,0048	+0,0010
0,65	-0,0388	-0,0383	-0,0369	-0,0347	-0,0316	-0,0277	-0,0231	-0,0178	-0,0120	-0,0055	-0,0055	+0,0014
0,70	-0,0458	-0,0452	-0,0435	-0,0408	-0,0370	-0,0324	-0,0269	-0,0207	-0,0137	-0,0062	-0,0062	+0,0019
0,75	-0,0536	-0,0529	-0,0509	-0,0476	-0,0431	-0,0375	-0,0310	-0,0237	-0,0156	-0,0070	-0,0070	+0,0023
0,80	-0,0625	-0,0616	-0,0591	-0,0551	-0,0497	-0,0431	-0,0354	-0,0269	-0,0176	-0,0075	-0,0075	+0,0031
0,85	-0,0725	-0,0714	-0,0683	-0,0634	-0,0569	-0,0491	-0,0401	-0,0302	-0,0195	-0,0081	-0,0081	+0,0037
0,90	-0,0839	-0,0825	-0,0786	-0,0726	-0,0648	-0,0555	-0,0451	-0,0337	-0,0216	-0,0087	-0,0087	+0,0046
0,95	-0,0973	-0,0954	-0,0903	-0,0828	-0,0734	-0,0625	-0,0504	-0,0374	-0,0236	-0,0092	-0,0092	+0,0056
1,00	-0,1137	-0,1106	-0,1037	-0,0942	-0,0828	-0,0700	-0,0561	-0,0413	-0,0258	-0,0098	-0,0098	+0,0065
b<c	c/d	b/c=0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,1	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0007	0,0006	0,0005	0,0004	0,0003	0,0002	0,0002	0,0000
0,2	0,0033	0,0033	0,0032	0,0030	0,0028	0,0025	0,0021	0,0017	0,0012	0,0007	0,0007	0,0000
0,3	0,0074	0,0073	0,0071	0,0067	0,0062	0,0056	0,0048	0,0038	0,0027	0,0015	0,0015	0,0001
0,4	0,0129	0,0128	0,0124	0,0118	0,0109	0,0098	0,0084	0,0068	0,0050	0,0027	0,0027	0,0003
0,5	0,0199	0,0197	0,0191	0,0182	0,0169	0,0152	0,0131	0,0106	0,0077	0,0043	0,0043	0,0005
0,6	0,0281	0,0278	0,0271	0,0258	0,0240	0,0216	0,0185	0,0152	0,0111	0,0064	0,0064	0,0011
0,7	0,0374	0,0371	0,0361	0,0344	0,0320	0,0290	0,0251	0,0206	0,0155	0,0090	0,0090	0,0019
0,8	0,0477	0,0473	0,0461	0,0440	0,0411	0,0373	0,0321	0,0268	0,0200	0,0129	0,0129	0,0031
0,9	0,0589	0,0584	0,0569	0,0544	0,0506	0,0464	0,0404	0,0338	0,0254	0,0158	0,0158	0,0046
1,0	0,0708	0,0702	0,0655	0,0655	0,0614	0,0560	0,0492	0,0406	0,0313	0,0199	0,0199	0,0065
0,9	0,0847	0,0841	0,0821	0,0787	0,0738	0,0675	0,0596	0,0501	0,0382	0,0250	—	—
0,8	0,1031	0,1023	0,0999	0,0959	0,0903	0,0829	0,0745	0,0622	0,0485	—	—	—
0,7	0,1277	0,1268	0,1240	0,1191	0,1125	0,1037	0,0925	0,0788	—	—	—	—
0,6	0,1618	0,1607	0,1573	0,1507	0,1436	0,1329	0,1194	—	—	—	—	—
0,5	0,2107	0,2094	0,2053	0,1984	0,1886	0,1754	—	—	—	—	—	—
0,4	0,2843	0,2826	0,2776	0,2691	—	—	—	—	—	—	—	—
0,3	0,4024	0,4003	0,3942	0,3831	—	—	—	—	—	—	—	—
0,2	0,0132	0,6105	0,6021	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,1	1,0787	1,1075	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
d/c	b/c=0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	

Таблиця А.2 – Допустимий тривалий струм для шин круглого і трубчастого перерізів

Діа-метр, мм	Круглі шини		Мідні труби		Алюмінієві труби		Стальні труби				
	Струм*, А		Внутрішній і зовнішній діаметри, мм	Струм, А	Внутрішній і зовнішній діаметри, мм	Струм, А	Умовний прохід, мм	Товщина стінки, мм	Зовнішній діаметр, мм	Змінний струм, А	
	Мідні	Алюмінієві								Без розрізу	З поздовжнім розрізом
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
6	155/155	120/120	12/15	340	13/16	295	8	2,8	13,5	75	
7	195/195	150/150	14/18	460	17/20	345	10	2,8	17,0	90	
8	235/235	180/180	16/20	505	18/22	425	15	3,2	21,3	118	
10	320/320	245/245	18/22	555	27/30	500	20	3,2	26,8	145	
12	415/415	320/320	20/24	600	26/30	575	25	4,0	33,5	180	
14	505/505	390/390	22/26	650	25/30	640	32	4,0	42,3	220	
15	565/565	435/435	25/30	830	36/40	765	40	4,0	48,0	255	
16	610/615	475/475	29/34	925	35/40	850	50	4,5	60,0	320	
18	720/725	560/560	35/40	1100	40/45	935	65	4,5	75,5	390	
19	780/785	605/610	40/45	1200	45/50	1040	80	4,5	88,5	455	
20	835/840	650/655	45/50	1330	50/55	1150	100	5,0	114	670	770
21	900/905	695/700	49/55	1580	54/60	1340	125	5,5	140	800	890
22	955/965	740/745	53/60	1860	64/70	1545	150	5,5	165	900	1000
25	1140/1165	895/900	62/70	2295	74/80	1770	-	-	-	-	-
27	1270/1290	980/1000	72/80	2610	72/80	2035	-	-	-	-	-
28	1325/1360	1025/1050	75/85	3070	75/85	2400	-	-	-	-	-
30	1450/1490	1120/1155	90/95	2460	90/95	1925	-	-	-	-	-
35	1770/1865	1370/1450	95/100	3060	90/100	2840	-	-	-	-	-
38	1960/2100	1510/1620	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	2080/2260	1610/1750	-	-	-	-	-	-	-	-	-
42	2200/2430	1700/1870	-	-	-	-	-	-	-	-	-
45	2380/2670	1850/2060	-	-	-	-	-	-	-	-	-

\* В чисельнику наведені навантаження при змінному струмі, в знаменнику при постійному.

Таблиця А.3 – Допустимий тривалий струм для шин прямокутного пере  
різу

Розміри, мм	Мідні шини				Алюмінієві шини			
	Струм, А, при кількості полос на полюс або фазу							
	1	2	3	4	1	2	3	4
15 x 3	210	-	-	-	165	-	-	-
20 x 3	275	-	-	-	215	-	-	-
25 x 3	340	-	-	-	265	-	-	-
30 x 4	475	-	-	-	365/370	-	-	-
40 x 4	625	-/1090	-	-	480	-/855	-	-
40 x 5	700/705	-/1250	-	-	540/545	-/965	-	-
50 x 5	860/870	-/1525	-/1895	-	665/670	-/1180	-/1470	-
50 x 6	955/960	-/1700	-/2145	-	740/745	-/1315	-/1655	-
60 x 6	1125/1145	1740/1990	2240/2495	-	870/880	1350/1555	1720/1940	-
80 x 6	1480/1510	2110/2630	2720/3220	-	1150/1170	1630/2055	2100/2460	-
100 x 6	1810/1875	2470/3245	3170/3940	-	1425/1455	1935/2515	2500/3040	-
60 x 8	1320/1345	2160/2485	2790/3020	-	1025/1040	1680/1840	2180/2330	-
80 x 8	1690/1755	2620/3095	3370/3850	-	1320/1355	2040/2400	2620/2975	-
100 x 8	2080/2180	3060/3810	3930/4690	-	1625/1690	2390/2945	3050/3620	-
120 x 8	2400/2600	3400/4400	4340/5600	-	1900/2040	2650/3350	3380/4250	-
60 x 10	1475/1525	2560/2725	3300/3530	-	1155/1180	2010/2110	2650/2720	-
80 x 10	1900/1990	3100/3510	3990/4450	-	1480/1540	2410/2735	3100/3440	-
110 x 10	2310/2470	3610/4325	4650/5385	5300/6060	1820/1910	2860/3350	3650/4160	4150/4400
120 x 10	2650/2950	4100/5000	5200/6250	5900/6800	2070/2300	3200/3900	4100/4860	4650/5200

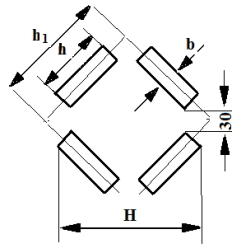


Рисунок А.1 – Розташування шин по сторонах квадрата

Таблиця А.4 – Допустимі тривалі струми для чотирьох шин з розташуванням смуг по сторонах квадрата

Розміри , мм				Поперечний переріз чотирьохсмугової шини мм <sup>2</sup>	Струм, А, на пакет шин	
h	b	h <sub>1</sub>	H		Мідні	Алюмінієві
80	8	140	157	2 560	5 750	4 550
80	10	144	160	3 200	6 400	5 100
100	8	160	185	3 200	7 000	5 550
100	10	164	188	4 000	7 700	6 200
120	10	184	216	4 800	9 050	7 300

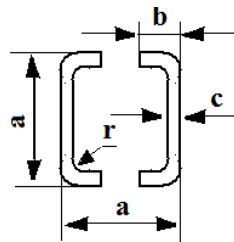


Рисунок А.2 – Шина коробчастого перерізу

Таблиця А.5 – Допустимі тривалі струми для шин коробчастого перерізу

Розміри , мм				Поперечний переріз однієї шини, мм <sup>2</sup>	Струм на дві шини, А	
a	b	c	r		Мідні	Алюмінієві
75	35	4	6	520	2 730	-
75	35	5,5	6	695	3 250	2 670
100	45	4,5	8	775	3 620	2 820
100	45	6	8	1 010	4 300	3 500
125	55	6,5	10	1 370	5 500	4 640
150	65	7	10	1 785	7 000	5 650
175	80	8	12	2 440	8 550	6 430
200	90	12	16	4 040	10 500	8 830
225	105	12,5	16	4 880	12 500	10 300

*Навчальне видання*

**ДЬЯКОВ Євген Дмитрович**  
**ВОРОПАЙ Валентина Григорівна**

**КАБЕЛЬНІ ТА ПОВІТРЯНІ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ**  
**ШИНОПРОВОДИ**

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

(для студентів 4 курсу денної, 5 курсу заочної і прискореної форм навчання освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр» за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка).

Відповідальний за випуск *Рожков П. П.*

*За авторською редакцією*

Комп'ютерне верстання *Є. Д. Дьяков*

План 2019, поз.98Л

---

Підп. до друку 25.03.2019. Формат 60 x 84/16.

Друк на ризографі. Ум. друк арк. 1,2

Тираж 50 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,

вул. Маршала Бажанова 17, Харків, 61002

Електронна адреса: [rectorat@kname.edu.ua](mailto:rectorat@kname.edu.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017