Mathematical Problems of Electric Power Systems

WEEK 15 - MATHEMATICAL TOOLS FOR STEADY-STATE STABILITY ANALYSIS.

Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi

Lecturer

(Shohin Jurazoda)

ВОСИТАҲОИ МАТЕМАТИКӢ БАРОИ ТАҲЛИЛИ УСТУВОРИИ СТАТИКӢ

Мундаричаи лексия:

1. Усули наздикшавии аввалини Ляпунов.
2. Меъёрҳои амалии устуворӣ
3. Ҳалли масъала
4. Адабиёт.

Усули наздикшавии аввалини Ляпунов. Қонунияти ҳисоби устувории системаҳои ғайрихаттӣ вобаста решаҳои муодилаҳои дифференсиалии хаттӣ аз тарафи риёзидони рус А.М. Ляпунов асоснок кардааст. Вай соли 1893 «усули наздикшавии аввалин» – ро пешниҳод кард, ки барои таҳқиқи мукаммали муодилаҳои хаттикардашудаи система пешбинӣ шудааст. Ин усул ду теоремаро дар бар мегирад:

Теоремаи 1. Ҳангоми мавҷуд будани решаҳои муодилаи тавсифӣ (МТ) танҳо бо қисмҳои ҳақиқии манфӣ, ҳаракати бетаъсир *устувор* ва асимптотикӣ мебошад, новобаста аз он ки функсияҳои ғайрихаттӣ дар қисми рости муодила чӣ гунаанд.

Ҳаракати система *бетаъсир* номида мешавад, агар ҳаракат зери таъсири қувваи беруна ва вобаста ба қонуни ҳаракати додашуда бошад.

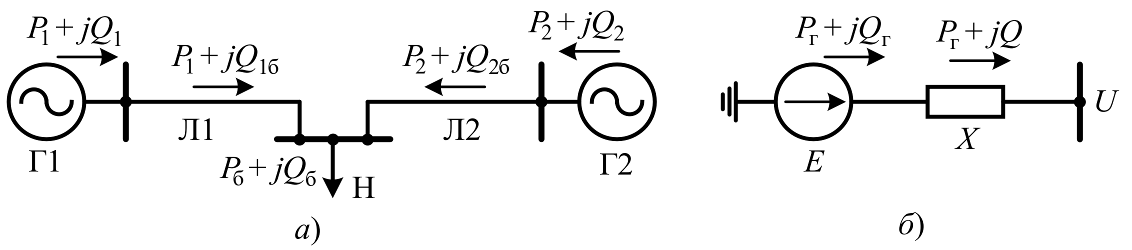
Теоремаи 2. Агар дар байни решаҳои МТ решаҳое бо қисмҳои ҳақиқии мусбат мавҷуд бошанд, пас ҳаракати бетаъсир *ноустувор* аст.

Агар МТ решаҳои бо қисми ҳақиқии мусбат надошта бошад, вале ҳадди ақал як реша бо қисми ҳақиқии сифрӣ дошта бошад, пас решаҳои системаи хаттишуда дар бораи устувории системаи аслӣ хулоса баровардан ғайриимкон аст ва таҳқиқоти иловагиро талаб карда мекунад.

Меъёрҳои амалии устуворӣ. Барои муайян кардани шартҳои пайдоиши лағжиш, таҳлили таносубҳое, ки реҷаи муътадили системаро тавсиф мекунанд, зарур аст.

Масалан, барои тасвири дар расми 15.1*а* овардашуда, муодилаҳоро бо системаи зерин тавсиф кардан мумкин аст:

$$
\begin{cases}
P_1 = \varphi_1(\delta_1, U, \omega); \\
Q_1 = \psi_1(\delta_1, U, \omega); \\
P_2 = \varphi_2(\delta_2, U, \omega); \\
Q_2 = \psi_2(\delta_2, U, \omega); \\
P_б = \varphi(U, \omega); \\
Q_б = \psi(U, \omega).
\end{cases}
\tag{15.1}
$$



Расми 15.1

Системаи муодилаҳои (15.1) тавсифи статикии системаро нишон медиҳанд.

Сабабҳои тағйирёбии реҷа метавонад ба тағйирёбии иқтидори яке аз турбинаҳо, тағйирёбии иқтидори фаъол ва ғайрифаъоли бор ва ё тағйирёбии якҷояи ин параметрҳо оварда расонад. Тағйирёбии парметҳои ΔP_1, ΔP_2, $\Delta P_б$, $\Delta P_б$ – ро ғалаёнҳо (изтиробҳо) ва $\Delta\delta_1$, $\Delta\delta_2$, ΔU, $\Delta\omega$ – ро бошад, тағйирёбии (майлкунии) параметрҳои реҷа меноманд.

Ҳангоми тағйирёбии хеле хурд ва сусти реҷа, иқтидор ва момент, ки бо воҳидҳои нисбӣ ифода ёфтаанд, баробар қабул карда мешаванд: $P_* = P/P_{баз} = M/M_{баз} = M_*$, зеро $P_* = \omega_{*0} \cdot M_*$ мебошад, ки дар ин ҷо $\omega_{*0} \approx 1$ аст. Аммо таъсири вобастагии иқтидор аз басомад (тавсифи статикии) ба инобат гирифта мешавад. Бо назардошти ин, системаи ду муодилаи моментҳоро дар тирҳои (валҳои) генераторҳо ва ду муодилаи тавозуни иқтидорро ҳангоми тағйирёбии реҷа менависем.

Ҳамин тавр, системаи муодилаҳо, ки дар он ба сифати номуайяниҳо тағйирёбии параметрҳои реҷаи ЭЭС гирифта мешаванд, намуди зерин дорад:

$$
\begin{cases}
\dfrac{\partial P_1}{\partial \delta_1}\cdot\Delta\delta_1 + 0 + \dfrac{\partial P_1}{\partial U}\cdot\Delta U + \left(\dfrac{\partial P_1}{\partial \omega} - \dfrac{\partial P_{\text{т}1}}{\partial \omega}\right)\cdot\Delta\omega = \Delta P_1;\\
0 + \dfrac{\partial P_2}{\partial \delta_2}\cdot\Delta\delta_2 + \dfrac{\partial P_2}{\partial U}\cdot\Delta U + \left(\dfrac{\partial P_2}{\partial \omega} - \dfrac{\partial P_{\text{т}2}}{\partial \omega}\right)\cdot\Delta\omega = \Delta P_2;\\
\dfrac{\partial P_1}{\partial \delta_1}\cdot\Delta\delta_1 + \dfrac{\partial P_2}{\partial U}\cdot\Delta\delta_2 + \left(\dfrac{\partial P_1}{\partial U} + \dfrac{\partial P_2}{\partial U} - \dfrac{\partial P_{\text{б}}}{\partial U}\right)\cdot\Delta U +\\
+\left(\dfrac{\partial P_1}{\partial \omega} + \dfrac{\partial P_2}{\partial \omega} - \dfrac{\partial P_{\text{б}}}{\partial \omega}\right)\cdot\Delta\omega = \Delta P_{\text{б}};\\
\dfrac{\partial Q_{1\text{б}}}{\partial \delta_1}\cdot\Delta\delta_1 + \dfrac{\partial Q_{2\text{б}}}{\partial U}\cdot\Delta\delta_2 + \left(\dfrac{\partial Q_{1\text{б}}}{\partial U} + \dfrac{\partial Q_{2\text{б}}}{\partial U} - \dfrac{\partial Q_{\text{б}}}{\partial U}\right)\cdot\Delta U +;\\
+\left(\dfrac{\partial Q_{1\text{б}}}{\partial \omega} + \dfrac{\partial Q_{2\text{б}}}{\partial \omega} - \dfrac{\partial Q_{\text{б}}}{\partial \omega}\right)\cdot\Delta\omega = \Delta Q_{\text{б}}.
\end{cases}
\qquad (15.2)
$$

Муодилаҳои якум ва дуюм мувофиқан ба нерӯгоҳҳои 1 ва 2, ва ду муодилаи охирин ба бор тааллуқ доранд.

Дар ин ҷо қиматҳои ҳосилаҳои хусусӣ, ки ҳамчун зарибҳо ҳангоми тағйирёбии параметрҳои реҷа баромад мекунанд, на ҳаракати система, балки танҳо майли онро ба ин ҳаракат тавсиф мекунанд. Онҳо ҳангоми инҳирофоти хурди ин параметрҳо ҳамчун бузургиҳои доимӣ баррасӣ карда мешаванд. Ҳангоми маълум будани тағйирёбиҳои маълуми ΔP_1, ΔP_2, $\Delta P_{\text{б}}$, $\Delta Q_{\text{б}}$ аз ҳалли муодилаҳои (14.2) – (14.5) ба осонӣ тағйироти параметрҳои реҷаи $\Delta\delta_1$, $\Delta\delta_2$, ΔU, $\Delta\omega$ – ро ёфтан мумкин аст:

$$
\Delta\delta_1 = \frac{1}{D}\cdot\left(M_{11}\cdot\Delta P_1 + M_{12}\cdot\Delta P_2 + M_{13}\cdot\Delta P_{\text{б}} + M_{14}\cdot\Delta Q_{\text{б}}\right)
$$

ва ҳоказо. Дар ин ҷо, M_{11}, ..., M_{14} – минорҳои мувофиқ; D – муайянкунандаи асосии системаи муодилаҳо мебошанд.

Ба сифр баробар будани детерминанти D ҳангоми ба сифр баробар набудани минорҳо маънои онро дорад, ки ҳама гуна тағйирёбии хеле хурд метавонад боиси тағйироти бениҳоят калони параметрҳои реҷаро ба вуҷуд орад, яъне онҳо ба таври худкор аз қиматҳои ибтидоӣ дур мешаванд. Ҳамин тавр, меъёре, ки реҷаи бухрониро (критикиро) нишон медиҳад, баробарии зерин аст:

$$D = 0. \tag{15.3}$$

Бо назардошти гуфтаҳои амалии дар боло зикр шада, ин ё он параметрҳои реҷаро доимӣ қабул карда, аз шартҳои (14.5) ва (14.6) ба истилоҳ меъёрҳои амалии устувориро (МАУ) ба даст овардан мумкин аст[1, 2]:

1. Меъёри устувории генераторҳо.

Ҳангоми доимӣ будани басомад дар система ($\Delta\omega = 0$), шиддат дар нуқтаи гиреҳӣ ($\Delta U = 0$) ва иқтидори турбинаҳо ($P_{т1}$, $P_{т2}$ = const) реҷаи бухронӣ аз рӯи устуворӣ дар ҳолати зерин фаро мерасад:

$$\frac{dP_i}{d\delta_i} = 0, \tag{15.4}$$

дар ин ҷо, $i = 1, 2, ...$ аст.

2. Меъёри устувории бор.

Ҳангоми $\Delta\omega = 0$ будан ва нигоҳ доштани тавозуни иқтидори фаъол дар гиреҳи бор шарти реҷаи бухронӣ аз рӯи устуворӣ чунин аст:

$$\frac{d\Delta Q}{dU} = 0, \tag{15.5}$$

дар ин ҷо, $\Delta Q = Q_б - (Q_{1б} + Q_{2б})$.

Дар расми 15.2 диаграммаи вектории реҷаи СЭЭ оварда шудааст, ки ба нақшаи бадалии эквивалентӣ, ки дар расми 15.1*б* нишон дода шудааст, мувофиқат мекунад. Мувофиқи ин диаграмма дидан мумкин аст, ки $U = (E - Q{\cdot}X/E)/\cos\delta$. Бинобар ин, ҳангоми $\delta = 90^o$ (дар ҳудуди устуворӣ) $dU/dE = 1/\cos^2 \to \infty$ ва ё:

$$\frac{dE}{dU} = 0. \tag{15.6}$$

Меъёри (2.5) ва ё (2.6) – ро *меъёри устувории бор* меноманд, зеро ҳангоми кори генераторҳо $\delta < 90^o$ (яъне $\partial P_г/\partial\delta \neq 0$) $\partial P_г/\partial U \neq 0$ хурдтарин тағйирёбии иқтидори реактивии бор $\Delta Q_б$ метавонад ба тағйирёбии бениҳояти калони шиддат дар нуқтаи гиреҳии ΔU оварда расонад. Яъне ноустувории система ҳамчун ноустувории бор зоҳир мегардад.

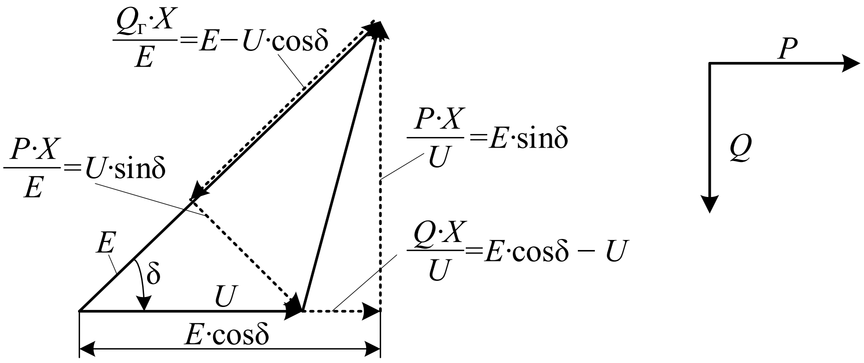
Бо фарзияи он, ки бори Б ба шинаҳои шиддати мустақил (ки аз реҷа вобаста нест) пайваст мебошад ва ягона тағйирёбанда метавонад тағйирёбии суръати кунҷии муҳаррикҳои бор бошад, МАУ муҳаррикҳои бор муайян карда мешавад:

$$\frac{dP}{d\omega} = 0. \tag{15.6}$$

ва ё барои муҳаррикҳои асинхронӣ, ки дар онҳо $\omega = d\delta/dt = s$ мебошад, пас:

$$\frac{dP}{ds} = 0. \tag{15.7}$$

МАУ-ҳои баррасишуда дар шакли муайян дар ҳолатҳои маъмулии татбиқи онҳо дар [1] оварда шудаанд.



Расми 15.2

Шаклҳои дигари сабти МАУ – ро ҳангоми тағйир додани шакли сабти системаи муодилаҳои реҷаи ибтидоӣ ва қабул кардани дигар фарзияҳо ва маҳдудиятҳо низ ба даст овардан мумкин аст,. Масалан, сарбории СЭЭ – ро ҳамчун муқовимати бетағйир тасаввур кардан мумкин аст. Дар ин сурат иқтидоре, ки аз ҷониби ҳар як генератор дода мешавад, аз кунҷи мутақобилаи $\delta_{12} = \delta_1 - \delta_2$ ва тавсифҳои басомадии $P_i = \mathrm{f}(\delta_{12}, \omega_1, \omega_2)$, i = 1, 2 вобаста хоҳад буд. Дар ин ҳолат системаи (2.1) намуди зеринро мегирад:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \Delta\omega}{\partial \delta_{12}} \cdot \Delta\delta_{12} - \Delta\omega_1 + \Delta\omega_2 = 0; \\ \dfrac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} \cdot \Delta\delta_{12} + \dfrac{\partial P_1}{\partial \omega_1} \cdot \Delta\omega_1 + \dfrac{\partial P_1}{\partial \omega_2} \cdot \Delta\omega_2 = \Delta P_1; \\ \dfrac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}} \cdot \Delta\delta_{12} + \dfrac{\partial P_2}{\partial \omega_1} \cdot \Delta\omega_1 + \dfrac{\partial P_2}{\partial \omega_2} \cdot \Delta\omega_2 = \Delta P_2. \end{cases} \tag{15.8}$$

Барои ба инобат нагирифтани шакли ғайрисинусоидалии шиддат, тафовути суръатҳоро $\Delta\omega = \Delta\omega_1 - \Delta\omega_2 \approx 0$ қабул мекунем. Он гоҳ муайянкунандаи системаи (15.3) чунин мешавад:

$$D = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 1 \\ \dfrac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} & \dfrac{\partial P_1}{\partial \omega_1} & \dfrac{\partial P_1}{\partial \omega_2} \\ \dfrac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}} & \dfrac{\partial P_2}{\partial \omega_1} & \dfrac{\partial P_2}{\partial \omega_2} \end{vmatrix}, \tag{15.9}$$

ва шарти фарорасии реҷаи буҳронии ду нерӯгоҳ, ки дар асоси шартҳои (14.5) ва (14.6) муайян шудааст, намуди зеринро дорад:

$$\frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} \cdot \left(\frac{\partial P_2}{\partial \omega_2} + \frac{\partial P_2}{\partial \omega_1} \right) - \frac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}} \cdot \left(\frac{\partial P_1}{\partial \omega_1} + \frac{\partial P_1}{\partial \omega_2} \right) \cdot \Delta\omega = 0 \tag{15.10}$$

Агар дар система басомади ягонаи $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ вуҷуд дошта бошад, он гоҳ реҷаи буҳронӣ ҳангоми ба сифр баробар шудани *муайянкунандаи моментҳои изофӣ* фаро мерасад:

$$D_{\text{ми}} = \begin{vmatrix} \dfrac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} & \dfrac{\partial P_1}{\partial \omega} \\ \dfrac{\partial P_2}{\partial \delta_{12}} & \dfrac{\partial P_2}{\partial \omega} \end{vmatrix}. \tag{15.11}$$

Тарзи ҳисоби баррасишуда нисбат ба таҳлили устувории СЭЭ *тақрибӣ* ва ё тахминӣ мебошад, зеро он танҳо тамоюли системаро ба ноустуворӣ бидуни назардошти хусусияти ҳаракат ошкор мекунад. Меъёрҳои амалӣ танҳо эҳтимолияти лағжиши реҷаро ва ё ба ибораи дигар, *ноустувории ғайридавриро* ошкор намуда, *ноустувории лапишдорро* (*худҷунбишро*) ошкор намекунанд.

Масъалаи 15.1. Генератори синхронӣ тавассути хати интиқоли барқ (ХИБ) ба шинаҳои шиддати доимӣ (системаи иқтидораш беохир) кор мекунад. Параметрҳои реҷа ва занҷир чунинанд: ҚЭҲ – и генератор $E_\Gamma = 1{,}2$ в.н.; шиддат шинаҳои система $U_C = 1{,}0$ в.н.; муқовимати умумии индуктивии система (генератор, трансформатор ва ХИБ) $x_\Sigma = 0{,}6$ в.н.; иқтидори фаъоли интиқолшаванда $P_0 = 1{,}0$ в.н. Иқтидори ҳаддии неругоҳ (P_{max}), ки ба система интиқол медиҳад; кунҷи ибтидоии реҷа (δ_0); зариби захираи устувории статикӣ ($K_з$) аз рӯи иқтидор.

Ҳал.

1. Иқтидори ҳаддии неругоҳро (P_{max}) вобаста ба тавсифи кунҷии иқтидори фаъоли генератор бо ёрии формулаи зерин ифода меёбем:

$$P = \frac{E_Г \cdot U_С}{x_{\sum С}} \cdot \sin\delta$$

Иқтидори максималӣ ҳангоми кунҷи δ = 90º фаро мерасад, яъне:

$$P_{max} = \frac{E_Г \cdot U_С}{x_{\sum С}}$$

Қиматҳои додашударо ба формула мегузорем:

$$P_{max} = \frac{1,2 \cdot 1,0}{0,6} = 2,0 \quad \text{в.н.}$$

2. Кунҷи ибтидоии реҷа (δ_0) муайян менамоем:

$$P_0 = P_{max} \cdot \sin\delta_0;$$

$$\sin\delta_0 = P_0 / P_{max} = 1,0/2,0 = 0,5.$$

Кунҷи ибтидоии реҷа баробар аст ба:

$$\delta_0 = \arcsin(0,5) = 30°.$$

Аз сабаби он ки δ_0 = 30º < 90º аст, реҷаи ибтидоӣ дар қисми устувори тавсифи кунҷӣ қарор дорад, яъне ҳосилаи хусусии иқтидор аз рӯи кунҷ мусбат аст:

$$\frac{dP}{d\delta} = P_{max} \cdot \cos(30°) > 0.$$

3. Ҳисоби зариби захираи устувории статикӣ ($K_з$):

Зариби захираи устуворӣ нишон медиҳад, ки иқтидори реҷаи амалкунанда аз ҳадди критикии (меъёрии) худ чӣ қадар дур аст ва бо формулаи зерин ҳисоб карда мешавад:

$$K_з = \frac{P_{max} - P_0}{P_0} \cdot 100\% = \frac{2,0 - 1,0}{1,0} \cdot 100\% = 100\% > K_{з.меъ.} = 20\%.$$

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.