

# *Электротехниканың теориялық негіздері I*

9-дәріс

## **Айнымалы ток тізбектеріндегі қуаттар, өлшеу әдістері және максимал қуат беру шарты**

Оқытушы: Мамадияров Максат Муратович, PhD, қауымдастырылған профессор

«Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар» кафедрасы

[m.mamadiyarov@satbayev.university](mailto:m.mamadiyarov@satbayev.university)

01

Лездік қуат және оның құраушылары

02

Активті, реактивті және толық қуат; қуаттар үшбұрышы

03

Кешенді қуат және қуаттар балансы

04

Қуат коэффициенті және оны арттыру

05

Қуатты өлшеу: ваттметр, варметр, электр энергиясын есептеу

06

Амперметр–вольтметр–ваттметр әдісімен параметрлерді анықтау

07

Жүктемеге максимал қуат беру шарты

## Дәріс соңында студент:

1

Лездік қуаттың тұрақты және айнымалы құраушыларын түсіндіреді

2

Активті, реактивті және толық қуаттарды есептейді

3

Кешенді қуатты  $\tilde{S} = \dot{U}\dot{I}^*$  арқылы тауып, қуаттар балансын құрады

4

Қуат коэффициентін арттыратын конденсатор сыйымдылығын есептейді

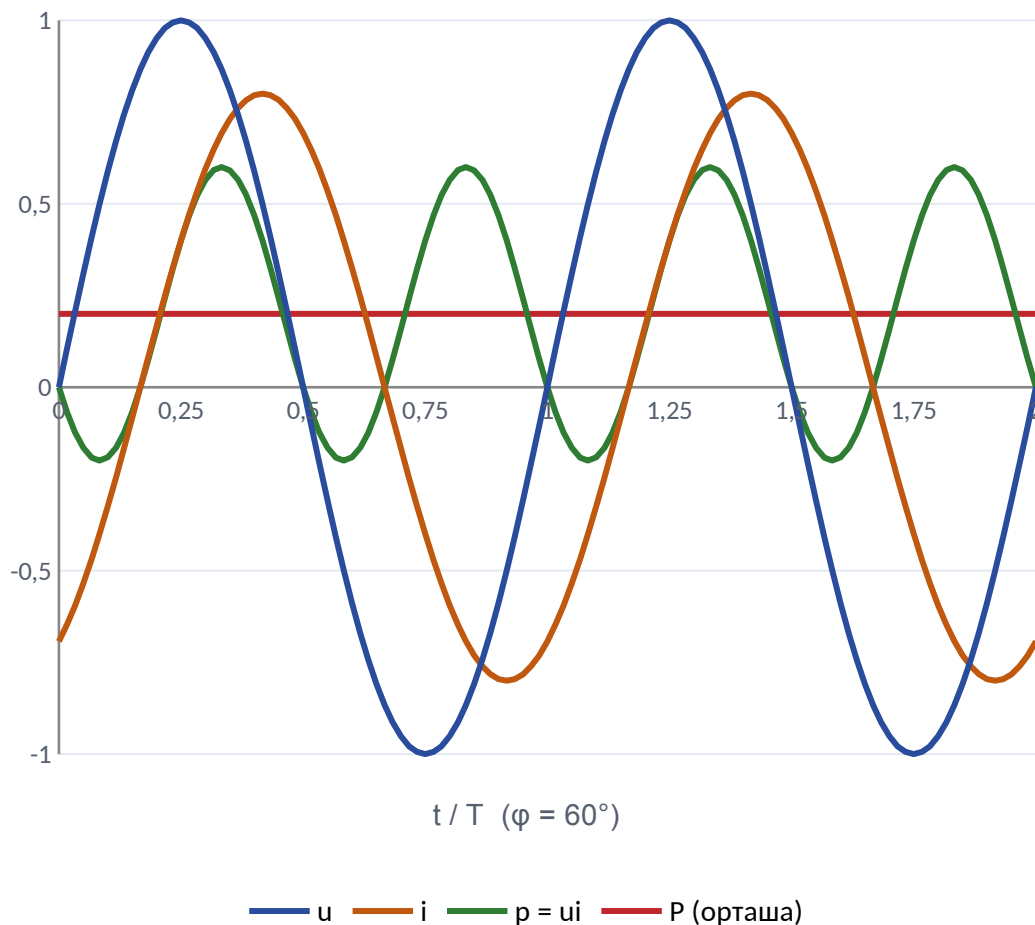
5

Ваттметрді дұрыс қосып, өлшеу нәтижесінен  $R$  және  $X$  анықтайды

6

Максимал қуат беру шартын тұжырымдап, оның ПЭК-ке әсерін бағалайды

$u = U_m \sin \omega t$ ,  $i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$  болғанда:  $p = ui = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t - \varphi)$



## Түсіндірме

- Лездік қуат **екі есе жиілікпен** тербеледі
- $p < 0$  аралықтарда энергия жүктемеден көзге **қайтады** ( $L$ ,  $C$  өрістерінен)
- Орташа мән  $P = UI \cos \varphi$  — нақты тұтынылатын қуат
- $\varphi = 0$  болса,  $p \geq 0$  әрқашан

## Активті қуат $P$

$$P = UI \cos \varphi = I^2 R$$

Лездік қуаттың **орташа** мәні. Жылуға, механикалық жұмысқа айналады. Өлшем бірлігі — **ватт (Вт)**.

## Реактивті қуат $Q$

$$Q = UI \sin \varphi = I^2 X$$

$L$ ,  $C$  өрістері мен көз арасындағы энергия **алмасуының** амплитудасы. Өлшем бірлігі — **вар**.  $Q_L > 0$ ,  $Q_C < 0$ .

## Толық қуат $S$

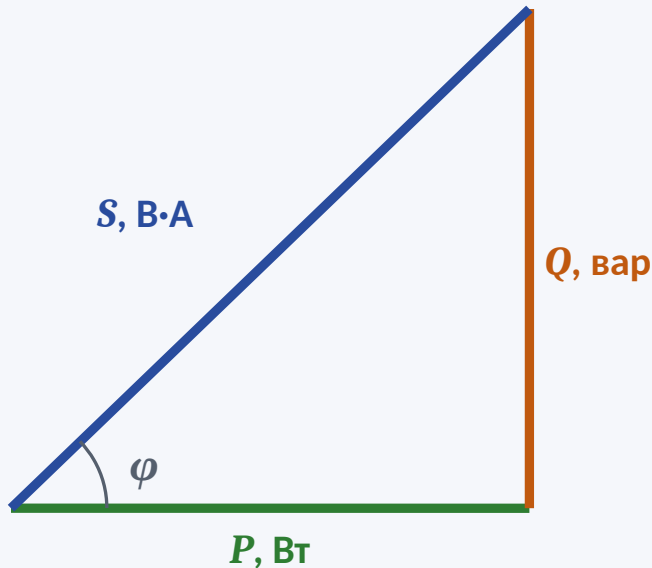
$$S = UI = I^2 |Z|$$

Жабдықтың (генератор, трансформатор, кабель) **есептік** қуаты — ток пен кернеу бойынша шектеу. Өлшем бірлігі — **В·А**.

### НЕГІЗГІ ОЙ

Трансформатордың номиналы кВ·А-мен беріледі: ол жүктеменің  $\cos \varphi$ -іне тәуелсіз, ток пен кернеудің шегін көрсетеді.

# Қуаттар үшбұрышы және қуат коэффициенті



$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$\cos \varphi = P/S$$

$$\text{tg } \varphi = Q/P$$

**Қуат коэффициенті**  $\cos \varphi$  — толық қуаттың қанша бөлігі пайдалы жұмысқа айналатынын көрсетеді. Идеалда  $\cos \varphi = 1$ .

Қуаттар үшбұрышы кедергілер үшбұрышына ұқсас: барлық қабырғасы  $I^2$ -ге көбейтілген ( $P = I^2 R$ ,  $Q = I^2 X$ ,  $S = I^2 |Z|$ ).

Тән мәндер: қыздырғыш —

$\cos \varphi \approx 1$ ; жүктемесі толық асинхронды қозғалтқыш — 0,8...0,9; бос жүрістегі қозғалтқыш — 0,2...0,3.

Үш қуатты бір комплекс санға біріктіруге болады. Ол үшін кернеу **түйіндес** токқа көбейтіледі:

$$\tilde{S} = \dot{U}\dot{I}^* = P + jQ = Se^{j\varphi}$$

| Шама                              | Мағынасы                                                              | Өлшем бірлігі |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------|
| $\tilde{S}$                       | кешенді қуат                                                          | В·А           |
| $\dot{I}^*$                       | түйіндес ток: $\dot{I} = Ie^{j\psi}$ болса, $\dot{I}^* = Ie^{-j\psi}$ | А             |
| $\operatorname{Re} \tilde{S} = P$ | активті қуат                                                          | Вт            |
| $\operatorname{Im} \tilde{S} = Q$ | реактивті қуат                                                        | вар           |

## ФИЗИКАЛЫҚ МАҒЫНАСЫ

Аргументі:  $\psi_u - \psi_i = \varphi$ . Сондықтан нақты бөлігі  $S \cos \varphi = P$ , жорамал бөлігі  $S \sin \varphi = Q$ .

## ҚОЛДАНЫЛУ ШАРТЫ

Кешенді әдіспен есептелген кез келген тармақ үшін;  $\dot{I}$  (түйіндесі емес) алынса, фаза таңбасы қате шығады.

# Мысал: RLC тізбегіндегі қуаттар

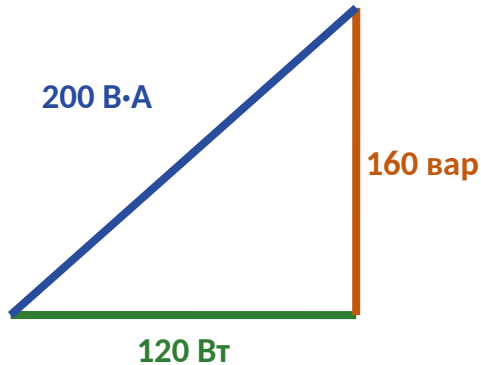


## БЕРІЛГЕНІ

$$\begin{aligned}\dot{U} &= 100 \text{ В} \\ Z &= 30 + j40 \text{ Ом} \\ &(\text{8-дәрістегі тізбек})\end{aligned}$$

## ТАБУ КЕРЕК

$$\tilde{S}, P, Q, S, \cos \varphi$$



## ШЕШУІ

Кешенді ток

1

$$\dot{I} = \dot{U}/Z = 100/(50e^{j53,13^\circ}) = 2e^{-j53,13^\circ} \text{ А}$$

Кешенді қуат

2

$$\tilde{S} = \dot{U}\dot{I}^* = 100 \cdot 2e^{j53,13^\circ} = 200e^{j53,13^\circ} \text{ В·А}$$

Алгебралық түр

3

$$\tilde{S} = 200(0,6 + j0,8) = 120 + j160 \text{ В·А}$$

Тексеру

4

$$P = I^2 R = 4 \cdot 30 = 120 \text{ Вт}; \quad Q = I^2 X = 4 \cdot 40 = 160 \text{ вар}$$

✓

Қуат коэффициенті

5

$$\cos \varphi = P/S = 120/200 = 0,6$$

ЖАУАБЫ

$$P = 120 \text{ Вт}, \quad Q = 160 \text{ вар}, \quad S = 200 \text{ В·А}, \quad \cos \varphi = 0,6$$

Кешенді қуаттың сақталу заңы: көздердің кешенді қуаты жүктемелердің кешенді қуатына тең.

## Жалпы түрі

$$\sum \dot{E}_k \dot{I}_k^* = \sum I_k^2 Z_k$$

- Көздің  $\tilde{S} = \dot{E}\dot{I}^*$  (ток пен ЭҚК бағыттас болса «+»)
- Нақты және жорамал бөліктері бөлек теңеседі

## Бөлек теңдеулер

- **Активті:**  $\sum P_{\text{көз}} = \sum I_k^2 R_k$
- **Реактивті:**  $\sum Q_{\text{көз}} = \sum I_k^2 (X_{Lk} - X_{Ck})$
- Толық қуат үшін баланс **орындалмайды:**  $S \neq \sum S_k$  (модульдер геометриялық қосылады)

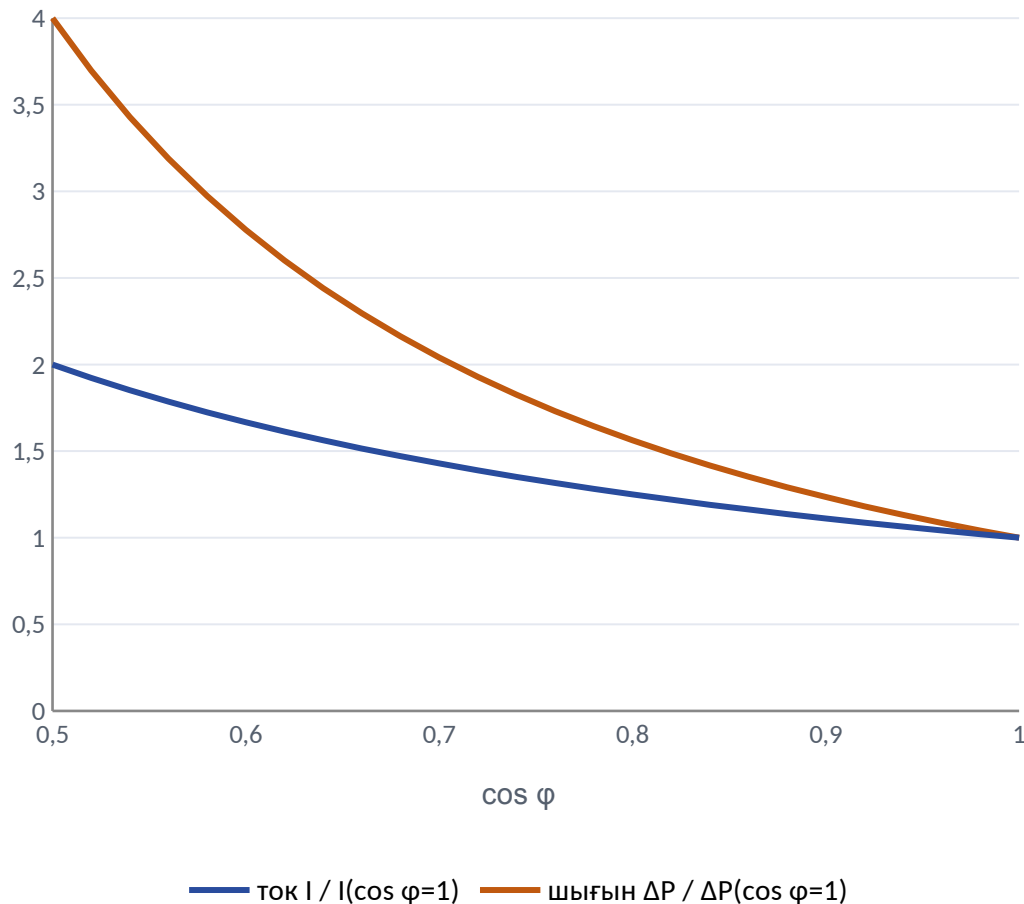
## НЕГІЗГІ ОЙ

Айнымалы ток есебін тексерудің ең сенімді жолы — активті және реактивті қуаттар балансын бөлек құру.

# Неліктен қуат коэффициенті маңызды?



Берілген  $P$  қуатты беру үшін қажетті ток:  $I = P / (U \cos \varphi)$ . Желідегі шығын  $\Delta P = I^2 R_{\text{ж}} \sim 1 / \cos^2 \varphi$ .



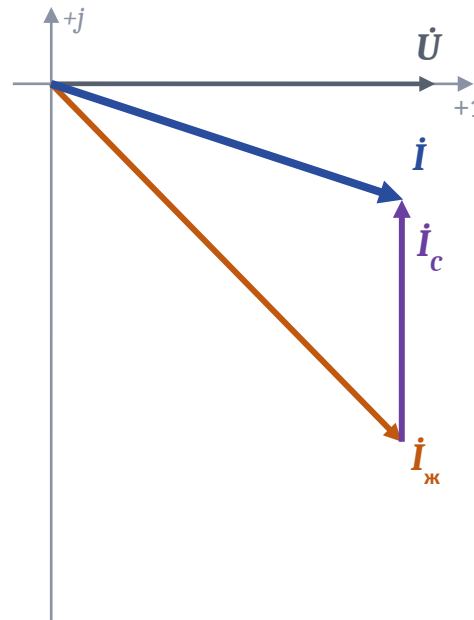
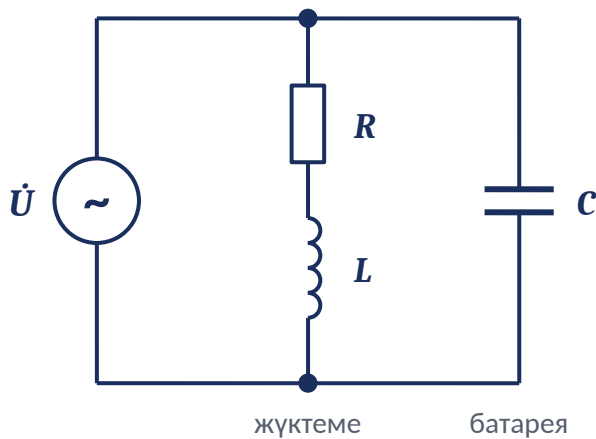
## Салдары

- $\cos \varphi = 0,5$  кезінде ток 2 есе, шығын **4 есе** артады
- Генератор, трансформатор, кабель толық қуатқа  $S$  есептеледі — олар «бос» жүктеледі
- Кернеу түсуі өседі
- Сондықтан кәсіпорындарда реактивті қуатты өтеу талап етіледі

# Қуат коэффициентін арттыру: реактивті қуатты өтеу



Индуктивті жүктемеге **параллель** конденсатор батареясы қосылады: оның тогы жүктеме тогының реактивті құраушысын азайтады.



## Есептік формула

- $Q_c = P(\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2)$
- $C = Q_c / (\omega U^2)$
- $\varphi_1$  — өтеуге дейінгі,  $\varphi_2$  — өтеуден кейінгі бұрыш
- Жүктеменің  $P$  және тогы  $\dot{I}_{ж}$  өзгермейді — желі тогы  $\dot{I}$  азаяды

# Мысал: конденсатор батареясын таңдау



## БЕРІЛГЕНІ

$$P = 10 \text{ кВт}, U = 220 \text{ В}, f = 50 \text{ Гц}$$
$$\cos \varphi_1 = 0,7 \rightarrow \cos \varphi_2 = 0,95$$

## ТАБУ КЕРЕК

$Q_c$ ,  $C$ , желі тогының өзгерісі

Желі тогы 64,9 А-ден 47,8 А-ге төмендеді:  
желідегі шығын  $(47,8/64,9)^2 \approx 0,54$  есе,  
яғни ~46 %-ға азаяды.

## ШЕШУІ

Бұрыш тангенстері

1

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = 1,020; \operatorname{tg} \varphi_2 = 0,329$$

Өтеу қуаты

2

$$Q_c = 10\,000 \cdot (1,020 - 0,329) \approx 6\,915 \text{ вар}$$

Сыйымдылық

3

$$C = 6\,915 / (314 \cdot 220^2) \approx 455 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} = 455 \text{ мкФ}$$

Токтар

4

$$I_1 = 10\,000 / (220 \cdot 0,7) = 64,9 \text{ А}; I_2 = 10\,000 / (220 \cdot 0,95) = 47,8 \text{ А}$$

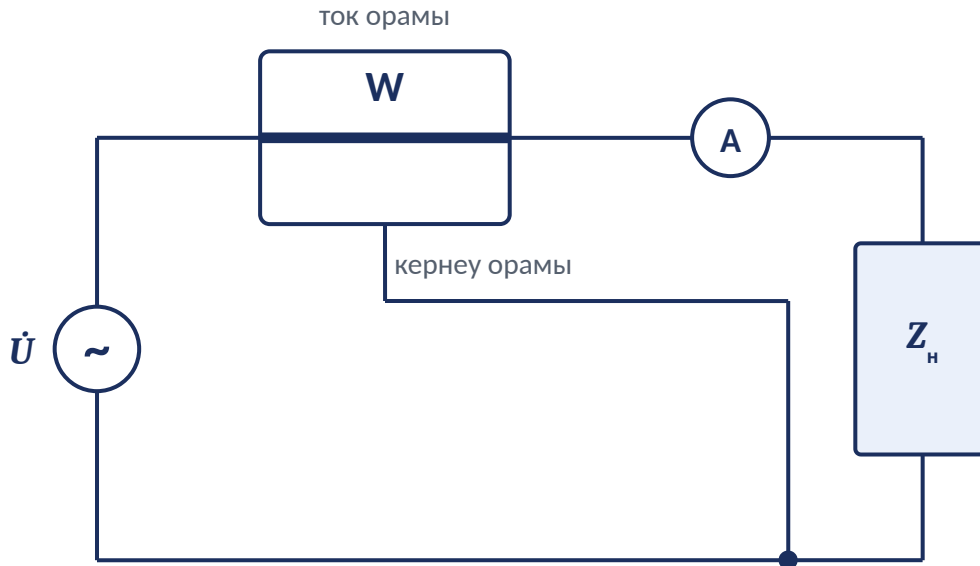
## ЖАУАБЫ

$Q_c \approx 6,9 \text{ квар}$ ;  $C \approx 455 \text{ мкФ}$ ; ток 26 %-ға азаяды

# Қуатты өлшеу: ваттметрді қосу



Ваттметрдің **ток орамы** жүктемемен тізбектей, **кернеу орамы** жүктемеге параллель қосылады. Аспап  $P = UI \cos \varphi$  көрсетеді.



## Өлшеу құралдары

- **Ваттметр** — активті қуат  $P$
- **Варметр** — реактивті қуат  $Q$  (кернеу орамы тізбегінде  $90^\circ$  ығысу)
- **Электр энергиясының есептегіші** —  $W = \int P dt$ , кВт·сағ
- Заманауи цифрлық есептегіштер  $P$ ,  $Q$ ,  $S$ ,  $\cos \varphi$  және гармоникаларды бір уақытта өлшейді

# Амперметр–вольтметр–ваттметр әдісі



## БЕРІЛГЕНІ

Өлшеу нәтижелері:

$$U = 100 \text{ В}, I = 2 \text{ А}$$

$$P = 120 \text{ Вт}, f = 50 \text{ Гц}$$

## ТАБУ КЕРЕК

қабылдағыштың  $R, X, L$

Үш аспап көрсеткіші кез келген пассивті екіұштықтың тізбектей орынбасу сұлбасын толық анықтайды.

## ШЕШУІ

Толық кедергі

1

$$|Z| = U/I = 100/2 = 50 \text{ Ом}$$

Активті кедергі

2

$$R = P/I^2 = 120/4 = 30 \text{ Ом}$$

Реактивті кедергі

3

$$X = \sqrt{(|Z|^2 - R^2)} = \sqrt{(2500 - 900)} = 40 \text{ Ом}$$

Индуктивтілік

4

$$L = X/\omega = 40/314 \approx 0,127 \text{ Гн}$$

Қуат коэффициенті

5

$$\cos \varphi = P/(UI) = 120/200 = 0,6$$

## ЖАУАБЫ

$$R = 30 \text{ Ом}, X = 40 \text{ Ом} (L \approx 0,127 \text{ Гн}), \cos \varphi = 0,6$$

# Жүктемеге максимал қуат беру шарты

Ішкі кедергісі  $Z_i = R_i + jX_i$  көзден (эквивалентті генератор)  $Z_n$  жүктемеге ең үлкен активті қуат берілетін шарт:

$$Z_n = Z_i^* \Leftrightarrow R_n = R_i, X_n = -X_i$$

| Шама                    | Мағынасы                                          | Өлшем бірлігі |
|-------------------------|---------------------------------------------------|---------------|
| $Z_i$                   | көздің (эквивалентті генератордың) ішкі кедергісі | Ом            |
| $Z_n$                   | жүктеме кедергісі                                 | Ом            |
| $P_{\max} = E^2/(4R_i)$ | жүктемеге берілетін максимал қуат                 | Вт            |

## ФИЗИКАЛЫҚ МАҒЫНАСЫ

Реактивті кедергілер өзара **өтеледі** ( $X_i + X_n = 0$ ), ал активті бөліктер тең болғанда қуат максимал — бұл 2-дәрістегі  $R = r$  шартының жалпылануы.

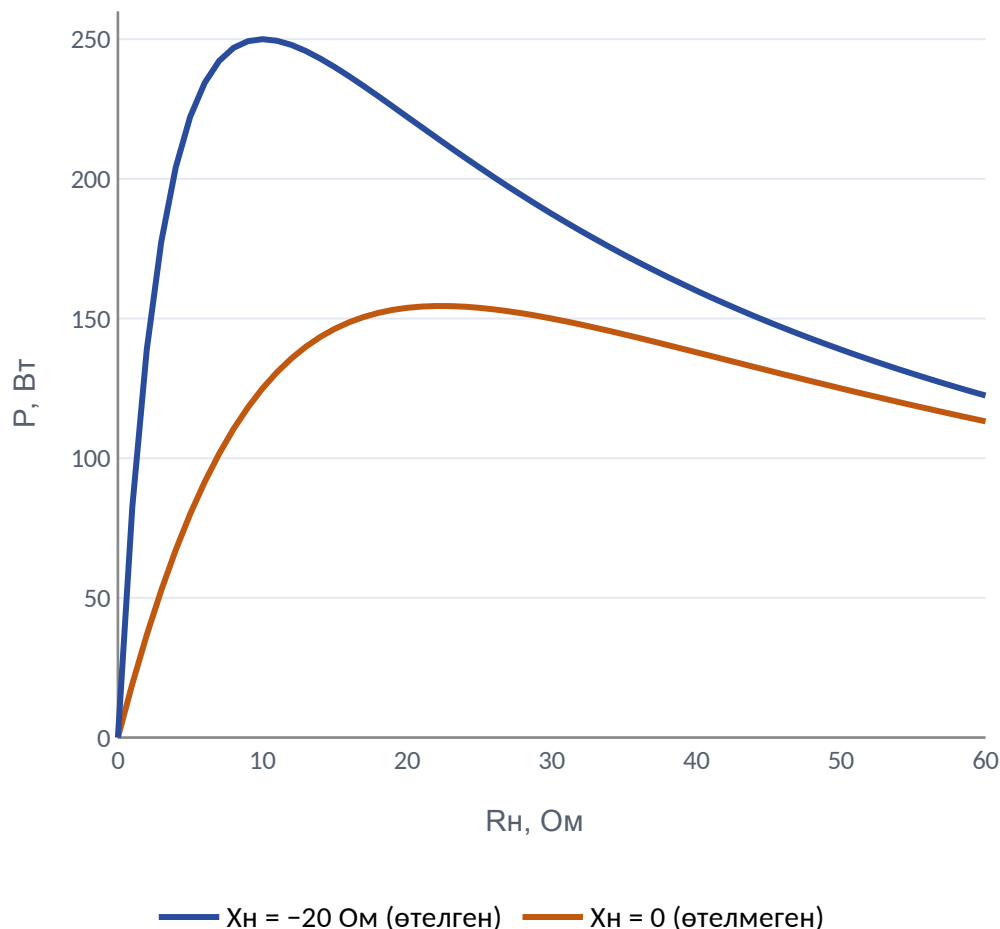
## ҚОЛДАНЫЛУ ШАРТЫ

Осы режимде ПЭК  $\eta = 50 \%$ . Байланыс, антенна, датчиктерде қолданылады; энергетикада қолданылмайды.

# Жүктеме қуатының кедергіге тәуелділігі



$E = 100 \text{ В}$ ,  $Z_i = 10 + j20 \text{ Ом}$ . Жүктеменің реактивті бөлігі өтелгенде және өтелмегенде:



## Нәтиже

- Өтелген жағдайда:  $R_n = 10 \text{ Ом}$  кезінде  $P_{\max} = 250 \text{ Вт}$
- Өтелмеген жағдайда максимум  $R_n = |Z_i| \approx 22,4 \text{ Ом}$  кезінде, тек  $\sim 155 \text{ Вт}$
- Реактивті кедергіні келістіру қуатты айтарлықтай арттырады

## Реактивті қуатты өтеу

Кәсіпорын қосалқы станцияларында автоматты реттелетін конденсатор қондырғылары  $\cos \varphi$ -ді әдетте 0,92–0,95 деңгейіне дейін көтереді.

## Энергия есебі

Тұтынушылар активті энергия (кВт·сағ) үшін төлейді, бірақ ірі кәсіпорындарда реактивті энергия да (квар·сағ) бақыланады.

## Келістіру (matching)

Антенна мен таратқыш, дыбыс күшейткіші мен динамик, индукциялық қыздырғыш — максимал қуат беру шарты бойынша келістіріледі.

## Жабдықты таңдау

Трансформатор мен генератор толық қуат  $S$  бойынша таңдалады:  $\cos \varphi$  төмен болса, сол  $P$  үшін үлкен жабдық қажет.

1

Лездік қуат неліктен екі еселенген жиілікпен тербеледі?

2

Реактивті қуат «пайдасыз» болса да, неге ол желідегі шығынды арттырады?

3

Кешенді қуатты есептегенде неге тоқтың түйіндесі алынады?

4

Толық қуаттар үшін баланс неге орындалмайды, ал активті және реактивті үшін орындалады?

5

Конденсатор батареясын қосқанда жүктеменің өз тогы өзгере ме? Желі тогы ше?

6

Ваттметрдің ток орамын жүктемеге параллель қосса не болады?

7

Максимал қуат беру режимі энергетикада неге тиімсіз?

# Қорытынды



Лездік қуат  $p = ui$  тұрақты құраушыдан ( $P$ ) және екі еселі жиілікті айнымалы құраушыдан тұрады



Активті  $P = UI \cos \varphi$ , реактивті  $Q = UI \sin \varphi$ , толық  $S = UI$  қуаттар үшбұрыш құрайды:  $S^2 = P^2 + Q^2$



Кешенді қуат  $\tilde{S} = \dot{U}\dot{I}^* = P + jQ$ ; активті және реактивті қуаттар балансы бөлек орындалады



Қуат коэффициенті төмендесе, ток пен шығын артады; параллель конденсатор  $\cos \varphi$ -ді жоғарылатады



Максимал қуат  $Z_{\text{н}} = Z_i^*$  кезінде беріледі, бірақ ПЭК тек 50 %

ӘДЕБИЕТ (силлабус бойынша)

[1] Alexander C. K., Sadiku M. N. O. Fundamentals of Electric Circuits, 7th ed. — 455–498 б.