

**Mathematical Problems of Electric Power Systems**

**WEEK 16 - ANALYSIS OF TRANSIENT STABILITY IN  
ELECTRICAL SYSTEMS.**

**Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi**

**Lecturer**

**(Shohin Jurazoda)**

**ТАҲЛИЛИ УСТУВОРИИ ДИНАМИКӢ  
ДАР СИСТЕМАҲОИ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКӢ**

## Мундариҷаи лексия:

1. Масъалаи таҳлили устувории динамикии системаи электроэнергетикӣ.
2. Таҳлили соддакардашудаи устувории динамикӣ, меъёрҳои амалии он.
3. Таҳлили миқдорӣ устувории динамикӣ. Усули фосилаҳои пайдарпай.
4. Адабиёт.

**Масъалаи таҳлили устувории динамикии системаи электроэнергетикӣ.** Ҳангоми пайдоиши халалдоршавиҳои (изтиробҳои) калон дар система (расиши кӯтоҳ (КЗ), хомӯш ё даргирондани борҳои пуриктидор, генераторҳо, трансформаторҳо, ХИБ ва дигар элементҳои СЭЭ) хусусияти раванд аз бузургии халалдоршавиҳо ва макони пайдоиши онҳо вобаста аст ва баррасии масъалаи на устувории статикӣ, балки *динамикӣ* талаб карда мешавад. Дар ин маврид ба инобат гирифтани ғайрихаттӣ будани тавсифҳои асосӣ ( $P = \varphi(\delta)$ ,  $Q = \psi(\delta)$  ва ғайра) зарур аст ва ҳангоми баррасии ҳаракати система параметрҳои инерсионии он, ки суръати тағйирёбии параметрҳои речаро муайян мекунанд, бояд ба ҳисоб гирифта шаванд.

Ҳангоми халалдоршавиҳои калон, ки бо тағйирёбии якбораи реча алоқаманданд, ҚЭХ – и генераторҳо бетағйир наместонанд, чуноне ки бо асоси кофӣ ҳангоми таҳлили устувории статикӣ қабул карда мешуд. Аммо ба инобат гирифтани тағйирёбии ҚЭХ бо мурури замон ҳисобҳоро хеле мураккаб мегардонад ва дар наздикшавии яқум онҳоро метавон ба таври соддакардашуда анҷом дод, бо тасаввур намудани генераторҳо тавассути тавсифҳои квазигузариши иқтидор ҳангоми  $E = E' = \text{const}$ . Он гоҳ, барои системаи оддӣ, ки нақшаи бадалии он дар расми 16.1a оварда шудааст, тавсифи иқтидори генератор аз рӯи принципи гузориш чунин аст:

$$P = E^2 \cdot Y_{11} \cdot \sin \alpha_{11} + E \cdot U \cdot Y_{12} \cdot \sin(\delta - \alpha_{12}), \quad (16.1)$$

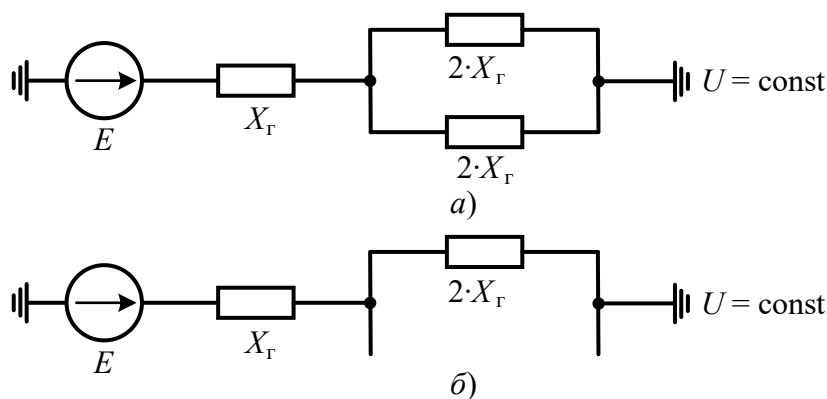
дар ин ҷо,  $Y_{11} = Y_{12} = 1/|Z|$ ;  $Z = j(X_r + 2 \cdot X_n)$ ;  $\alpha_{11} = \alpha_{12} = \pi/2 - \arctg(\text{Im}(Z)/\text{Re}(Z))$ . Азбаски муқовимати фаъоли элементҳои СЭЭ бинобар қимати хурд доштанишон ба инобат гирифта намешавад, пас:

$$P = E \cdot U \cdot Y_{12} \cdot \sin(\delta)$$

ва ё

$$P = \frac{E \cdot U}{x_{12}} \cdot \sin(\delta). \quad (16.2)$$

Моменти электромагнитӣ, ки ба наварди генератор таъсир мерасонад ва хусусияти ҳаракати онро муайян мекунад,  $M = P/\omega$  мебошад. Аммо суръати  $\omega$  дар оғози раванд бинобар инерсияи калони ротор суст тағйир меёбад (100 – 200 град/с) ва тағйирёбии он  $\Delta\omega$  бештар аз 1 – 2 % – и суръати синхронии  $\omega_0$  тағйир намеёбад ( $\omega_0 = 360 \cdot 50 = 18000$  град/с). Аз ин рӯ, қабул кардан мумкин аст, ки  $\omega = \omega_0 + \Delta\omega \approx \omega_0$ , ва ҳангоми сабт бо воҳидҳои нисбӣ (ҳангоми  $\omega_0^* = 1$ ) тағйирёбии моментро ададан ба тағйирёбии иқтидор баробар ҳисоб кардан мумкин аст:  $\Delta M^* = \Delta P$ . Мувофиқан,  $M^* = P^*$ .



**Расми 16.1. Намунаи нақшаи бадалии СЭЭ, ки ҳангоми таҳлили устувори динамикӣ истифода мешавад**

Тағйирёбии якбораи речаи СЭЭ – ро (гузариш аз нақшаи бадалии расми 2.3а ба нақшаи бадалии расми 2.3б), ки дар натиҷаи хомӯшшавии яке аз дузанҷираи ХИБ ба вучуд омадааст, баррасӣ мекунем. Фарз мекунем, ки дар аввал муқовимати фаъол ба инобат гирифта намешавад ва мутобиқи (16.2) тавсифҳои речаро месозем (расми 2.4а).

Ғалаёни назаррас, ки ҳангоми хомӯшшавии яке аз занҷирҳои ХИБ ба вучуд омадааст, ба гузариши система аз реча ба речаи 2 оварда мерасонад. Дар ин маврид, моменти электромагнитӣ дар наварди генератор аз қимати  $M_0^I = M_T$  то  $M_0^{II} \neq M_T$  тағйир меёбад (расми 16.2а). Пайдо шудани нотавозунии байни моменти шитобдиҳандаи турбина ва моменти боздорандаи

электромагнитий генератор  $\Delta M_0 = M_T - M''$  ба он оварда мерасонад, ки генератор суръати худро аз суръати синхронӣ ба миқдори  $\Delta\omega$  зиёд мекунад. Моменти изофии  $\Delta M$  дар ин маврид на танҳо бо моменти электромагнитие, ки ба энергияи электрикии ба шабака додашавандаи генератор мувофиқ аст, балки бо моменте, ки ба энергияи кинетикии дар ротор чамъшаванда ҷавобгӯ аст ва аз рӯи интегралҳои зарин муайян карда мешавад:

$$\int \Delta M d\delta = A.$$

Муодилаи ҳаракати генератор дар ҳолати соддатарин (бе назардошти печайи демпфирӣ (оромсоз) ва таъсири танзимкунандаҳо) намуди зеринро дорад:

$$\Delta M = M_T - M'' = T_J \cdot \frac{d\Delta\omega}{dt}.$$

дар ин ҷо,  $T_J$  – зарибест, ки инерсияи ротори генераторро тавсиф мекунад (*доимии инерсия*);  $d\Delta\omega/dt = d^2\delta/dt^2 = a$  – шитоби ротор;  $\delta$  – кунҷи лағжиши ҚЭҲ – и генератор нисбат ба меҳваре, ки бо суръати кунҷии  $\omega_0$  давр мезанад. Моменти  $M$  дар ҳолати умумӣ функсияи суръат мебошад ва ҳангоми тағйирёбии реҷаи система тағйир меёбад:

$$M'' = f(\delta, \Delta\omega).$$

Дар ҳолати соддатарин фарз карда мешавад, ки  $M'' = M''_m \cdot \sin\delta$  (графикҳои мувофиқ дар расми 16.2а оварда шудааст). Он гоҳ муодилаи ҳаракати ротори генераторро дар шакли зерин навиштан мумкин аст:

$$T_J \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = \Delta M, \quad (16.3)$$

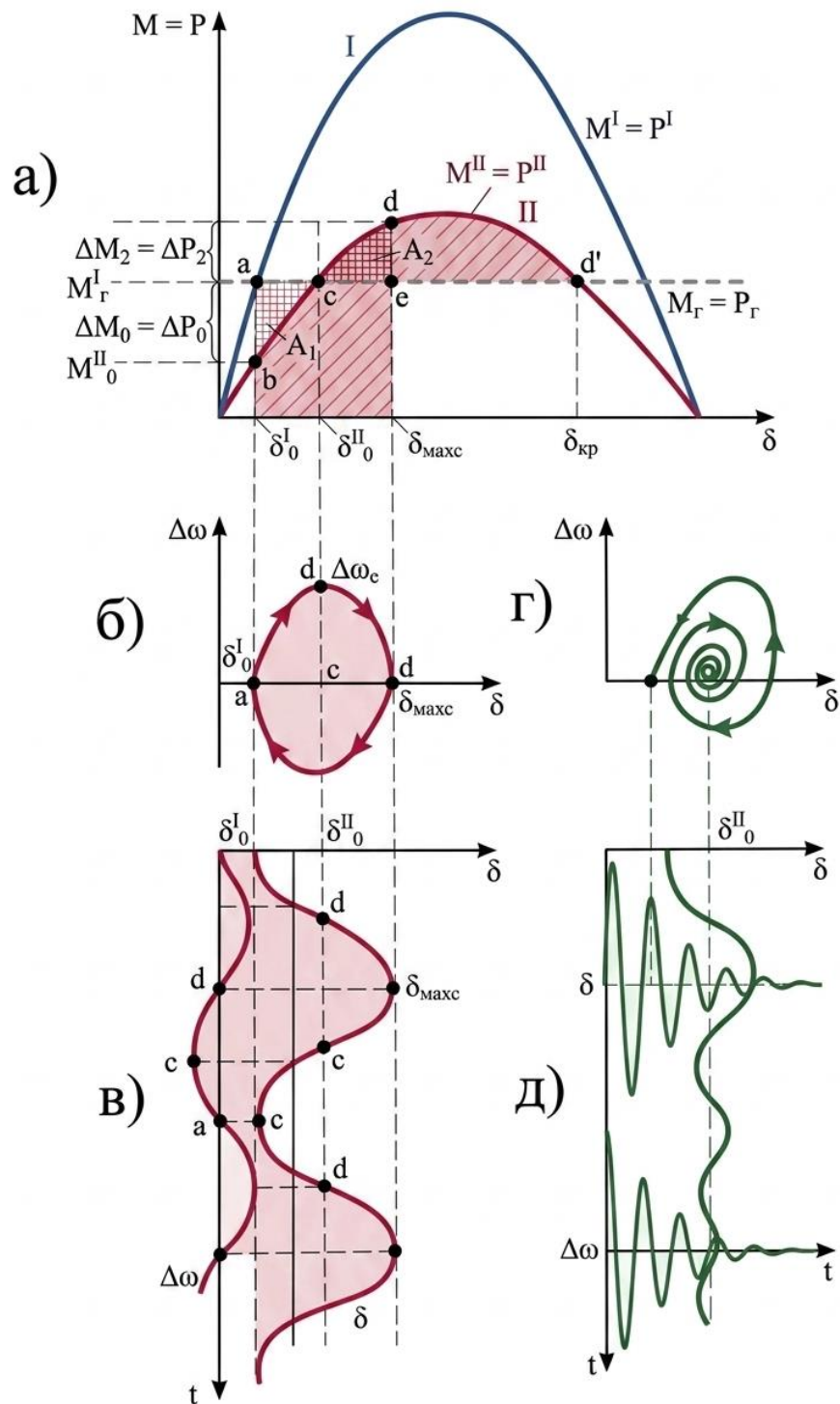
ва ё агар қабул кунем, ки  $M = P$ , пас:

$$T_J \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = \Delta P. \quad (16.4)$$

дар ин ҷо,

$$\Delta M = M_0 - M''_m \cdot \sin\delta, \quad (16.5)$$

$$\Delta P = P_0 - P''_m \cdot \sin\delta, \quad (16.6)$$



Расми 16.2. Рафтори СЭЭ – содатарин хангоми тағйирёбии параметрҳои

ОН

Ҳамин тавр, ҳама гуна тағйиротҳои ибтидоии речаи СЭЭ ба тағйирёбии кунҷҳои  $\delta_0$ , иқтидорҳои  $P_0$  ва амплитудаҳои  $P_m$  – и тавсифҳои иқтидори генераторҳои ба он дохилшаванда оварда мерасонанд. Масъалаи таҳлили

устувории динамикии система ба муайян кардани функцияҳои вобаста ба вақт тағйирёбии суръати  $\Delta\omega$  ва кунчи  $\delta$  – и генераторҳо, ки дар натиҷаи ғалаён ба амал меоянд, оварда мерасонад.

**Таҳлили содакардашудаи устувории динамикӣ, меъёрҳои амалии он.** Барои мисоли баррасишаванда, функцияҳои вақтии  $\Delta\omega(t)$  ва  $\delta(t)$  – ро бо роҳи интегралгирии (16.4) муайян кардан мумкин аст. Аз рӯи намуди онҳо хулоса баровардан мумкин аст, ки оё система пас аз халалдоршавии якбора ва гузариши минбаъда аз як реча ба речаи дигар кори синхрониро нигоҳ медорад ё не (расми 16.2в, з). Ҳатто дар ҳолати соддатарин, интегралҳои муодилаи (16.4), яъне вобастагии  $\delta = f(t)$ , тавассути вариантҳои охирноки бузургҳои маълуми трансцендентӣ (бузургҳои трансцендентӣ гуфта, бузургҳои меноманд, ки алгебравӣ набуда, одатан дараҷавӣ, логарифмӣ, тригонометрӣ ва ғайраҳо) ифода намеебад.

Ҳамин тариқ, интегралгирии муодилаҳои намуди (16.4) дар ҳолати умумӣ хеле душвор аст. Зуд-зуд иҷрои он танҳо бо усулҳои тақрибӣ муяссар мегардад. Баъзан МД – и СЭЭ – ро (устувории динамикии системаҳои электроэнергетикӣ) метавон ба таври умумӣ, бе муайян кардани намуди ҳаракат дар вақт, аз рӯи таносуби тағйироти имконпазири энергия дар фазаҳои гуногуни ҳаракат – бо ёрии ба ном усули масоҳатҳо [1], ки дар расми 16.2 инъикос ёфтааст, санҷидан мумкин аст.

Тавре ки қаблан қайд карда будем, гузариш аз тавсифи тавоноии электрикии  $I$  ба  $II$  ба пайдо шудани номувозинатии моменти  $\Delta M$  оварда мерасонад, ки ин боиси чархзании нисбии ротори генератор мегардад. Бузургии  $\Delta M$  дар ҳолати умумӣ аз мавқеи кунҷии ротор, яъне параметри  $\delta$  вобаста аст. Фарз мекунем, ки ҳаракати ротори генератор танҳо таҳти таъсири моментҳои чархзанандае, ки аз мавқеи он вобастаанд, сураг мегирад.

Аз курси механикаи назариявӣ маълум аст, ки ҳангоми ҳаракати нуқтаи материалии  $x$  бо массаи  $m$  ва суръати  $v$  таҳти таъсири қувваи  $F$ , ки аз мавқеи нуқта вобаста аст, кор иҷро мешавад, ки он ҳамчун афзоиши энергияи кинетикӣ дар роҳи тайшуда муайян карда мешавад. Ҳамин тариқ, ҳангоми

ҳаракат аз нуқтаи  $b_1$  то нуқтаи  $b_2$  бо суръати ибтидоии баробари сифр, чунин муайян карда мешавад:

$$\frac{m \cdot v^2}{2} = \int_{b_1}^{b_2} F dx = A. \quad (16.7)$$

Мувофиқи графики расми 16.2  $F = f(x)$  бо масоҳате тасвир меёбад, ки ба энергияи кинетикии аз ҷониби ҷисми ҳаракаткунанда ҳангоми тағйири суръат захирашуда мутаносиб аст.

Дар асоси ин маълумот барои системаи баррасишаванда (расми 16.1) ва ба назар гирифтани тағйироти суръати генератор нисбат ба суръати синхронии тағйирнаёбандаи  $\omega_0$ , метавон дар асоси ифодаи (16.7) чунин навишт:

$$A_1 = \int_{\delta_0^I}^{\delta_0^{II}} \Delta M d\delta = \frac{T_J \cdot \Delta \omega^2}{2}. \quad (16.7)$$

Бузургии  $A_1$  бо масоҳати  $abca$  дар расми 16.2a муайян карда мешавад.

Мувофиқи (16.7), суръати кӯчиши нисбии ротор вобаста аз  $\delta$  бо ифодаи зерин муайян карда мешавад:

$$\Delta \omega = \sqrt{\frac{2}{T_J} \cdot \int_{\delta} \Delta P d\delta}. \quad (16.8)$$

Тағйирёбии  $\Delta \omega = f(\delta)$  дар расми 16.2б, инчунин функцияҳои  $\delta = f(t)$  ва  $\Delta \omega = \psi(t)$  дар расми 16.2в нишон дода шудаанд.

Ҳамин тавр, энергияи захирашудаи ротор дар раванди шитоб (тезшавӣ)

аз нуқтаи назари математикӣ ҳамчун интеграл  $\int_{\delta_0^I}^{\delta_0^{II}} \Delta P d\delta$  ифода ёфта, ба таври

графикӣ дар шакли масоҳати  $A_1$  дар расми 16.2a нишон дода шудааст. Ба ҳамин

монанд, энергияи сустшавӣ бо интеграл  $\int_{\delta_0^{II}}^{\delta_{\max}} \Delta P d\delta$  ва масоҳати  $A_2$  тавсиф

карда мешавад. Масоҳатҳои  $A_2$  ва  $A_1$  мувофиқан масоҳатҳои шитоб ва сустшавӣ номида мешаванд ва қоидаи масоҳатҳо дар шакли умумӣ чунин ифода меёбад:

$$A_1 = A_2 \quad (16.9)$$

ва ё:

$$\int_{\delta} \Delta P d\delta. \quad (16.10)$$

Ин таносуб соддатарин меъёри амалии УДУ (*устувори динамикӣ система*) мебошад [1, 2].

Нуқтаи  $d'$  дар расми 16.2a ба ҳолати бухронӣ мувофиқат мекунад, ки дар он генератор дар *мувозинати ноустувор* қарор дорад, зеро ҳалалдоршавӣ, ки боиси пайдо шудани моменти шитобдиҳанда мегарданд, ба афзоиши прогрессивии кунчи  $\delta$  ва аз синхронизм баромадани генератор оварда мерасонанд. Баръакс, пайдо шудани моменти тормоздиҳанда боиси ба нуқтаи мувозинати устувори  $c$  кӯчидани речаи генератор мегардад.

**Таҳлили миқдории устувори динамикӣ. Усули фосилаҳои пайдарпай.** Тавре ки қаблан қайд карда шуд, тадқиқи устувори динамикӣ (УД) бо усули масоҳатҳо дар бораи равандҳо, ки дар СЭЭ ба амал меоянд, тасаввуроти пурра намедиҳад, зеро он имкон намедиҳад, ки вобастагии кунчи  $\delta = f(t)$  ва тавоноии электрикӣ  $P = \varphi(t)$  муайян карда шавад. Барои муайян кардани функсияи  $\delta$  ҳал кардани муодилаи дифференсиалии (МД) ҳаракати нисбии ротори генератор зарур аст. Дар мисоли дар боло баррасишуда чунин муодила (16.5) мебошад.

Дар умум, ба вазифаи таҳлили дақиқи миқдории УД инҳо дохил мешаванд [1]:

- таҳлили хусусияти раванд ва ҳисоби ҳама ё як қисми параметрҳои реча, ҳангоми гузариш аз як реча ба речаи дигар;

- ҳисоби гузариши динамикӣ ба речаи муқарраршудаи (РМ) нав, ки ҳангоми хомӯшшавии тасодуфӣ ё садамавии як қисми элементҳои система ба амал меояд;

- муайян кардани тағйироти ҷараён, басомад ва дигар параметрҳои речаи гузаранда (РГ), ки дар натиҷаи ҳалалдоршавии калон ба вучуд омадаанд.

Барои тадқиқи миқдории РГ усулҳои интегралгирии ададии системаи МД, ки СЭЭ – ро дар РГ тавсиф мекунанд, истифода мешаванд ва яке аз вариантҳои соддакардашудаи онҳо *усули фосилаҳои пайдарпай* (УФП) мебошад. Ин усули умумитарини таҳлили амалии устувории динамикӣ мебошад.

Истифодаи УФП – ро дар мисоли тадқиқи УД – и нақшаи бадалии СЭЭ – и соддатарин (расми 16.1) баррасӣ мекунем. Бе маҳдудияти ягон шарт нисбат ба ифодаи моментҳои турбина  $M_T$  ва генератор  $M$ , ки метавонанд на танҳо аз тағйирёбии кунҷи  $\delta$  вобаста мебошанд. Ба ҷои муодилаи (16.5) чунин менависем:

$$\alpha = \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{360 \cdot f_0 \cdot \Delta P}{T_J}. \quad (16.11)$$

Дар ин ҳолат ҳисоб карда мешавад, ки суръати ҳаракати нисбии ротор нисбат ба суръати синхронӣ хеле хурд аст, бинобар ин ба таври содда қабул карда мешавад, ки тавоноӣ аз рӯи миқдор ба момент баробар аст. Дар ин ҳолат вақт ва кунҷ бо воҳидҳои номдор ифода ёфтаанд:  $[t] = [T_J] = \text{с}$ ,  $[\delta] = \text{град.}$ ; пас  $[\alpha] = \text{град/с}^2$ ,  $[f_0] = \text{Гц}$ . Қимати тавоноӣ ба муодилаи (16.11) бо воҳидҳои нисбӣ ( $\Delta P = \Delta M$ ) гузошта мешавад.

Ҳамин тавр, дар фосилаи аввал суръати аввалия ба сифр баробар аст ва ҳангоми шитоби доимии  $\alpha_0$  тағйирёбии кунҷ мувофиқи қонуни ҳаракати мунтазами шитобдор ба амал меояд. Афзоиши кунҷ то охири фосила аз рӯи формулаи зерин муайян карда мешавад:

$$\Delta\delta_{(1)} = 0,5 \cdot \alpha_{(0)} \cdot \Delta t^2 = 0,5 \cdot 360 \cdot f_0 \cdot \left(\Delta P_{(0)} / T_J\right) \cdot \Delta t^2. \quad (16.12)$$

Иқтидор ва афзоиши он  $\Delta P$  ҳангоми тағйирёбии кунҷ ва вақт тағйир меёбанд. Тағйирёбии вақтро ба андозаи  $\Delta t$  ва кунҷро ба андозаи  $\delta_{(1)}$  дониста, иқтидори номувозинатиро  $\Delta P_{(1)}$  – ро дар охири фосилаи аввал ва дар аввали фосилаи дуюм муайян кардан мумкин аст.

Вобаста ба афзоиши иқтидор шитобро низ муайян кардан мумкин аст:

$$\alpha_{(1)} = \left(\Delta P_{(1)} / T_J\right) \cdot 360 \cdot f_0.$$

Ҳамин тавр, афзоиши кунчи  $\delta_{(n)}$  ва шитобро ( $\alpha_{(n)}$ ) дар дилхоҳ фосилаи  $n$  муайян кнмудан мумкин аст, то замоне ки шарти  $\delta_{(n)} > \delta_{\text{хом.}}$  иҷро нашавад. Дар инҷо,  $\delta_{\text{хом.}}$  – кунчи хомушқунии қисми садамавии СЭЭ – и таҳқиқшаванда мебошад. Кунчи хомушқунии қисми садамавии СЭЭ – ро доништа, вақти хомушқунии қисми садамавии СЭЭ – ро ( $t_{\text{хом.}}$ ) муайян кардан мумкин аст.

**Масъалаи 16.1.** Шартҳои аввалияи мисол: басомади номиналӣ:  $f_0 = 50$  Гц; доимии инерсияи агрегат:  $T_J = 8$  с; фосилаи вақт (қадами ҳисоб):  $\Delta t = 0,05$  с; тавоноии механикии турбина:  $P_{\text{мех}} = 1,0$  в.н.; тавсифи тавоноии электрикӣ дар режими авариявӣ:  $P_{\text{эл}} = 0,4 \cdot \sin \delta$ ; кунчи ибтидоии ротор дар лаҳзаи  $t = 0$  будан:  $\delta_0 = 30^\circ$ .

**Ҳал.**

1. Иқтидори номувозинатӣ:

$$\Delta P_{(n)} = \Delta P_{\text{мех.}} - \Delta P_{\text{эл.}(n)}.$$

2. Афзоиши кунҷ дар фосилаи аввал ( $n = 1$ ):

$$\Delta \delta_{(1)} = 0,5 \cdot \frac{360 \cdot f_0}{T_J} \cdot \Delta P_{(0)} \cdot \Delta t^2.$$

3. Афзоиши кунҷ дар фосилаҳои минбаъда ( $n \geq 2$ ):

$$\Delta \delta_{(n)} = \Delta \delta_{(n-1)} + \frac{360 \cdot f_0}{T_J} \cdot \Delta P_{(n-1)} \cdot \Delta t^2.$$

4. Қимати кунҷ дар охири фосила:

$$\Delta \delta_{(n)} = \delta_{(n-1)} + \Delta \delta_{(n)}.$$

Барои осон намудани ҳисобҳои минбаъда, аввал зарбии доимии  $k$  – ро меёбем:

$$k = \frac{360 \cdot f_0}{T_J} \cdot \Delta t^2 = \frac{360 \cdot 50}{8} \cdot 0,05^2 = 5,625.$$

Раванди ҳисобкунӣ қадам ба қадам:

*Қадами ибтидоӣ (0):* лаҳзаи ибтидоӣ ( $t = 0$ ):

Иқтидори электрикӣ:

$$P_{\text{эл.}(0)} = 0,4 \cdot \sin(30^\circ) = 0,2 \text{ в.н.}$$

Иқтидори номувозинатӣ:

$$P_{\text{эл.}(0)} = 1,0 - 0,2 = 0,8 \text{ в.н.}$$

Қадами 1: Фосилаи аввал ( $t = 0; \dots, 0,05$  с).

Афзоиши кунҷ:

$$\Delta\delta_{(1)} = 0,5 \cdot k \cdot \Delta P_{(0)} = 0,5 \cdot 5,625 \cdot 0,8 = 2,25^\circ.$$

Кунҷ дар охири фосилаи аввал ( $t = 0,05$  с):

$$\delta_{(1)} = \delta_{(0)} + \Delta\delta_{(1)} = 30^\circ + 2,25^\circ = 32,25^\circ.$$

Қадами 2: Фосилаи аввал ( $t = 0,05; \dots, 0,1$  с).

Тавоноии электрикии нав дар кунҷи  $\delta_{(1)} = 32,25^\circ$

$$P_{\text{эл.}(1)} = 0,4 \cdot \sin(32,25^\circ) = 0,2134 \text{ в.н.}$$

Иқтидори номувозинатӣ:

$$\Delta P_{(1)} = 1,0 - 0,2134 = 0,7866 \text{ в.н.}$$

Афзоиши кунҷ:

$$\Delta\delta_{(2)} = \Delta\delta_{(1)} + k \cdot \Delta P_{(1)} = 2,25^\circ + 5,625 \cdot 0,7866 = 6,675^\circ.$$

Кунҷ дар охири фосилаи аввал ( $t = 0,1$  с):

$$\delta_{(2)} = \delta_{(1)} + \Delta\delta_{(2)} = 32,25^\circ + 6,675^\circ = 38,925^\circ.$$

Натиҷаҳои ҳисобро дар ҷадвали 16.1 менависем.

Ҷадвали 16.1. Натиҷаҳои ҳисоб бо ёрии усули фосилаҳои пайдарпай

$n$	$t$ , с	$\delta$ , град	$\sin\delta$	$P_{\text{эл.}}$ , в.н.	$\Delta P$ , в.н.	$\Delta\delta$ , град
0	0	30,000	0,5000	0,2000	0,8000	—
1	0,05	32,250	0,5336	0,2134	0,7866	2,250
2	0,10	38,925	—	—	—	6,675

**Хулоса.** Ҳисобкунӣ ба ҳамин тартиб барои фосилаҳои сеюм, чорум ва минбаъда давом дода мешавад, то даме ки вобастагии пурраи кунҷ аз вақт  $\delta = f(t)$  сохта шавад. Ин ба муҳандисон имкон медиҳад, ки устувории динамикии СЭЭ – ро дақиқ баҳодихӣ кунанд.

## Адабиёт

1. Веников В.А. Математические задачи электроэнергетики: Учебник для студентов вузов / В.А. Веников, Э.Н. Зуев, И.В. Литкенс и др., под ред. В.А. Веникова – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1981. – 288 с.

2. Филяев К.Ю. Математические задачи энергетики: Учебно-методический комплекс / К.Ю. Филяев – Челябинск: 2005. – 212 с.