

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

10-дәріс. Үшфазалық тізбектің асимметриялық режимі

Дәрістің мақсаты. Білім алушыларға үшфазалы тізбектің асимметриялы жұмыс режимін түсіндіру; әртүрлі жағдайлардағы фазалық кернеулер мен токтарды талдауды үйрету (жалпы жағдай, кейбір фазаларда нөлдік кернеу немесе ток болғандағы жағдай, қабылдағыш фазаларының әртүрлі элементтерден құралған жағдай); сондай-ақ үшфазалы тізбектің қуатын анықтау әдістерін меңгерту.

Жоспар

1. Үшфазалы тізбектің асимметриялы жұмыс режимі
2. Үшфазалы тізбектің қуаты

1. Үшфазалы тізбектің асимметриялы жұмыс режимі

Үшфазалы тізбегінің «жұлдызша-жұлдызша» жалғануы кезіндегі әртүрлі асимметриялы жүктемелер жағдайында қарастырайық:

1. Кернеулердің симметриялы жүйесі және асимметриялы жүктеме кезінде, яғни $\dot{Z}_A \neq \dot{Z}_B \neq \dot{Z}_C$ және $\varphi_A \neq \varphi_B \neq \varphi_C$ болса, тұтынушы фазасындағы токтар әртүрлі болады және Ом заңы бойынша анықталады

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{\dot{Z}_A}, \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{\dot{Z}_B}, \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{\dot{Z}_C} \quad (1)$$

Үшфазалық тізбектің «жұлдызша-жұлдызша, төртсымды» жалғануы кезіндегі асимметриялы жұмыс режимін қарастырамыз.

$\dot{I}_N$ нейтралды сымдағы ток фазалық токтардың геометриялық қосындысына тең болады

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C. \quad (2)$$

Қабылдағыштың нейтралды нүктелері мен энергия көзінің арасындағы нейтраль ығысуының кернеуін екі түйін әдісі бойынша анықтауға болады

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\dot{Y}_A \dot{U}_A + \dot{Y}_B \dot{U}_B + \dot{Y}_C \dot{U}_C}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_N}, \quad (3)$$

мұнда $\dot{Y}_A = \frac{1}{\dot{Z}_A}$, $\dot{Y}_B = \frac{1}{\dot{Z}_B}$, $\dot{Y}_C = \frac{1}{\dot{Z}_C}$, $\dot{Y}_N = \frac{1}{\dot{Z}_N}$ - қабылдағыш фазаларының және нейтралды сымның комплекстік өткізгіштіктері. Симметриялы жүктеме кезінде нейтраль ығысуының кернеуі болмайды $\dot{U}_{nN} = 0$, ал асимметриялы жүктеме кезінде нейтраль ығысуының кернеуі пайда болады: $\dot{U}_{nN} \neq 0$.

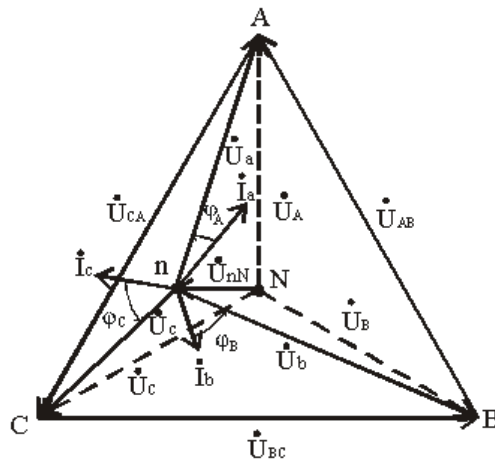
Қабылдағыш фазаларындағы кернеулер бір-бірінен ерекшеленеді, Кирхгофтың екінші заңынан

$$\begin{aligned}\dot{U}'_A &= \dot{U}_A - \dot{U}_{nN}, \\ \dot{U}'_B &= \dot{U}_B - \dot{U}_{nN}, \\ \dot{U}'_C &= \dot{U}_C - \dot{U}_{nN}.\end{aligned}\quad (4)$$

Фазалық токтар

$$\begin{aligned}\dot{I}_A &= \frac{\dot{U}'_A}{\dot{Z}_A} = \dot{U}'_A \cdot \dot{Y}_A, \\ \dot{I}_B &= \frac{\dot{U}'_B}{\dot{Z}_B} = \dot{U}'_B \cdot \dot{Y}_B, \\ \dot{I}_C &= \frac{\dot{U}'_C}{\dot{Z}_C} = \dot{U}'_C \cdot \dot{Y}_C.\end{aligned}\quad (5)$$

Қорек көзінің фазалық кернеулерінің векторлары және $\dot{U}_{nN}$ векторы 1-суретте көрсетілген. Жүктеменің фазалық кедергілер шамаларының (немесе сипаты) өзгеруі кезінде $\dot{U}_{nN}$ мәні өзгереді. Осы кезде қабылдағыштың n нейтралды нүктесі диаграммада әртүрлі орныға тұру мүмкін. Ал қабылдағыштың $\dot{U}'_A, \dot{U}'_B, \dot{U}'_C$ фазалық кернеулері бір-бірінен айырықша ерекшеленеді.



1-сурет. Кернеу мен токтардың векторлық диаграммасы

Симметриялы жүктеме кезінде нейтралды сым назарға алынбайды, себебі қабылдағыштың фазалық кернеулеріне әсер етпейді. Асимметриялы жүктеме және нейтралды сым болмаған кезінде жүктеменің фазалық кернеулері генератордың фазалық кернеулерімен тығыз байланыста болмайды, өйткені жүктемеге тек генератордың желілік кернеулер ғана әсер етеді. Бұл жағдайда асимметриялы жүктеме $\dot{U}'_A, \dot{U}'_B, \dot{U}'_C$ фазалық кернеулердің асимметриясын және кернеулер үшбұрышының центрінен n нейтралды нүктесінің ығысуын береді (нейтраль ығысуы).

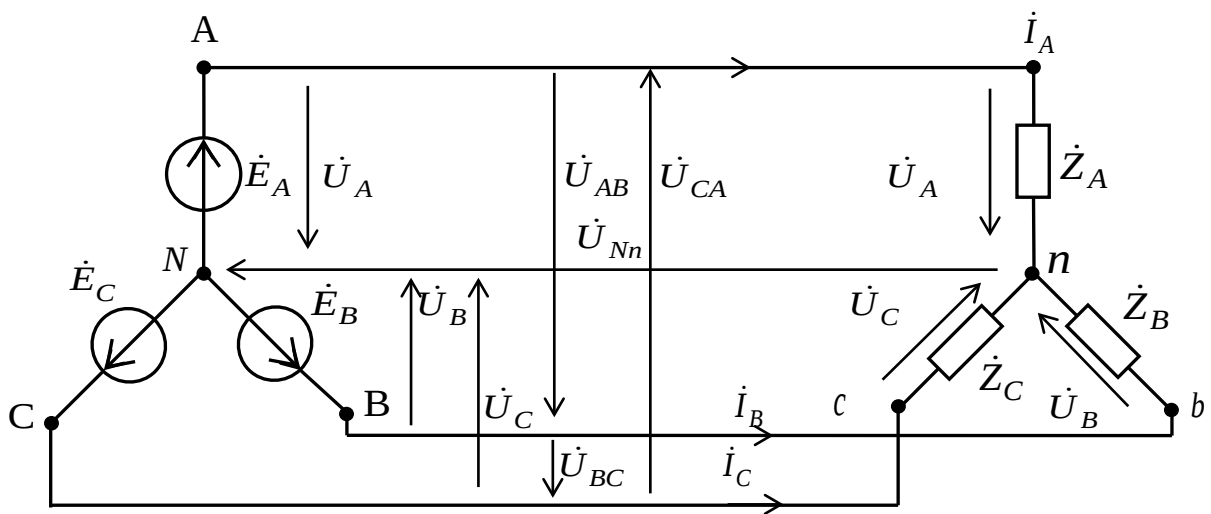
Нейтраль ығысуының бағыты жүйе фазаларының реттілігіне және жүктеме сипатына тәуелді. Сондықтан нейтралды сым осы үшін керек:

✓ Асимметриялы жүктеме кезіндегі қабылдағыштың фазалық кернеулерін түзету үшін;

✓ Үшфазалы тізбекке желінің номиналды желілік кернеуінен $\sqrt{3}$ есе аз номиналды кернеуі бар бірфазалы қабылдағыштарды жалғау үшін қолданылады.

$\dot{Z}_N = 0$ кезінде, нейтралды сым болғандықтан, генератор орамдарының әр фазасында кернеулер қабылдағыштағы сәйкес фазаларының кернеулеріне тең болады (2-сурет).

Демек, нейтралды сым асимметриялы жүктеме кезінде қабылдағыштың фазалық кернеулердің симметриясын қамтамасыз етеді. Сондықтан төртсымды желіге бірфазалы асимметриялы жүктемелерді қосады (мысалы, электрлік қыздыру шамдар). Генератордың тұрақты фазалық кернеу беріліп тұрғанда, үшфазалы жүктеменің әр фазасының жұмыс режимі басқа фазалардың жұмыс режимдеріне тәуелді болмайды.



2-сурет. Үшфазалы тізбек: «жұлдызша-жұлдызша, үшсымды» жалғау

2. Симметриялы кернеулер жүйесінде және асимметриялы жүктеме кезінде, бір фазада айнымалы кедергі - $\dot{Z}_A \in [0, \infty]$, ал $\dot{Z}_B = \dot{Z}_C$ болады (3-сурет). Қабылдағыштың барлық фазалары резистивті сипаттамаға ие болсын

$$Y_A = g_A = \frac{1}{R_A}, Y_B = Y_C = g = \frac{1}{R}.$$

Нейтраль ығысуының кернеуі келесі түріне ие болады

$$\begin{aligned} \dot{U}_{nN} &= \frac{g_A \dot{U}_A + g \dot{U}_B + g \dot{U}_C}{g_A + 2g} = \frac{g_A \dot{E}_m + g \dot{E}_m a^2 + g \dot{E}_m a}{g_A + 2g} = \\ &= \frac{E_m}{g_A + 2g} \left(g_A + g \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right) = \frac{E_m (g_A - g)}{g_A + 2g}. \end{aligned} \quad (6)$$

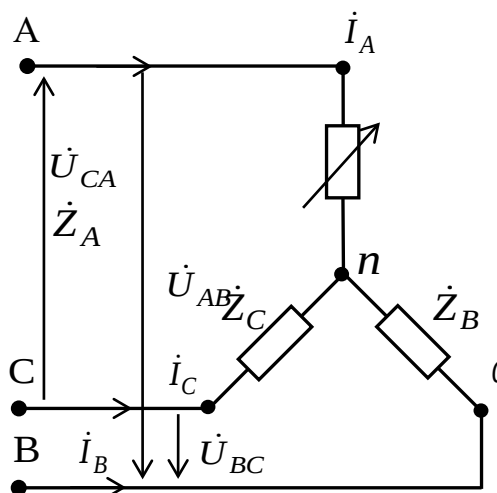
Егер $m = \frac{g_A}{g}$ болса, сонда (29) келесі түріне айналады

$$\dot{U}_{nN} = E_m \cdot \frac{m-1}{m+2}. \quad (7)$$

Келесі жағдайларды қарастырайық:

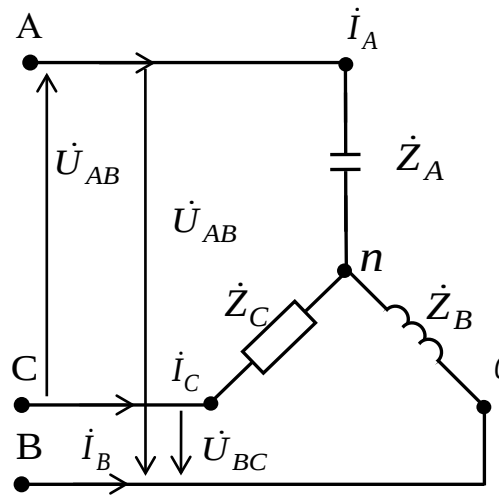
1) Егер $R_A = 0$ болса, сонда $g_A \rightarrow \infty$ және $m \neq 0$. Нейтраль ығысуының кернеуі белгілі бір шамаға ие болады, яғни $\dot{U}_{nN} \approx E_m$, бұл жағдайда фазалық кернеулер: $\dot{U}_A = 0, \dot{U}_B = -\dot{U}_{AB}, \dot{U}_C = \dot{U}_{CA}$. Фазалық токтарды жоғарыда жазылған (28) формулалар арқылы анықтауға болады.

2) Егер $R_A \rightarrow \infty$ болса, сонда $g_A \rightarrow 0$ және $m = 0$. Нейтраль ығысуының кернеуі теріс шамасына ие болады, яғни $\dot{U}_{nN} \approx -\frac{E_m}{2}$, осы кезде фазалық токтар мен кернеулерді жоғарыда жазылған (4) және (5) формулалар арқылы анықтауға болады.



3-сурет

3. Симметриялы кернеулер жүйесінде және асимметриялы жүктеме жағдайында, a фазасында сыйымдылықты, b фазасында – индуктивтілік, ал c фазасында – активті жүктеме болған кезін қарастырамыз: $\dot{Z}_A \rightarrow C, \dot{Z}_B \rightarrow L, \dot{Z}_C \rightarrow R$ (4-сурет).



4-сурет

Қабылдағыш фазаларының комплекстік өткізгіштіктері

$$\dot{Y}_A = \frac{1}{\dot{Z}_A} = jb_C, \quad \dot{Y}_B = \frac{1}{\dot{Z}_B} = -jb_L, \quad \dot{Y}_C = \frac{1}{\dot{Z}_C} = g. \quad (8)$$

Нейтраль ығысуының кернеуі келесі түрін қабылдайды

$$\dot{U}_{nN} = \frac{E_m \cdot jb_C + E_m a^2 \cdot (-jb_L) + E_m a \cdot g}{g + jb_C - jb_L}. \quad (9)$$

Егер реактивті өткізгіштіктер бірдей болса: $b_C = b_L = b$, сонда

$$\dot{U}_{nN} = \frac{jb \cdot E_m (1 - a^2) + E_m a \cdot g}{g} = \frac{E_m}{g} (jb(1 - a^2) + ga).$$

Фазалық кернеулер мен токтар (4) және (5) формулалар арқылы анықтауға болады. С фазасындағы токты анықтаған кезінде

$$\begin{aligned} \dot{I}_C &= (\dot{E}_C - \dot{U}_{nN}) \dot{Y}_C = \left(E_m a - \frac{E_m}{g} (jb(1 - a^2) + ga) \right) g = \\ &= (E_m ag - E_m (jb(1 - a^2) + ga)) = -E_m \cdot jb(1 - a^2). \end{aligned}$$

Осыдан, С фазасындағы ток басқа фазадағы өткізгіштіктер тең болған кезінде өзінің активті өткізгіштігіне тәуелсіз екендігін байқаймыз.

Осыған ұқсас, жоғарыда жазылған формулаларды қолдана отырып қабылдағышты «үшбұрыш» жалғау тәсілімен қарастырса болады. Мұндай жалғаудың басты ерекшелігі, бір фазаның кедергісін өзгерту кезінде басқа фазаларының жұмыс режимі өзгеріссіз қалатыны. Себебі, генератордың желілік кернеулері тұрақты болады. Осы кезде сол фазаның тоғы және осы

фазамен байланыста болатын желі сымдарының желілік токтары өзгереді. Сондықтан «үшбұрыш» жалғау схемасы асимметриялы жүктеме кезінде кең қолданылады.

2 Үшфазалы тізбектің қуаты

Үшфазалы тізбекте бірфазалы тізбектегідей активті, реактивті және толық қуат деген сияқты ұғымдар қолданылады.

Электр энергиясын тұтынушылардың «жұлдызша» жалғауын қарастырайық. Асимметриялы жүктеме кезінде жалпы жағдайында үшфазалы қабылдағыштың активті қуаты жеке фазалардың активті қуатының қосындысына тең

$$P = P_A + P_B + P_C, \quad (10)$$

мұнда

$$\begin{aligned} P_A &= \dot{U}_A \dot{I}_A \cos \varphi_A, \\ P_B &= \dot{U}_B \dot{I}_B \cos \varphi_B, \\ P_C &= \dot{U}_C \dot{I}_C \cos \varphi_C, \end{aligned} \quad (11)$$

$\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ - фазалық кернеу, $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ - фазалық ток, $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$ - кернеу мен ток арасындағы фаза ығысу бұрышы.

Реактивті қуат сәйкесінше жеке фазалардың реактивті қуаттарының алгебралық қосындысына тең

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C, \quad (12)$$

мұнда

$$\begin{aligned} Q_A &= U_A I_A \sin \varphi_A, \\ Q_B &= U_B I_B \sin \varphi_B, \\ Q_C &= U_C I_C \sin \varphi_C. \end{aligned} \quad (13)$$

Жеке фазалардың толық қуаты

$$\begin{aligned} S_A &= U_A I_A, \\ S_B &= U_B I_B, \\ S_C &= U_C I_C. \end{aligned} \quad (14)$$

Үшфазалы қабылдағыштың толық қуаты

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (15)$$

Симметриялы кернеулер жүйесі кезінде

$$\dot{U}_A = \dot{U}_B = \dot{U}_C = \dot{U}_\phi$$

және симметриялы жүктеме кезінде

$$\dot{I}_A = \dot{I}_B = \dot{I}_C = \dot{I}_\phi, \quad \varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi$$

$$P_A = P_B = P_C = P_\phi = U_\phi I_\phi \cos \varphi, \quad Q_A = Q_B = Q_C = Q_\phi = U_\phi I_\phi \sin \varphi.$$

Үшфазалы симметриялы қабылдағыштың активті және реактивті қуаты сәйкесінше

$$P = 3P_\phi = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi,$$

$$Q = 3Q_\phi = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi,$$

сонда *толық қуат*

$$S = 3S_\phi = 3U_\phi I_\phi. \quad (16)$$

Қорытындылау келе, үшфазалы тізбектің симметриялы кернеулер жүйесі мен симметриялы жүктеме кезіндегі бір фазаның қуатын ғана өлшеуге болады, кейіннен шыққан нәтижені үш еселеу керек.

Электр энергия тұтынушыларын «үшбұрыш» тәсілімен жалғау кезінде және асимметриялы жүктеменің жалпы жағдайында үшфазалы қабылдағыштың активті қуаты жеке фазалардың активті қуаттарының қосындысына тең болады

$$P = P_{AB} + P_{BC} + P_{CA}, \quad (17)$$

мұнда

$$\begin{aligned} P_{AB} &= U_{AB} I_{AB} \cos \varphi_{AB}, \\ P_{BC} &= U_{BC} I_{BC} \cos \varphi_{BC}, \\ P_{CA} &= U_{CA} I_{CA} \cos \varphi_{CA}, \end{aligned} \quad (18)$$

$\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$, - желілік кернеу, олар қабылдағыштың фазалық кернеулеріне тең болады. $\dot{I}_{AB}, \dot{I}_{BC}, \dot{I}_{CA}$ - қабылдағыштың әр фазасындағы желілік ток, $\varphi_{AB}, \varphi_{BC}, \varphi_{CA}$ - кернеу мен ток арасындағы фаза ығысу бұрышы.

Реактивті қуат жеке фазалардың реактивті қуаттарының алгебралық қосындысына тең

$$Q = Q_{AB} + Q_{BC} + Q_{CA}, \quad (19)$$

мұнда

$$\begin{aligned} Q_{AB} &= U_{AB} I_{AB} \sin \varphi_{AB}, \\ Q_{BC} &= U_{BC} I_{BC} \sin \varphi_{BC}, \\ Q_{CA} &= U_{CA} I_{CA} \sin \varphi_{CA}. \end{aligned} \quad (20)$$

Жеке фазалардың толық қуаты

$$\begin{aligned}S_{AB} &= U_{AB} I_{AB}, \\S_{BC} &= U_{BC} I_{BC}, \\S_{CA} &= U_{CA} I_{CA}.\end{aligned}\tag{21}$$

Симметриялы кернеулер жүйесінде «үшбұрыш» жалғау кезінде

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{BC} = \dot{U}_{CA} = \dot{U}_{\phi}$$

және симметриялы жүктеме кезінде

$$\begin{aligned}\dot{I}_{AB} &= \dot{I}_{BC} = \dot{I}_{CA} = \dot{I}_{\phi}, \\ \varphi_{AB} &= \varphi_{BC} = \varphi_{CA} = \varphi_{\phi},\end{aligned}$$

фазалық қуаттар

$$\begin{aligned}P_{AB} &= P_{BC} = P_{CA} = P_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi, \\ Q_{AB} &= Q_{BC} = Q_{CA} = Q_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi.\end{aligned}$$

Симметриялы үшфазалы қабылдағыштың активті және реактивті қуаттары

$$P = 3P_{\phi}, \quad Q = 3Q_{\phi},$$

сонда *толық қуат*

$$S = 3S_{\phi} = 3U_{\phi} I_{\phi}.\tag{22}$$

Номиналды шамалар ретінде желілік кернеулер мен токтарды қабылдайтындықтан, қуаттарды $U_{\text{жәлі}}$ және $I_{\text{жәлі}}$ желілік шамалары арқылы сипаттау оңайға соғады.

Симметриялы қабылдағыштың фазаларын «жұлдызша» жалғау кезінде:

$$U_{\phi} = \frac{U_{\text{жәлі}}}{\sqrt{3}}, \quad I_{\phi} = I_{\text{жәлі}}$$

және «үшбұрыш» жалғау кезінде:

$$U_{\phi} = U_{\text{жәлі}}, \quad I_{\phi} = \frac{I_{\text{жәлі}}}{\sqrt{3}}.$$

Электр энергия тұтынушыларының фазаларын қосуына байланысты *симметриялы жүктеме кезіндегі активті және реактивті қуат* бірдей формуламен анықталады

$$P = \sqrt{3}P_{\text{жәлі}} = \sqrt{3}U_{\text{жәлі}}I_{\text{жәлі}} \cos \varphi, \quad Q = \sqrt{3}Q_{\text{жәлі}} = \sqrt{3}U_{\text{жәлі}}I_{\text{жәлі}} \sin \varphi, \quad (23)$$

мұндағы $U_{\text{жәлі}}$ және $I_{\text{жәлі}}$ – желілік кернеу мен желілік ток. Индекстерді жазбай, жоғарыда берілген формулаларды салыстыру арқылы «Δ-үшбұрыш» және «Y-жұлдызша» жалғаулар кезіндегі активті қуаттардың арасындағы байланысты анықтаймыз

$$P_{\Delta} = 3P_Y. \quad (24)$$

Осыдан, өзгермейтін желілік кернеу берілгенде қабылдағыштың жалғауларын «жұлдызша»-дан «үшбұрыш»-қа ауыстыру кезінде оның қуаты үш есе артады.

Үшфазалы тізбектерде активті қуаттың өлшеулері әр түрлі қосу схемаларды қолдана отырып үш, екі немесе бір ваттметр көмегі арқылы іс-жүзеге асады. Активті қуатты өлшеу үшін ваттметрлердің қосу схемасы желінің схемасымен (үш- немесе төртсымды), қабылдағыш фазаларының қосу схемасымен («жұлдызша» немесе «үшбұрыш»), жүктеменің сипатымен (симметриялы немесе асимметриялы), нейтраль нүктенің қолжетімділігімен анықталады.

Бақылау сұрақтары

1. Үшфазалы тізбектің түрлі асимметриялы жұмыс режимінде сипаттап беріңіз.
2. Түрлі жағдайлар үшін үшфазалы тізбектің қуаттарын анықтайтын формулаларын қорытып 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.