

Лекція 3

ТРИФАЗНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА

3.1. Трифазні система ЕРС

В сучасних умовах електроенергія виробляється, передається та розподіляється в основному як енергія трифазної системи синусоїдальний струмів.

Симетрична трифазна система ЕРС являє собою сукупність трьох синусоїдальних ЕРС однакових амплітуди та частоти, зсунутих друг відносно друга по фазі на одну третину періоду, тобто на 120° . У порівнянні з однофазною трифазна система електричних кіл має важливі техніко-економічні переваги:

1. Трифазні генератори, електродвигуни та трансформатори на ту ж потужність компактніше, більш легкі (вимагають менше метала – міді та сталі) та дешевше у виготовленні.
2. Від одного джерела електроенергії в трифазній мережі можна отримати для споживачів дві напруги (лінійну та фазну), які відрізняються в $\sqrt{3}$ раз.
3. Значно (до 30%) економляться кольорові метали (мідь, алюміній) та залізо в дротах електричних мереж.
4. Трифазною системою струмів легко утворюється обертове магнітне поле, яке використовується в найбільш простих, дешевих та надійних в роботі трифазних асинхронних електродвигунах та в інших електричних машинах.

3.2. Принципи отримання та форми подання трифазної системи ЕРС

Джерелом трифазних ЕРС є трифазний (синхронний) генератор, який перетворює механічну енергію первинного двигуна в електроенергію. Принцип утворення ЕРС заснований на законі електромагнітної індукції.

При обертанні ротора по годинниковій стрілці магнітні силові лінії, які замикаються крізь статор, перетинають активні ділянки фазних котушок статора і індукують в них синусоїдальні ЕРС, що зсунуті друг відносно друга по фазі на одну третину періоду, тобто на 120° .

Візьмемо за момент відліку часу такий момент, коли ЕРС у фазі A дорівнює нулю, тобто:

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t . \\ e_B &= E_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ e_C &= E_m \sin(\omega t - 240^\circ) = E_m \sin(\omega t + 120^\circ). \end{aligned} \quad (3.1)$$

Графіки цих функцій показані на рис.3.2,а.

Внаслідок симетрії амплітудні значення ЕРС E_m усіх трьох фаз рівні і симетрична трифазна система ЕРС генератора (3.1) може бути записана в комплексній формі для діючих значень:

$$\underline{E}_A = Ee^{j0^\circ}; \quad \underline{E}_B = Ee^{-j120^\circ}; \quad \underline{E}_C = Ee^{j120^\circ} = \underline{E}_C = Ee^{-j240^\circ}; \quad (3.2)$$

При розгляді трифазних кіл комплексну площу часто повертають на 90° проти хода годинникової стрілки. В цьому випадку векторна діаграма комплексних ЕРС трифазного генератора приймає вигляд, як показано на рис.3.2,б.

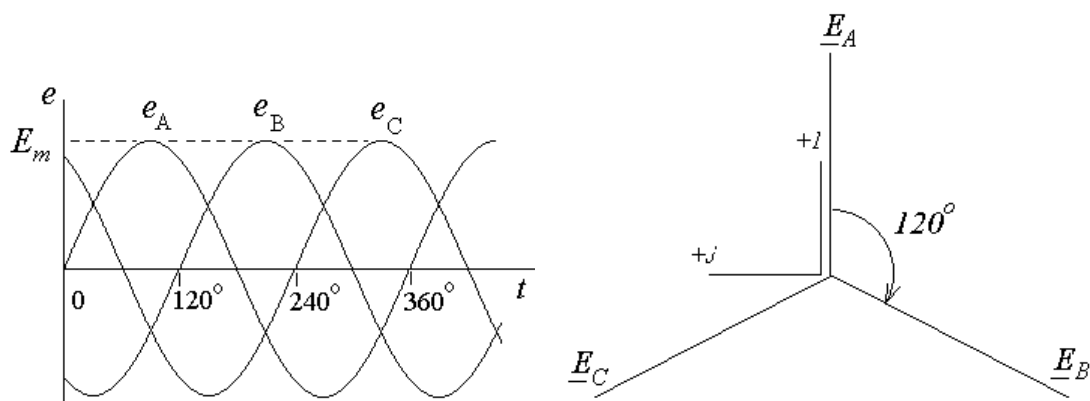


Рис.3.2. Графіки (а) та векторна діаграма (б) ЕРС трифазного генератора

У трифазного генератора, як це витікає з векторною діаграмою, сума комплексних діючих значень дорівнює нулю:

$$\underline{E}_A + \underline{E}_B + \underline{E}_C = 0, \quad (3.3)$$

а сума миттєвих значень ЕРС в любий момент часу, як це витікає з графіка на рис.3.2,а, дорівнює нулю

$$e_A + e_B + e_C = 0. \quad (3.4)$$

Таку система ЕРС, в якій ЕРС окремих фаз рівні за значеннями і зсунуті відносно один одного на однаковий кут (120° у трифазному колі), називають *симетричною*.

З'єднавши кожну фазу генератора за допомогою дротів зі споживачем, що мають опори \underline{Z}_A , \underline{Z}_B , \underline{Z}_C отримаємо трифазне незв'язане електричне коло, кожне коло якого є однофазним. Векторна діаграма цього трифазного кола при активно-індуктивному навантаженні показана на рис.3.3,б.

За умовно позитивний напрям ЕРС і струмів в трифазному генераторі умовно приймається напрям від кінця фазної обмотки статора до її початку, а напруги в протилежному напрямку. В дротах мережі, які з'єднують початки обмоток, струми завжди зазначаються направленими до навантаження.

Навантаження називають симетричним, якщо комплексні опори фаз споживачів однакові

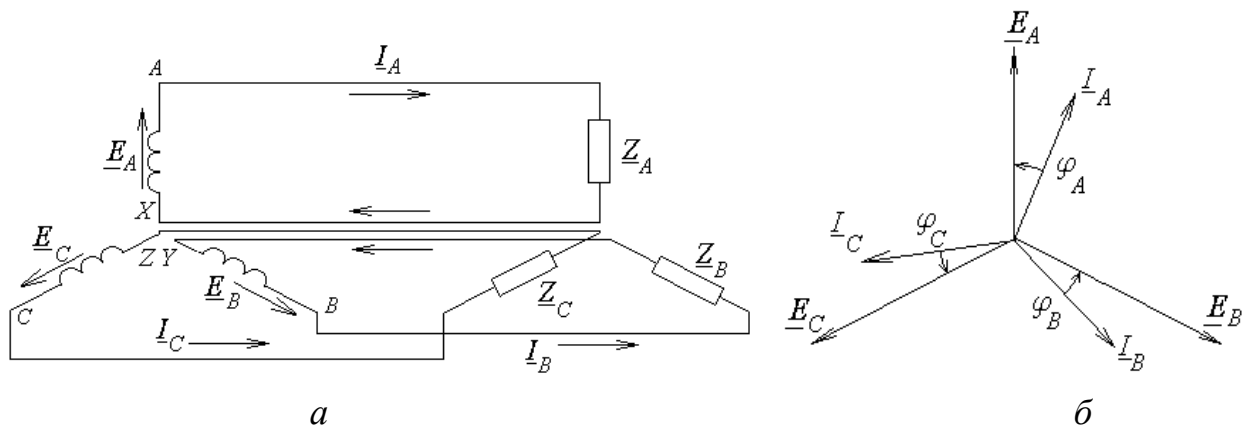


Рис.3.3 Електрична незв'язана трифазна система (а) і її векторна діаграма (б)

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C, \quad (3.5)$$

оскільки $\underline{Z} = Ze^{j\varphi}$, то повинні бути рівними і модулі, і кути зсуву фаз:

$$Z_A = Z_B = Z_C; \quad \varphi_A = \varphi_B = \varphi_C. \quad (3.6)$$

При симетричному навантаженні струми у фазах рівні

$$I_A = I_B = I_C. \quad (3.7)$$

3.3. З'єднання фаз генератора і приймачів зіркою

В незв'язаній трифазній системі ЕРС джерела (рис.3.3,а) електроенергія передається від генератора до приймачів шістьма дротами.

При з'єднанні зіркою кінці фаз X, Y, Z об'єднують в одну спільну точку, яку називають нейтральною точкою (N – нейтрал генератора, n – нейтрал приймача). Провідник, який з'єднує ці дві нейтральні точки джерела і споживача, називають нейтральним. Крім того генератор з'єднаний зі споживачем за допомогою трьох провідників, що мають назву лінійні провідники. Таким чином утворюється чотирьохпровідна система, з'єднана в зірку з нейтральним проводом (рис.3.4). Зіркою з'єднані і фази генератора і фази приймача.

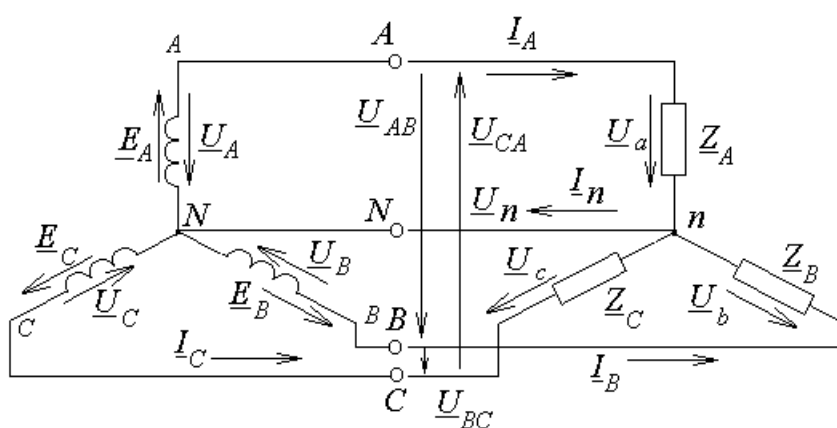


Рис.3.4. Схема трифазного кола при з'єднанні генератора та приймачів зіркою

Розрізняють фазні та лінійні струми та напруги.

Фазна напруга – це напруга між початком і кінцем фази. На лінії – це напруга між лінійним і нейтральним провідниками: U_A, U_B, U_C . Це фазні напруги

джерела. На джерелі фазні напруги приймають рівними ЕРС.

Лінійна напруга – це напруга між фазами або лінійними провідниками: U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} .

Струми у фазах називають фазними. Струми у лінійних провідниках називають лінійними: I_A, I_B, I_C . При з'єднанні зіркою фазна обмотка генератора, відповідний лінійний провід та фазний приймач утворюють ділянку з послідовним з'єднанням елементів, що дозволяє сформулювати важливий висновок, що при з'єднанні зіркою лінійні струми дорівнюють фазним:

$$I_{л} = I_{ф}. \quad (3.8)$$

Так як струм у нейтральному проводі I_n завжди набагато менший за струми I_A, I_B, I_C в лінійних проводах чотирьохпровідної системи, то його поперечний перетин вибирають у два – три рази меншим, ніж у лінійних проводах.

Зі схеми на рис.3.4 у відповідності за другим законом Кірхгофа:

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B; \quad \underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C; \quad \underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A. \quad (3.9)$$

Цим співвідношенням відповідає наступна векторна діаграма (рис.3.5). При графічному визначенні лінійних напруг зручно замінити векторне віднімання фазних напруг їх геометричним додаванням, наприклад, у комплексному вигляді $\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A + (-\underline{U}_B)$. Однак простіше знайти різницю векторів по правилам їхнього віднімання.

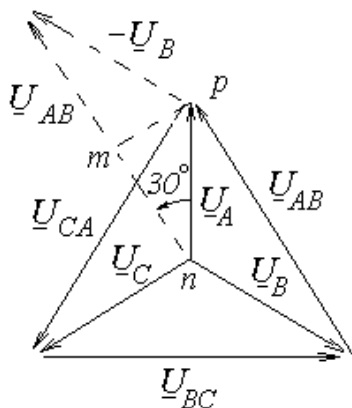


Рис.3.5. Векторна діаграма напруг при з'єднанні генератора

зіркою

Система напруг джерела завжди симетрична (з трикутника mnp):

$$\frac{U_{\dot{\epsilon}}}{2} = U_{\dot{\phi}} \cos 30^\circ = U_{\dot{\phi}} \frac{\sqrt{3}}{2}, \text{ звідки отримаємо:}$$

$$U_{\dot{\epsilon}} = \sqrt{3} \cdot U_{\dot{\phi}}. \quad (3.10)$$

Отже, якщо система напруг симетрична, то лінійні напруги перевищують фазні у $\sqrt{3}$ разів при з'єднанні приймачів зіркою. В електроустановках низької напруги широко використовуються напруги зі співвідношеннями:

$$\frac{U_{\dot{\epsilon}}}{U_{\dot{\phi}}} = \sqrt{3}; \quad \frac{220}{127}; \quad \frac{380}{220}; \quad \frac{660}{380} \hat{A}.$$

З'єднання трифазного генератора зіркою дає можливість використовувати для споживачів лобу з двох напруг – фазну або лінійну.

Для схеми, зображеної на рис.3.4 за другим законом Кірхгофа можна записати:

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C, \quad (3.11)$$

а за законом Ома виразити струм у нейтральному проводі:

$$\underline{I}_N = \frac{\underline{U}_N}{\underline{Z}_N} = \underline{U}_N \underline{Y}_N, \quad (3.12)$$

де $\underline{Y}_N = \frac{1}{\underline{Z}_N}$ – провідність нейтрального провідника.

Напруги на фазах приймачів можна визначати за другим законом Кірхгофа наступним чином:

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_N; \quad \underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_N; \quad \underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_N. \quad (3.13)$$

Напруга на нейтралі дорівнює нулю $\underline{U}_N = 0$, струм у нейтральному проводі дорівнює нулю $\underline{I}_N = \underline{U}_N \underline{Y}_N = 0$ і комплексна (векторна) сума струмів фаз дорівнює нулю

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0. \quad (3.18)$$

З виразу (3.14) витікає, що фазні напруги споживачів будуть дорівнювати відповідним фазним напругам джерела:

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A; \quad \underline{U}_b = \underline{U}_B; \quad \underline{U}_c = \underline{U}_C. \quad (3.19)$$

При *несиметричному навантаженні і за відсутністю нейтрального провідника*, тобто: $\underline{Y}_a \neq \underline{Y}_b \neq \underline{Y}_c$

Напруга нейтралі, як це витікає з формули (3.16) не нульова $\underline{U}_N \neq 0$.

Таким чином, якщо навантаження несиметричне і нейтральний провідник відсутній, то напруга нейтралі $\underline{U}_N \neq 0$, а відповідно і фазні напруги споживачів, як це витікає з рівняння (3.14), не дорівнюють фазним напругам джерела

$$\underline{U}_a \neq \underline{U}_A; \quad \underline{U}_b \neq \underline{U}_B; \quad \underline{U}_c \neq \underline{U}_C. \quad (3.20)$$

Отже відбувається перекид фазних напруг споживачів при умові несиметричного навантаження і за відсутності нейтрального провідника.

Таким чином, відсутність або обрив нейтрального проводу в трифазному колі при несиметричному навантаженні, з'єднаному зіркою, являє собою аварійний режим. Він призводить до небажаних явищ: різкій несиметрії фазних напруг і струмів навантаження, тобто до порушення нормального режиму роботи приймачів. Тому в нейтральний провід чотирьохпроводної системи забороняється ставити вимикачі та запобіжники.

При *несиметричному навантаженні і наявності нейтрального провідника* зберігається рівність фазних напруг споживачів і джерела, оскільки $Z_N \approx 0$, то напруга нейтралі дорівнює нулю $\underline{U}_N = \underline{I}_N \underline{Z}_N = 0$, і тому

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A; \quad \underline{U}_b = \underline{U}_B; \quad \underline{U}_c = \underline{U}_C. \quad (3.21)$$

Отже, нульовий провідник забезпечує рівність фазних напруг джерела і споживачів при несиметричному навантаженні.

Таким чином, в чотирьохпроводній системі напруги навантаження практично симетричні, тому ця мережа, наприклад система 380/220 В застосовується для живлення освітлювального або змішаного

(освітлювального та силового) несиметричного навантаження. При повному розвантаженні однієї або двох фаз і навіть в аварійних режимах (при обриві одного або двох лінійних проводів) залишені під напругою однофазні приймачі будуть працювати нормально.

3.4. З'єднання фаз генератора і приймачів трикутником

При з'єднанні трикутником фази джерела або споживача з'єднані у замкнений контур (рис.3.6). Таке замикання трьох фаз генератора не є їх замиканням накоротко, оскільки між миттєвими ЕРС наявні фазові зсуви 120° .

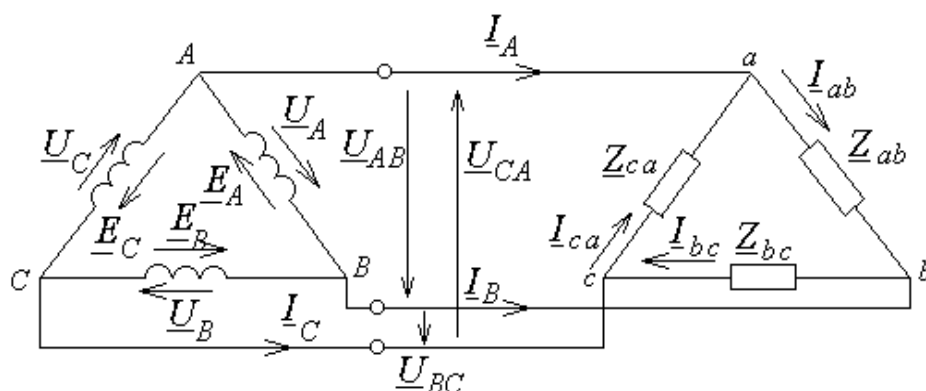


Рис.3.6. Схема трифазного кола при з'єднанні генератора та приймачів трикутником

Трифазна система, яка з'єднана трикутником, є трьохпроводною. Електроенергія від генератора до приймачів передається трьома лінійними

проводами.

Спосіб з'єднання фаз споживача не залежить від способу з'єднання фаз джерела. Кожна фаза приймача вмикається між двома лінійними провідниками, відтак при з'єднанні трикутником лінійні напруги є фазними

$$U_l = U_\phi. \quad (3.22)$$

Фазні струми за законом Ома можуть бути визначені через фазні напруги наступним чином:

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{ab}}; \quad \underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_{bc}}; \quad \underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{Z}_{ca}}. \quad (3.23)$$

Лінійні струми можна визначити за першим законом Кірхгофа, наприклад, для вузла a (рис.3.6): $\underline{I}_A + \underline{I}_{ca} = \underline{I}_{ab}$. Звідки отримуємо співвідношення між лінійними й фазними струмами:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}; \quad \underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}; \quad \underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc} \quad (3.24)$$

Оскільки кути зсуву фаз навантаження $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ задані (залежать від характеру навантаження), то вектори лінійних струмів можна побудувати за рівнянням (3.24):

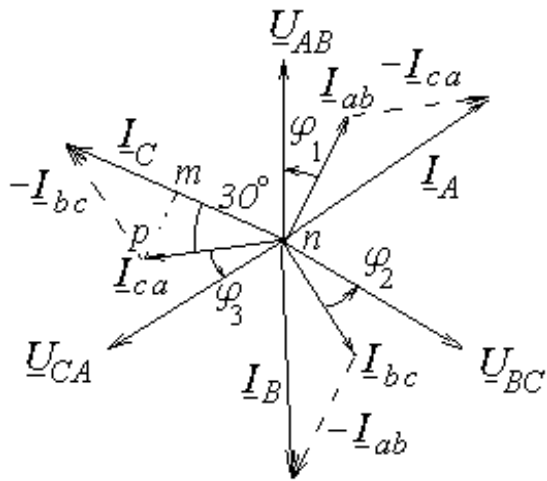


Рис.3.7. Векторна діаграма трифазного кола з'єднаного трикутником при симетричному навантаженні

Якщо навантаження симетричне, тобто їх повні комплексні опори рівні $\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca}$, то рівні всі фазні струми

$$\underline{I}_{ab} = \underline{I}_{bc} = \underline{I}_{ca} \quad (3.25)$$

і всі лінійні струми

$$\underline{I}_A = \underline{I}_B = \underline{I}_C. \quad (3.26)$$

Розглянемо один з трикутників pmt , звідки отримуємо співвідношення

$\frac{I_{\bar{e}}}{2} = I_{\delta} \cos 30^{\circ} = I_{\delta} \frac{\sqrt{3}}{2}$. Таким чином, при симетричному навантаженні і з'єднанні трикутником лінійний струм більший за фазний у $\sqrt{3}$ раз:

$$I_{\bar{e}} = \sqrt{3} I_{\delta}. \quad (3.27)$$

Якщо навантаження не симетричне, то ця умова не виконується, однак струми у фазах не залежатимуть від опору інших фаз. Тому з'єднання трикутником часто застосовують при несиметричному навантаженні.

3.5. Потужність трифазного електричного кола

У загальному випадку потужність трифазного кола дорівнює сумі потужностей, що споживає кожна фаза:

$$P = P_A + P_B + P_C. \quad (3.28)$$

При симетричному навантаженні фазні напруги, струми та $\cos \varphi$, а відповідно й фазні потужності P_{ϕ} рівні поміж собою $P = 3P_{\phi}$.

Оскільки фазна потужність $P_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi_{\phi}$, то потужність всього трифазного кола дорівнює

$$P = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi_{\phi} \quad (3.29)$$

де φ_{ϕ} – кут зсуву фаз між фазними напругами і струмом.

При з'єднанні зіркою маємо такі співвідношення між лінійними й фазними напругами та струмами при симетричному навантаженні

$$U_{\delta} = \frac{U_{\check{\epsilon}}}{\sqrt{3}}; \quad I_{\check{\epsilon}} = I_{\delta}. \quad \text{Після підстановки цих співвідношень у формулу (3.29)}$$

отримуємо

$$P = 3U_{\delta} I_{\delta} \cos \varphi = 3 \frac{U_{\check{\epsilon}}}{\sqrt{3}} I_{\check{\epsilon}} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{\check{\epsilon}} I_{\check{\epsilon}} \cos \varphi. \quad (3.30)$$

При з'єднанні трикутником маємо такі співвідношення між лінійними й фазними напругами та струмами при симетричному навантаженні

$$I_{\delta} = \frac{I_{\check{\epsilon}}}{\sqrt{3}}; \quad U_{\check{\epsilon}} = U_{\delta}. \quad \text{Після підстановки цих співвідношень у формулу (3.29)}$$

отримуємо аналогічні вирази:

$$P = 3U_{\delta} I_{\delta} \cos \varphi = 3 \frac{I_{\check{\epsilon}}}{\sqrt{3}} U_{\check{\epsilon}} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{\check{\epsilon}} I_{\check{\epsilon}} \cos \varphi. \quad (3.31)$$

Тому незалежно від способу з'єднання активні потужності електричного кола при симетричному навантаженні дорівнюють

$$P = 3U_{\delta} I_{\delta} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{\check{\epsilon}} I_{\check{\epsilon}} \cos \varphi. \quad (3.32)$$

Аналогічним чином можна записати для реактивної і повної потужності:

$$Q = 3U_{\delta} I_{\delta} \sin \varphi = \sqrt{3} U_{\check{\epsilon}} I_{\check{\epsilon}} \sin \varphi; \quad (3.33)$$

$$S = 3U_{\delta} I_{\delta} = \sqrt{3} U_{\check{\epsilon}} I_{\check{\epsilon}}. \quad (3.34)$$