

ӘЛ-ФАРАБИ АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ  
Физика-техникалық факультет  
Электроника және астрофизика кафедрасы

Алимгазинова Н.Ш.

**Электр тізбектер теориясы -1**

пәні бойынша дәрістер жинағы

«Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар» мамандығы  
бойынша білім алушы студенттерге арналған

Алматы, 2025

## 9-дәріс. Үшфазалық тізбектер

**Дәрістің мақсаты.** Білім алушыларға көпфазалы электр жүйелерінің негізгі ұғымдарын түсіндіру; үшфазалы тізбектің симметриялы жұмыс режимін зерттеп, фазалық және желілік кернеу мен токтарды анықтау әдістерін меңгерту; үшфазалы жүйелердің жұмыс принципі және есептеудегі қолданылуын түсіндіру.

### Жоспар

1. Көпфазалы жүйе. Негізгі ұғымдар
2. Үшфазалы тізбектің симметриялы жұмыс режимі

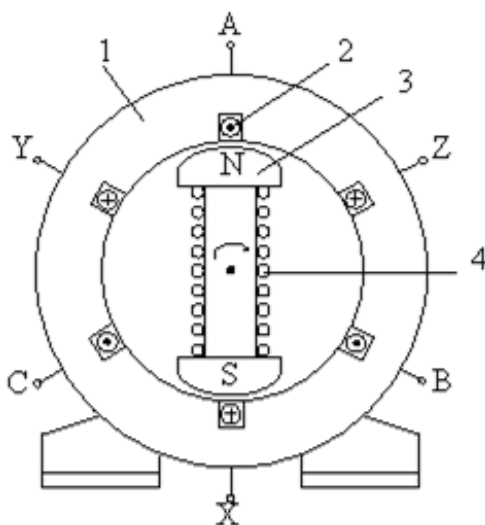
### 1. Көпфазалы жүйе. Негізгі ұғымдар

**Көпфазалы жүйе** деп құрылымы бойынша ұқсас, бір жиілікті тәуелсіз энергия көздері бар бірнеше синусоидалы ток тізбектерінің жиынтығын атайды, осында әр тізбек **фаза** болып табылады.

**Фаза** деп желіге және жүктемеге, генератордың немесе трансформатордың орамына сәйкес келетін тізбектің бөлігін атаймыз.

Ең алғаш рет 1891 жылы М.О. Доливо-Добровольский үшфазалы генератор жасап шыққан болатын. Байланысқан үш тізбектен құралған жүйе бүкіл әлемге кең таралған болатын. Практика жүзінде барлық электр станцияларындағы үшфазалы генератор көмегі арқылы электр энергия алынады, ол үшфазалы жеткізу желілері бойынша қабылдау жерлеріне беріледі және оның негізгі бөлігі үшфазалы қабылдағыштарда қолданысқа ие болады. Түзеткіш құралдарында негізінде алты- және он екі фазалы жүйелер қолданылады. Ал автоматика және телемеханика құрылғыларда екіфазалы жүйе қолданылады.

Үшфазалы жүйенің артықшылығы: алыс қашықтыққа электр энергиясын жеткізу кезде үнемді болуы және қозғалтқыштардың сапасының жоғары болуы.



Генератордың статорында (1) орам (2) орналасады, ол үш бөліктен немесе фазалардан тұрады. Фазаларының басы - A, B және C бас әріптерімен белгіленген, ал соңы - X, Y, Z. Ротордың (3) үстінде орналасқан қоздыру орамының (4) тұрақты тоғы арқылы пайда болатын электромагнит ротор ретінде қарастырылады.

1- сурет. Үшфазалы генератор

1-суретінде үшфазалы генератор бейнеленген. Статорда бір-бірінен электр изоляцияланған үш орам орналасқан, оларды фазалық орамдар деп атайды. Егер генератордың роторы екіполюсті болса, сонда генератордың фазалық орамдарының осьтері жазықтықта бір-біріне қарағанда  $120^\circ$  бұрылған болады. Роторды айналдыру кезінде фазалық орамдарында синусоидалы фазалық ЭҚК индукцияланады. Симметрия себебінен  $E_m$  амплитудалары мен  $E$  әсерлік мәндері барлық фазаларда тең болады. Алайда, айналып жатқан ротордың магнит өрістерінің сызықтары фазалық орамдарын бір уақытта қиып өтпейді, сондықтан орамдардың ЭҚК фаза бойынша бір-бірінен  $\frac{1}{3}T = \frac{2\pi}{3}$  ығыстырылған болады. Егер генератордың роторы көпполюсті болса, сонда оның әр полюс жұптарына статордағы үшфазалы орамдарының бір-бірінен изоляцияланған 3 катушкасы сәйкес келеді. Статордың шеңбері бойымен орналасқан жеке катушкалардың саны - әр фазалық орамдарының полюс жұптарының санына тең болады. Катушкалар өзара тізбектей немесе параллельді жалғанады.

Фазалар латын алфавитінің бас әріптерімен белгіленеді: А, В, С. Фазалар реттілігінің белгіленуі кездейсоқ емес. А фазасының ЭҚК-і В фазасының ЭҚК-іне қарағанда  $\frac{1}{3}$  периодынан ерте және С фазасының ЭҚК-іне қарағанда  $\frac{2}{3}$  периодынан ерте максималды мәніне ие болатындай таңдалынып алынады. Бұл реттілік *нормалды* немесе *тура* деп аталады (2, а-сурет). Үшфазалы қозғалтқыштардың айналу бағыты фазалардың реттілігіне тәуелді болады. Егер генератор роторының айналу бағытын өзгертсек, сонда фазалардың реттелігі өзгеріске ие болып (2, б-сурет) және *кері* деп аталатын болады.

Тура реттілік кезіндегі фазаларындағы ЭҚК лездік мәндері

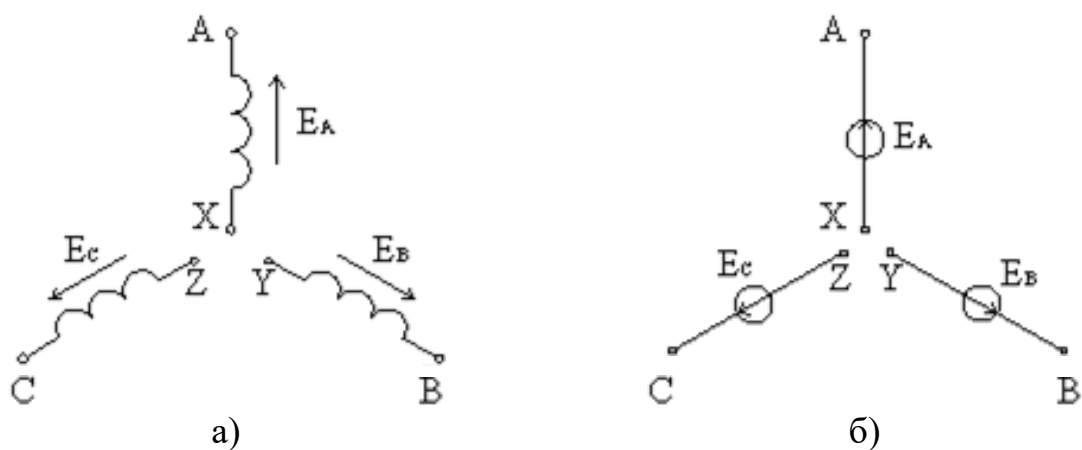
$$e_A = E_m \sin(\omega t), \quad (1)$$

$$e_B = E_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right), \quad (2)$$

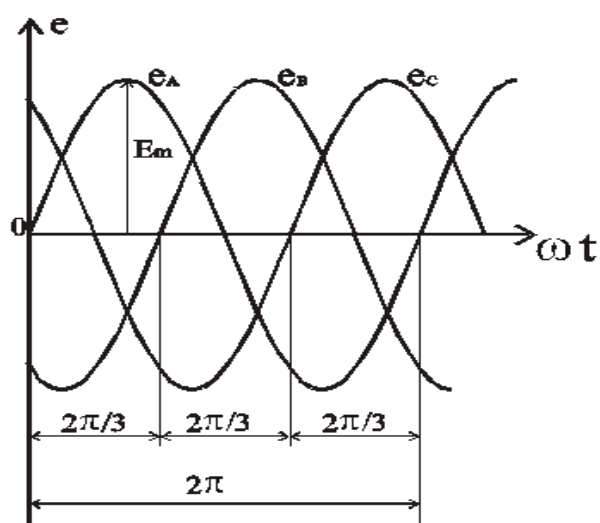
$$e_C = E_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) = E_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right). \quad (3)$$



2-сурет. Үшфазалы тізбектің векторлық диаграммасы



3-сурет. Қорек көзі фазасының шартты-графикалық белгіленуі



4-сурет. Үшфазалы тізбектегі ЭҚК лездік мәндерінің уақыт бойынша өзгеру графиктері

Лездік мәндерді комплекстік түріне айналдырамыз

$$\dot{E}_A = E_m e^{j\varphi_A} = E_m, \varphi_A = 0, \quad (4)$$

$$\dot{E}_B = E_m e^{j\varphi_B} = E_m e^{j\left(\varphi_A - \frac{2\pi}{3}\right)} = E_m e^{-j120^\circ}, \varphi_B = -\frac{2\pi}{3}, \quad (5)$$

$$\dot{E}_C = E_m e^{j\varphi_C} = E_m e^{j\left(\varphi_A + \frac{2\pi}{3}\right)} = E_m e^{j120^\circ}, \varphi_C = \frac{2\pi}{3}. \quad (6)$$

Мұндағы  $e^{-j\frac{2\pi}{3}} = a$  - фазалық көбейткіш, сонда

$$\dot{E}_A = E_m, \quad (7)$$

$$\dot{E}_B = E_m a^2, \quad (8)$$

$$\dot{E}_C = E_m a. \quad (9)$$

Комплекстік мәнін  $a$ -ға көбейтуі  $\frac{2\pi}{3}=120^\circ$  бұрышына оң бағытына қарай (сағат тілінің бағытына қарама-қарсы) бейнелейтін вектордың бұрылуына сәйкес келеді.

Үшфазалы тізбектерді есептеу кезінде нақты шамалардың өсін вертикалды жоғарыға бағыттау қабылданған, сондықтан 2, а-суретінің диаграммасында  $\dot{E}_A$  векторы вертикалды бағытталған.

Кирхгофтың екінші заңы және 2-суреттегі векторлық диаграммалары бойынша қорытындылай отырып: үшфазалы жүйе үшін барлық фазаларының ЭҚК векторларының геометриялық қосындысы нөлге тең болады:

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0. \quad (10)$$

(10) теңдігін дәлелдейік, ол үшін (4) – (6) қолданамыз

$$\begin{aligned} E_m + E_m e^{-j120^\circ} + E_m e^{j120^\circ} &= \\ &= E_m (1 + \cos(-120^\circ) + j \sin(-120^\circ) + \cos(120^\circ) + j \sin(120^\circ)) = \\ &= E_m \left( 1 - \frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = 0 \end{aligned}$$

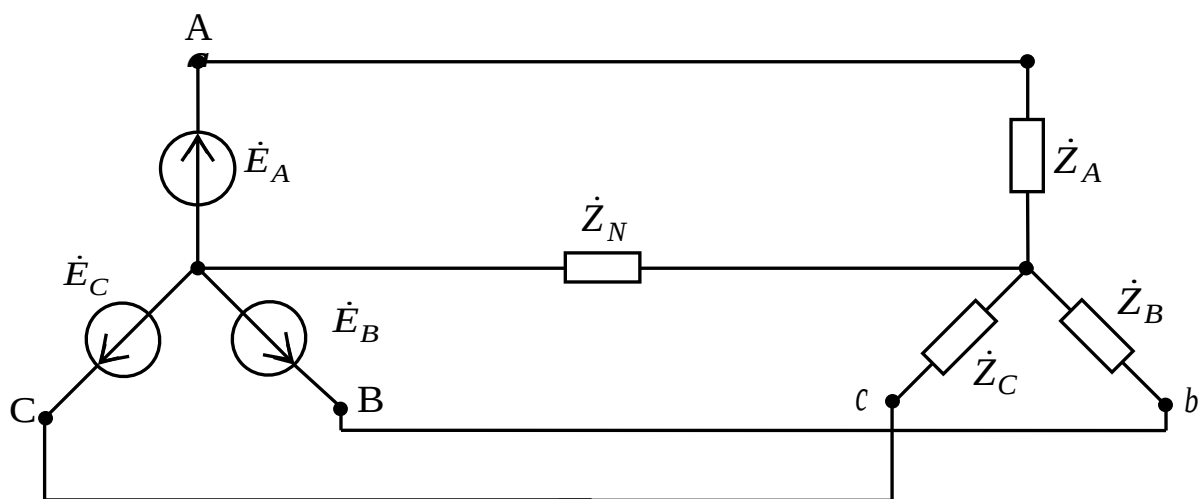
Үшфазалы жүйені алу үшін белгілі бір тәсілмен энергия көздерінің фазаларын және қабылдағыштың фазаларын жалғау керек: жұлдызша немесе үшбұрыш.

**«Жұлдызша» жалғау** - бұл жерде энергия көзі орамдарының немесе қабылдағыштың ұштары бір нүктеде жалғанған, оны нейтраль немесе нөлдік нүкте деп атайды.

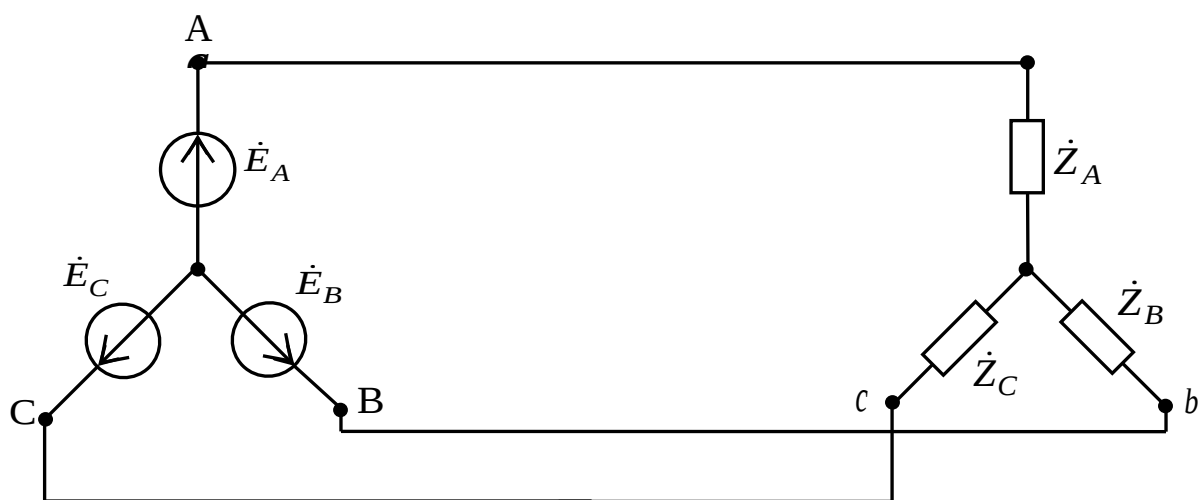
**«Үшбұрыш» жалғау** - бұл жерде бір фазаның басы басқа фазаның соңымен жалғанады.

Үшфазалы генераторды жалғаудың 5 қарапайым тәсілі бар, олар 6 суретте көрсетілген.

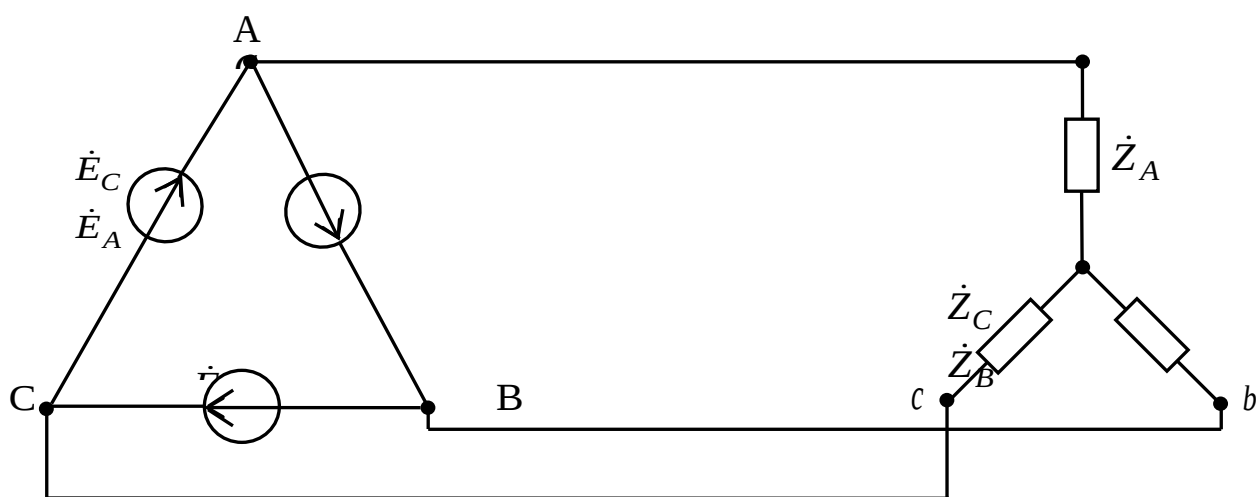
Үшфазалы тізбектің жұмыс режимі энергия көздерінің ЭҚК амплитудалық мәндеріне және қабылдағыштың әр фазасындағы комплекстік кедергілеріне байланысты, сондықтан *симметриялы* және *асимметриялы режимдері* қарастырылады.



а) Жұлдызша-жұлдызша, төртсымды

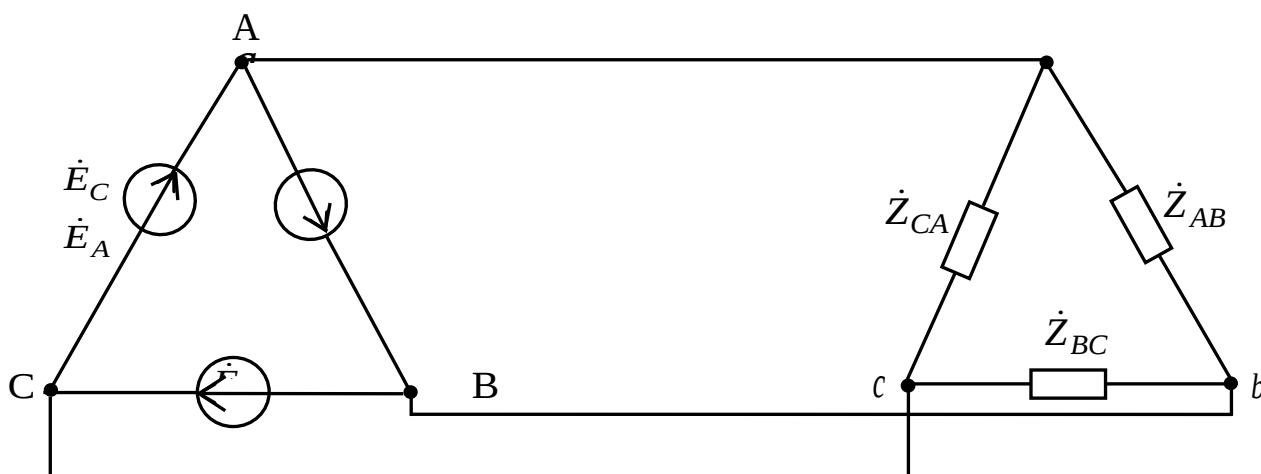


б) Жұлдызша-жұлдызша, үшсымды (нейтралды сымсыз)

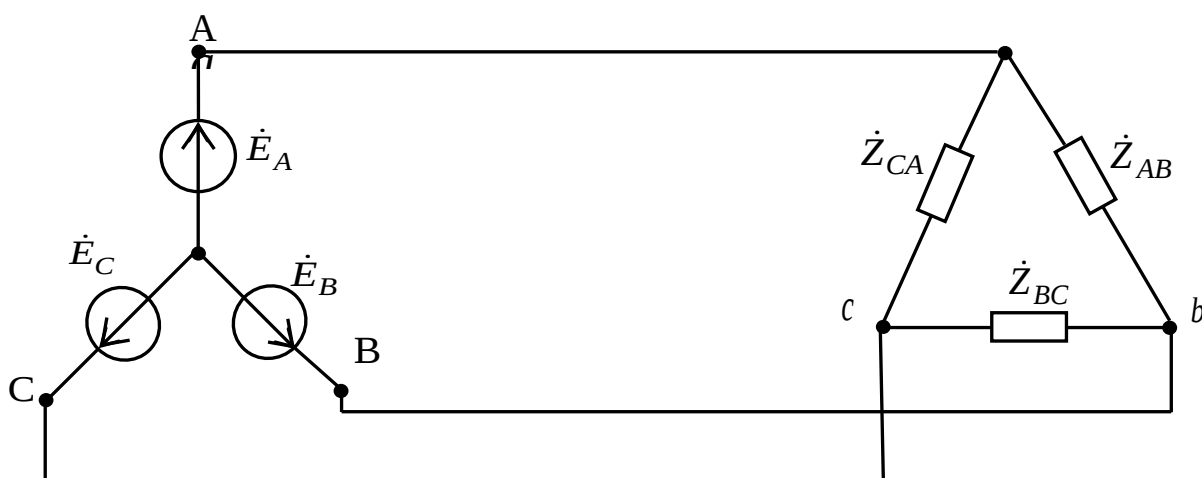


в) Үшбұрыш-жұлдызша

5-сурет. Үшфазалы тізбектің жалғаулары

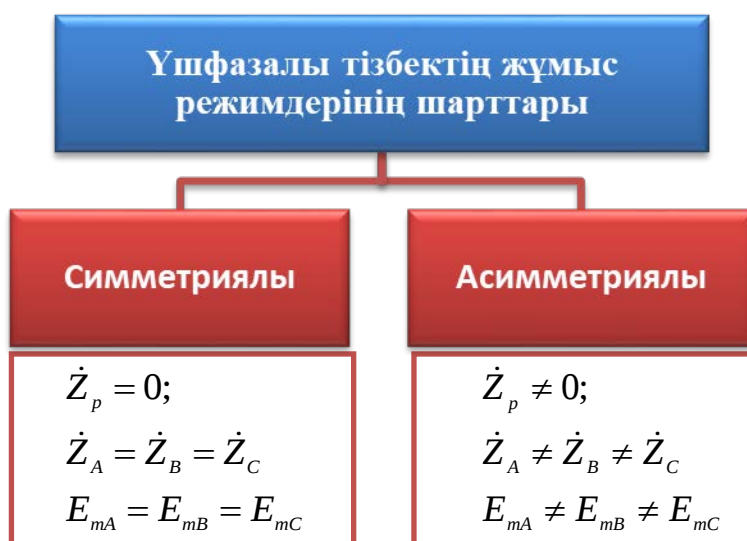


г) Үшбұрыш-үшбұрыш



д) Жұлдызша-үшбұрыш

5-сурет. Үшфазалы тізбектің жалғаулары



6-сурет. Үшфазалы тізбектің жұмыс режимдері

Үшфазалы тізбекке жалғанатын қабылдағыштар *бірфазалы* және *үшфазалы* болуы мүмкін. Бірфазалы қабылдағыштарға мысал ретінде электрлік қыздыру шамдарын, бірфазалы қозғалтқышты, жарық құралдарын, тұрмыс құралдарын және т.б. айта аламыз. Үшфазалы қабылдағыш ретінде индукциялық пештер мен үшфазалы асинхронды қозғалтқыштарды жатқыза аламыз.

Егер үшфазалы қабылдағыштардың фазаларының комплекстік кедергілері өзара тең болса, сонда оларды *симметриялы* деп атаймыз

$$\dot{Z}_A = \dot{Z}_B = \dot{Z}_C = Ze^{j\varphi}. \quad (11)$$

Егер (11) шарты орындалмаса, онда қабылдағыштарды *асимметриялы* деп атайды.

## 2. Үшфазалы тізбектің симметриялы жұмыс режимі

Кернеулердің симметриялы жүйесінде және симметриялы жүктеме кезінде үшфазалы тізбектің симметриялы режимі болады

$$\dot{Z}_A = \dot{Z}_B = \dot{Z}_C,$$

осында  $R_A = R_B = R_C = R_\phi$  және  $x_A = x_B = x_C = x_\phi$ . Сонда фазалық токтар және фазаның ығысу бұрыштары бірдей болады

$$I_A = I_B = I_C = I_\phi = \frac{U_\phi}{Z_\phi}, \quad (12)$$

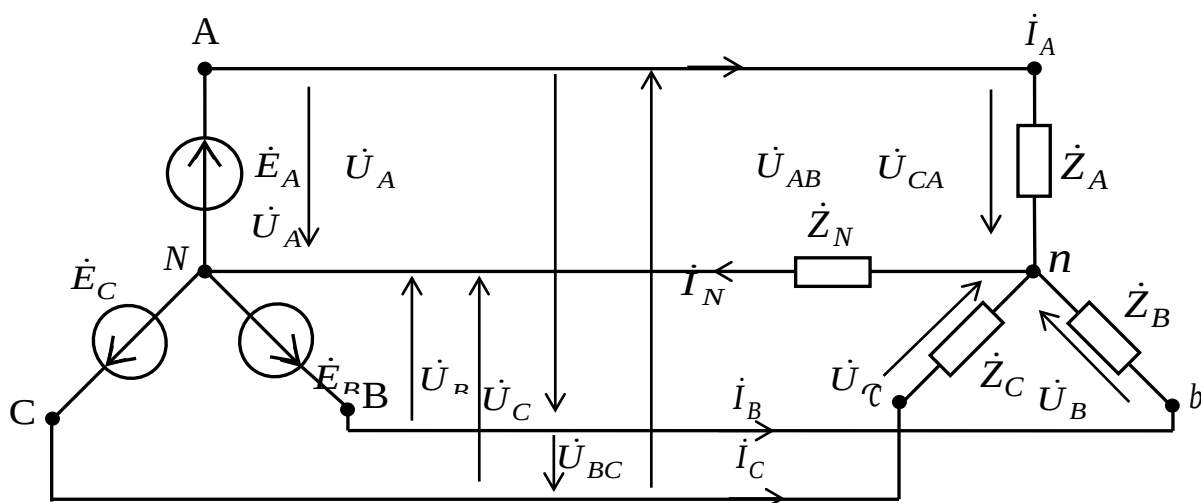
$$\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi = \arctan \frac{x_\phi}{R_\phi}. \quad (13)$$

Үшфазалы симметриялы ЭҚК жүйесіне сәйкес векторлық диаграмма 2,а. суретте көрсетілген.

### **«Жұлдызша-жұлдызша» жалғау**

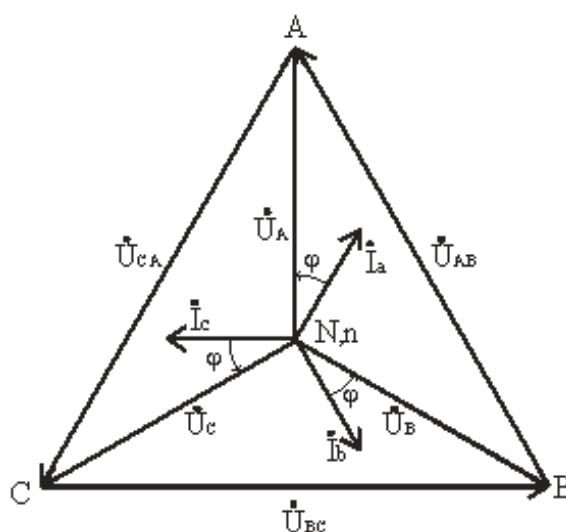
Егер  $X, Y, Z$  генератор орамдарының фазалар ұштары  $N$  ортақ нүктесіне (нейтральды нүктеге) жалғанса және қабылдағыш фазаларының ұштары  $n$  нүктесіне жалғанса, сонда мұндай жалғану тәсілі **«жұлдызша-жұлдызша»** деп аталады (7 сурет).

Генератор және қабылдағыштың фазаларының басы жалғайтын сымдарды **желілік** деп атайды:  $A - a$ ,  $B - b$  және  $C - c$ . Генератордың  $N$  нүктесін қабылдағыштың  $n$  нүктесімен жалғайтын сымды **нейтралды** деп атайды:  $N - n$ . Үшфазалы тізбектің нейтралды сымымен жалғануы – төртсымды жұлдызша, ал нейтралды сымсыз болса – үшсымды жұлдызша деп аталады.



7-сурет. Үшфазалы тізбек: «жұлдызша-жұлдызша, төртсымды» жалғауы

Симметриялы жүктеме қолдану кезінде  $I_N$  нейтралды сымдағы ток 0-ге тең болады. Бұл, 8-суретте көрсетілгендей, токтардың векторлық диаграммасынан шығады: тоқтың үш векторының геометриялық қосындысы нөлге тең болатындықтан  $I_A + I_B + I_C = 0$ . Сондықтан, нейтралды сымды алып тастауға болады.



8- сурет. Симметриялы қабылдағыш үшін тоқтың векторлық диаграммасы

Үшфазалы тізбектегі кернеу мен токтарды екі түрге ажыратады:

✓ **желілік** -

$$\dot{U}_{\text{желі}} = \{\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}\}, \quad \dot{I}_{\text{желі}} = \{\dot{I}_{AB}, \dot{I}_{BC}, \dot{I}_{CA}\}.$$

✓ **фазалық** -

$$\dot{U}_{\phi} = \{\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C\}, \quad \dot{I}_{\phi} = \{\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C\}.$$

**Фазалық кернеу** – кез-келген желілік сым мен нөлдік сымның арасындағы кернеу, әлде жүктемеге немесе энергия көзінің орамына берілген кернеу болып табылады. Егер сымдардың кедергілерін ескермеуге болатын болса, сонда қабылдағыштағы фазалық кернеу энергия көзіндегі кернеуге тең деп алынады. Фазалық кернеудің оң бағытын фаза басынан соңына қарай бағытын қабылдайды. **Фазалық ток** – энергия көзі орамы немесе тұтынушы арқылы өтетін ток болып табылады.

**Желілік кернеу** - екі желілік сым арасындағы кернеу немесе екі кез-келген фаза арасындағы кернеу болып табылады. Желілік кернеулердің оң бағыты ретінде бірінші индекске сәйкес келетін нүктесінен екінші индекске сәйкес келетін нүктесіне қабылданған. **Желілік ток** – желілік сым арқылы өтетін ток болып табылады.

Егер нейтралды сымның және сымдардың кедергілерін ескермесек, сонда желілік пен фазалық шамаларының байланысы келесідегідей болады.

«Жұлдызша-жұлдызша, үшсымды» жалғану кезінде фазалық және желілік токтар тең болады

$$\dot{I}_{\phi} = \dot{I}_{\text{желі}}. \quad (14)$$

Фазалық кернеулер

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{E}_A, \\ \dot{U}_B &= \dot{E}_B, \\ \dot{U}_C &= \dot{E}_C. \end{aligned} \quad (15)$$

7-суретінен желілік кернеулер

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= \dot{E}_A - \dot{E}_B, \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{E}_B - \dot{E}_C, \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{E}_C - \dot{E}_A. \end{aligned} \quad (16)$$

(16) бірінші теңдігіне (15) формулаларын, кейіннен (4)-(6) қойып, келесі теңдеуді аламыз

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= \dot{E}_A - \dot{E}_B = E_m - E_m (\cos(-120^\circ) + j \sin(-120^\circ)) = E_m \left( 1 + \frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \\ &= E_m \left( 1.5 + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = E_m e^{j \arctg \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{1}{1.5}} = E_m e^{j 30^\circ} = E_m \sqrt{3} = U_{\phi} \sqrt{3}. \end{aligned}$$

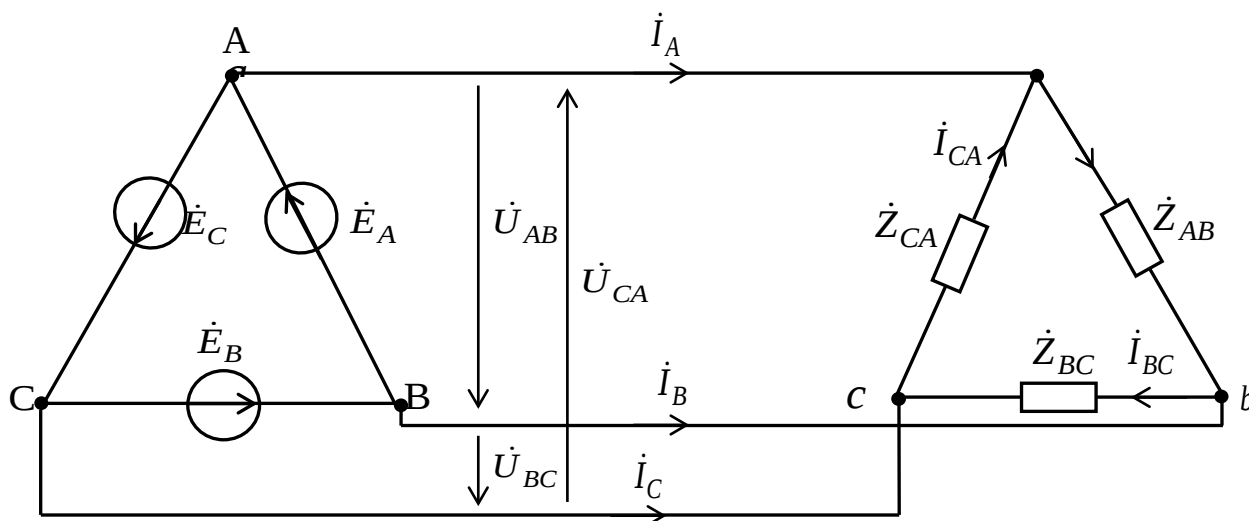
Сонда  $\dot{U}_{AB} = E_m \sqrt{3}$ , мұндай байланыс басқа да желілік кернеулер үшін болады.  $\dot{E}_A = E_m$  болғандықтан, бұдан

$$U_{\text{желі}} = \sqrt{3} U_{\phi} \quad (17)$$

(14) және (17) формулары симметриялы үшфазалы тізбектің «жұлдызша-жұлдызша, үшсымды» жалғану кезіндегі желілік және фазалық шамалар (ток, кернеу) арасындағы байланысты көрсетеді.

### «Үшбұрыш-үшбұрыш» жалғау

Егер генератор орамының әр фазасының соңын келесі фазаның басымен және жүктемеге үш желілік сымдарымен жалғаса, сонда «үшбұрыш-үшбұрыш» түрінде жалғану болады (9-сурет).



9-сурет. Үшфазалы тізбек: «үшбұрыш-үшбұрыш» жалғау

Мұндай тәсілмен жалғанған симметриялы үшфазалы тізбектегі фазалы және желілік кернеулер бірдей болады

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{U}_{AB}, \\ \dot{U}_B &= \dot{U}_{BC}, \\ \dot{U}_C &= \dot{U}_{CA}, \end{aligned} \quad (18)$$

яғни

$$\dot{U}_\phi = \dot{U}_{\text{желі}}, \quad (19)$$

$a$ ,  $b$ ,  $c$  түйіндері үшін Кирхгофтың бірінші заңы бойынша жүктеменің желілік және фазалық токтар

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}, \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}, \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}. \end{aligned} \quad (20)$$

мұнда

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\dot{Z}_{AB}}, \quad \dot{I}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{\dot{Z}_{BC}}, \quad \dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{\dot{Z}_{CA}} \quad (21)$$

(20) бірінші теңдігіне (21) және (18) формулаларын қоя отырып, сонымен қатар қабылдағыштың симметриялы екенін ескере отырып -  $\dot{Z}_{AB} = \dot{Z}_{BC} = \dot{Z}_{CA} = \dot{Z}$ , келесі теңдеуді аламыз:

$$\begin{aligned}\dot{I}_A &= \frac{\dot{U}_{AB}}{\dot{Z}_{AB}} - \frac{\dot{U}_{CA}}{\dot{Z}_{CA}} = \frac{\dot{U}_A}{\dot{Z}} - \frac{\dot{U}_C}{\dot{Z}} = \frac{\dot{E}_A}{\dot{Z}} - \frac{\dot{E}_C}{\dot{Z}} = \\ &= \frac{E_m - E_m a}{\dot{Z}} = \frac{E_m}{Z} \left( 1 + \frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \frac{E_m}{Z} \left( 1.5 - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \\ &= \frac{E_m}{\dot{Z}} e^{j \arctan \left( -\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \left( \frac{1}{1.5} \right)} = \frac{E_m}{\dot{Z}} e^{-j 30^\circ} = \frac{E_m}{\dot{Z}} \frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{I_{жәлі}}{\sqrt{3}}\end{aligned}\quad (22)$$

Сонда

$$\dot{I}_\phi = \frac{I_{жәлі}}{\sqrt{3}} \quad \text{немесе} \quad \dot{I}_{жәлі} = \sqrt{3} \dot{I}_\phi \quad (23)$$

(18) және (23) формулалары «үшбұрыш-үшбұрыш» тәсілімен жалғанған симметриялы үшфазалы тізбектегі желілік және фазалық шамалар (ток, кернеу) арасындағы байланысты көрсетеді.

### Бақылау сұрақтары

1. Көпфазалы жүйеге анықтама беріңіз және негізгі ұғымдарды түсіндіріңіз.
2. «Жұлдызша» жалғау кезіндегі үшфазалы тізбектің симметриялы жұмыс режимін сипаттап беріңіз.
3. «Үшбұрыш» жалғау кезіндегі үшфазалы тізбектің симметриялы жұмыс режимін сипаттап беріңіз.

### Әдебиеттер тізімі

1. Н.Ш. Алимгазина, А.Б. Манапбаева. Электр тізбектер теориясы. Дәрістер жинағы. – Алматы: Қазақ университеті, 2017. – 228 б.
2. Н.Ш. Алимгазина, С.М. Манаков, А.Б. Манапбаева, А.Ә. Әлібек. «Электр тізбектер теориясы» пәні бойынша есептер жинағы. – Алматы: Қазақ университеті, 2017. – 162 б.
3. Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. Основы теории цепей: Учеб. для вузов. – 8-е изд., перераб. – М., 2020 - 528 с.
4. Л.А. Бессонов. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. Учеб. для студентов электротех., энергетич. и приборостроит. спец. вузов. – 7-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2015. – 528 с.