# § 2. ПОСЛІДОВНЕ І ПАРАЛЕЛЬНЕ З'ЄДНАННЯ ПРОВІДНИКІВ. ШУНТИ І ДОДАТКОВІ ОПОРИ



Згадайте: якщо в ялинковій гірлянді псується одна з ламп, то всі лампи, розташовані у цій вітці, перестають світитися, при цьому інші вітки працюють. Чому так? А чому лампи в гірлянді, які розраховані на напругу 10 В, не виходять з ладу незважаючи на те, що напруга в мережі 220 В?

Сподіваємося, що ви пам'ятаєте курс фізики 8-го класу і розумієте, що річ у з'єднанні ламп. Згадаємо види з'єднання провідників та основні властивості цих з'єднань.

## 1 Послідовне з'єднання провідників

*З'єднання провідників називають* **послідовним**, *якщо воно не містить розгалужень*, тобто провідники розташовані послідовно один за одним (рис. 2.1). Зрозуміло, що таким чином можна з'єднати будь-яку кількість провідників.

Як приклад розглянемо ділянку кола, яка містить два послідовно з'єднані резистори, а потім узагальнимо отримані співвідношення для будь-якої кількості послідовно з'єднаних провідників.

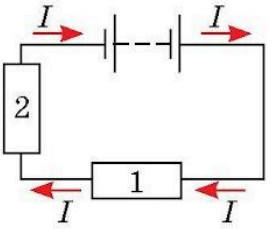



**Рис. 2.1.** Схема електричного кола, яке містить послідовно з'єднані провідники

| Сила струму $I$ | Напруга $U$ | Опір $R$ |
|---|---|---|
| *Сила струму в послідовно з'єднаних провідниках однакова і дорівнює загальній силі струму в ділянці кола:* $I_1 = I_2 = I$. Дійсно, коло з послідовним з'єднанням провідників не містить розгалужень, тому заряд, який проходить через поперечний переріз будь-якого провідника за деякий час $t$, буде однаковим: $q_1 = q_2 = q$. Поділивши цю рівність на $t$, отримаємо: $\frac{q_1}{t} = \frac{q_2}{t} = \frac{q}{t}$. За означенням сили струму: $q/t = I$. Отже, маємо: $I_1 = I_2 = I$. | *Загальна напруга на послідовно з'єднаних провідниках дорівнює сумі напруг на цих провідниках:* $U = U_1 + U_2$. Справді, якщо, переміщуючи деякий заряд $q$, електричне поле виконує роботу $A_1$ в першому провіднику і $A_2$ — у другому, то зрозуміло, що для переміщення цього заряду через обидва провідники має бути виконана робота: $A = A_1 + A_2$. Поділивши обидві частини рівності на заряд $q$ і скориставшись означенням напруги ($U = A/q$), маємо: $U = U_1 + U_2$. | *Загальний опір послідовно з'єднаних провідників дорівнює сумі опорів цих провідників:* $R = R_1 + R_2$. Дійсно, для послідовного з'єднання справджується рівність $U = U_1 + U_2$, тобто відповідно до закону Ома: $IR = I_1R_1 + I_2R_2$. Оскільки $I_1 = I_2 = I$, отримуємо: $IR = IR_1 + IR_2$. Після скорочення на $I$ маємо: $R = R_1 + R_2$. |
| *Узагальнимо наведені співвідношення для n послідовно з'єднаних провідників:* | | |
| $I = I_1 = I_2 = \ldots = I_n$ | $U = U_1 + U_2 + \ldots + U_n$ | $R = R_1 + R_2 + \ldots + R_n$ |

*Зверніть увагу:*

- загальний опір провідників, з'єднаних послідовно, більший за опір кожного із цих провідників;
- загальний опір послідовно з'єднаних провідників опором $R_0$ кожен дорівнює: $R = nR_0$, де $n$ — кількість провідників.

Поясніть, чому лампи в ялинковій гірлянді, які розраховані на напругу 10 В, не виходять із ладу незважаючи на те, що напруга в мережі 220 В.

## 2 Паралельне з'єднання провідників

*З'єднання провідників називають* **паралельним**, *якщо для проходження струму є два чи більше шляхів — віток, а всі ці вітки мають одну пару спільних точок — вузлів* (рис. 2.2). У вузлах (вузлових точках) відбувається розгалуження кола (у кожному вузлі з'єднуються не менш ніж три проводи). Отже, *розгалуження є характерною ознакою кола з паралельним з'єднанням провідників.*

Розглянемо ділянку кола, яка містить два паралельно з'єднані резистори.

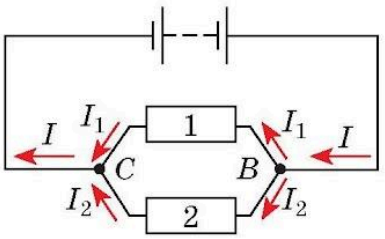



**Рис. 2.2.** Схема електричного кола, яке містить паралельно з'єднані провідники. $B$ і $C$ — вузлові точки (вузли)

| Сила струму $I$ | Напруга $U$ | Опір $R$ |
|---|---|---|
| *У разі паралельного з'єднання провідників сила струму в нерозгалуженій частині кола дорівнює сумі сил струмів у відгалуженнях (окремих вітках):* $I = I_1 + I_2$ Дійсно, у вузловій точці струм розтікається по двох вітках. Заряд у вузловій точці не накопичується, тому заряд $q$, який надійшов у вузол за деякий час $t$, дорівнює сумі зарядів, які вийшли із цього вузла за той самий час: $q = q_1 + q_2$. Поділимо обидві частини рівності на $t$ і візьмемо до уваги, що $q/t = I$. Маємо: $\frac{q}{t} = \frac{q_1}{t} + \frac{q_2}{t}$, або $I = I_1 + I_2$. | *Загальна напруга на ділянці кола та напруга на кожному із паралельно з'єднаних провідників є однаковими:* $U = U_1 = U_2$ Якщо ділянка кола не містить джерела струму, то напруга на ділянці дорівнює різниці потенціалів на кінцях цієї ділянки. Тобто і для ділянки 1,2, і для ділянки 1, і для ділянки 2 маємо однаковий вираз для напруги: $U_{1,2} = \varphi_B - \varphi_C$; $U_1 = \varphi_B - \varphi_C$; $U_2 = \varphi_B - \varphi_C$. Отже: $U = U_1 = U_2$. | *Величина, обернена до загального опору розгалуженої ділянки кола, дорівнює сумі величин, кожна з яких обернена до опору відповідної вітки цього розгалуження:* $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ Оскільки $I = I_1 + I_2$, то за законом Ома: $\frac{U}{R} = \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2}$. Для паралельного з'єднання: $U_1 = U_2 = U$, тому $\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$. Після скорочення на $U$ отримаємо: $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$. |
| *Узагальнимо наведені співвідношення для n паралельно з'єднаних провідників:* | | |
| $I = I_1 + I_2 + \ldots + I_n$ | $U = U_1 = U_2 = \ldots = U_n$ | $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_n}$ |

*Зверніть увагу:*

- загальний опір паралельно з'єднаних провідників менший від опору кожного із цих провідників;
- загальний опір паралельно з'єднаних провідників опором $R_0$ кожний дорівнює: $R = \frac{R_0}{n}$, де $n$ — кількість провідників;
- опір двох паралельно з'єднаних провідників дорівнює: $R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$.

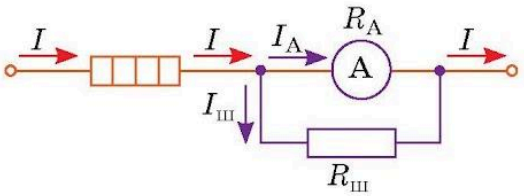
Доведіть останні два твердження, скориставшись співвідношеннями для паралельно з'єднаних провідників.

## 3 Для чого потрібні шунти і додаткові опори

Як і будь-які прилади, амперметр і вольтметр мають *верхню межу вимірювання* — найбільше значення фізичної величини, яку можна виміряти даним приладом. Але якщо до амперметра чи вольтметра приєднати резистор певного опору, то межі вимірювання цих приладів можна збільшити.

### Шунт

**Шунт** — *резистор, який паралельно приєднують до амперметра з метою збільшити верхню межу вимірювання амперметра.*




У разі застосування шунта струм у колі розділяється на дві частини: одна частина йде на амперметр, друга — на шунт: $I = I_A + I_Ш$.

Дізнаємося, який шунт необхідно приєднати паралельно амперметру, щоб збільшити верхню межу вимірювання амперметра в $n$ разів: $I = nI_A$.

Оскільки $I = I_A + I_Ш$,

то $nI_A = I_A + I_Ш$, або $I_Ш = I_A(n-1)$.

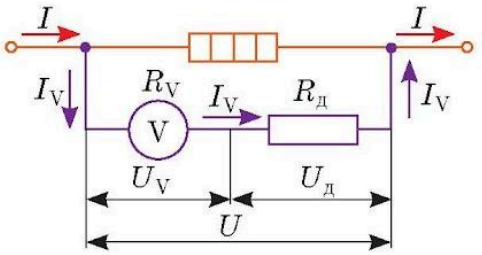
Напруга на шунті й амперметрі однакова, тому відповідно до закону Ома маємо: $\frac{U}{R_Ш} = \frac{U}{R_A}(n-1) \Rightarrow \frac{1}{R_Ш} = \frac{n-1}{R_A}$.

Отже, необхідний опір шунта обчислюють за формулою:

$$R_Ш = \frac{R_A}{n-1}$$

### Додатковий опір

**Додатковий опір** — *резистор, який послідовно приєднують до вольтметра з метою збільшити верхню межу вимірювання вольтметра.*




У разі застосування додаткового опору напруга розподілиться між вольтметром і додатковим опором: $U = U_V + U_д$.

Дізнаємося, який додатковий опір необхідно приєднати послідовно з вольтметром, щоб збільшити верхню межу вимірювання вольтметра в $n$ разів:

$$U = nU_V.$$

Оскільки $U = U_V + U_д$,

то $nU_V = U_V + U_д$, або $U_д = U_V(n-1)$.

Сила струму в резисторі і вольтметрі однакова, тому відповідно до закону Ома маємо: $I_V R_д = I_V R_V (n-1)$. Отже, необхідний додатковий опір обчислюють за формулою:

$$R_д = R_V(n-1)$$

*Зверніть увагу!* У скільки разів зростає верхня межа вимірювання приладу, у стільки разів зростає ціна поділки його шкали.

## 4 Учимося розв'язувати задачі

**Задача.** Ділянка кола складається з однакових резисторів опором 8 Ом кожен (схема 1). На ділянку подано напругу 31,2 В. Визначте загальний опір ділянки, напругу на резисторі 2, силу струму в резисторах 1 і 6.

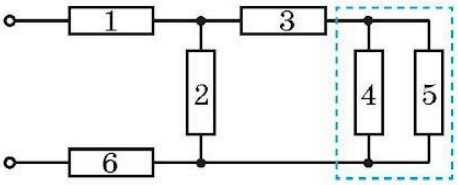


Схема 1

*Аналіз фізичної проблеми.* Електричне коло містить змішане з'єднання провідників. Тому будемо покроково спрощувати подану схему 1 і, користуючись законом Ома та співвідношеннями для послідовного і для паралельного з'єднань провідників, знаходити значення шуканих величин.

*Дано:*
$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R_0 = 8$ Ом
$U = 31{,}2$ В

$R$ — ?
$U_2$ — ?
$I_1$ — ?
$I_6$ — ?

*Пошук математичної моделі, розв'язання.*
Резистори 4 і 5 однакові та з'єднані паралельно, тому $R_{4,5} = \frac{R_0}{2} = \frac{8\text{ Ом}}{2} = 4$ Ом. Отже, у схемі 1 можемо замінити резистори 4 і 5 одним резистором, опір якого $R_{4,5} = 4$ Ом. Тоді вихідна схема набуде вигляду схеми 2.

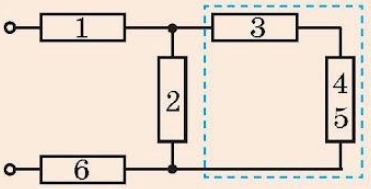


Схема 2

У схемі 2 послідовно з'єднані резистори 3 і 4,5 замінимо резистором 3,4,5 опором $R_{3,4,5} = R_3 + R_{4,5} = 8 + 4 = 12$ (Ом) і отримаємо схему 3.

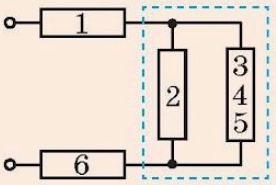


Схема 3

У схемі 3 паралельно з'єднані резистори 2 і 3,4,5 замінимо резистором опором $R_{2,3,4,5} = \frac{R_2 \cdot R_{3,4,5}}{R_2 + R_{3,4,5}} = \frac{8 \cdot 12}{8 + 12} = 4{,}8$ (Ом) і отримаємо схему 4, де резистори з'єднані послідовно.

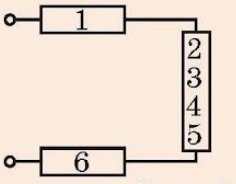


Схема 4

Загальний опір ділянки:
$R = R_1 + R_{2,3,4,5} + R_6 = 8 + 4{,}8 + 8 = 20{,}8$ (Ом).
Відповідно до закону Ома: $I = \frac{U}{R} = \frac{31{,}2}{20{,}8} = 1{,}5$ (А).
Проаналізувавши схеми 3 і 4, доходимо висновків:
$I_1 = I_{2,3,4,5} = I_6 = I = 1{,}5$ А; $U_2 = U_{2,3,4,5} = I \cdot R_{2,3,4,5} = 1{,}5 \cdot 4{,}8 = 7{,}2$ (В).

*Відповідь:* $R = 20{,}8$ Ом; $U_2 = 7{,}2$ В; $I_1 = 1{,}5$ А; $I_6 = 1{,}5$ А.



## Підбиваємо підсумки

- Якщо ділянка кола містить $n$ послідовно з'єднаних провідників:

— сила струму в усіх провідниках є однаковою і дорівнює загальній силі струму в ділянці: $I_1 = I_2 = \ldots = I_n = I$;

— напруга на ділянці дорівнює сумі напруг на окремих провідниках: $U = U_1 + U_2 + \ldots + U_n$;

— опір ділянки дорівнює сумі опорів провідників: $R = R_1 + R_2 + \ldots + R_n$.

- Якщо ділянка кола містить $n$ паралельно з'єднаних провідників:

— напруга на всіх провідниках є однаковою і дорівнює напрузі на ділянці: $U_1 = U_2 = \ldots = U_n = U$;

— загальна сила струму в ділянці дорівнює сумі сил струмів в окремих провідниках: $I = I_1 + I_2 + \ldots + I_n$;

— опір ділянки можна визначити з формули: $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_n}$.

• Для збільшення верхньої межі вимірювання до амперметра паралельно приєднують шунт, а до вольтметра послідовно приєднують додатковий опір.



## Контрольні запитання

**1.** Яке з'єднання провідників називають послідовним? Які співвідношення справджуються для цього з'єднання? Доведіть їх. **2.** Яке з'єднання провідників називають паралельним? Які співвідношення справджуються для цього з'єднання? Доведіть їх. **3.** Як можна збільшити верхню межу вимірювання вольтметра? **4.** У якому випадку і як шунтують амперметри?



## Вправа № 2

**1.** Розгляньте рис. 1 і визначте: які прилади зображено; для вимірювання якої фізичної величини призначений кожен прилад; якою є верхня межа вимірювання кожного приладу.

**2.** Як, на вашу думку, з'єднані лампи в одній вітці ялинкової гірлянди? з'єднані різні вітки гірлянди? Для чого в гірляндах застосовують кілька віток ламп?

**3.** Чому споживачі електричного струму, якими ми користуємося в побуті, зазвичай розраховані на однакову напругу (220 В)?

**4.** Два резистори опорами 2 і 3 Ом приєднали до джерела струму, напруга на виході якого 12 В. Визначте силу струму в кожному резисторі та загальну силу струму в колі, якщо резистори з'єднані: а) послідовно; б) паралельно.

**5.** Визначте загальний опір $R$ ділянки кола (рис. 2), якщо $R_1 = R_2 = R_5 = R_6 = 3$ Ом, $R_3 = 20$ Ом, $R_4 = 24$ Ом. Чому дорівнює сила струму в кожному резисторі, якщо до ділянки кола прикладена напруга 36 В?

**6.** До ділянки кола, яка містить два резистори, подано напругу 24 В. Коли резистори з'єднані послідовно, сила струму в ділянці дорівнює 0,6 А, а коли паралельно — 3,2 А. Визначте опір кожного резистора.

**7.** Міліамперметр зі шкалою, розрахованою на 20 мА, треба використати для вимірювання сили струму 1 А. Обчисліть опір шунта, якщо опір міліамперметра 4,9 Ом.

**8.** Коли в ділянці кола (рис. 3) ключ замкнено, сила струму, який проходить через амперметр, дорівнює 0,45 А. Якої сили струм проходитиме через амперметр, якщо ключ розімкнути? Опори резисторів 1 і 3 та 2 і 4 попарно однакові й дорівнюють $R$ і $2R$ відповідно. Напруга на клемах є незмінною. Амперметр вважайте ідеальним (тобто опір амперметра $R_A = 0$).

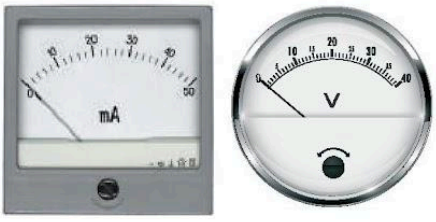



Рис. 1

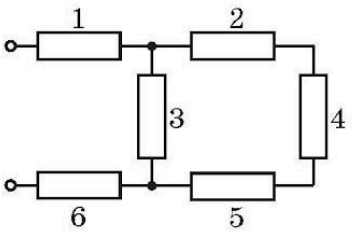



Рис. 2

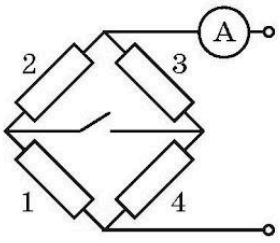



Рис. 3

Матеріал підручника Фізика 11 клас, рівень стандарту, підручник. За ред.Бар’яхтара В.Г., Довгого С.О. § 2.