ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՌ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР
Տեխնիկական գիտութ. սերիա XIX, № 3, 1966 Серия технических наук

ЭНЕРГЕТИКА

Н. К. ИОАННИСЯН

О ДОСТАТОЧНЫХ УСЛОВИЯХ УСТОЙЧИВОСТИ В „БОЛЬШОМ" РЕГУЛИРОВАНИИ ГИДРОАГРЕГАТА

При автоматическом регулировании гидротурбин, основным эксплуатационным режимом гидроагрегата является работа его под нагрузкой в мощной электрической сети параллельно с большим числом других агрегатов. При этом мощность всей системы практически можно считать бесконечно большой по сравнению с мощностью отдельного агрегата. Опыт эксплуатации различных систем автоматического регулирования показывает, что наиболее распространенным случаем неустойчивого регулирования гидроагрегатов является режим холостого хода и изолированная работа агрегата. Устойчивость регулирования агрегата в „большом" с бесконечно большой мощностью была рассмотрена в [1]. В данной работе исследуется устойчивость в „большом" регулировании гидроагрегата при изолированной работе и в режиме холостого хода.

Одним из существенных показателей надежности режима регулирования агрегата является наличие достаточного запаса устойчивости в „большом" при отключении гидроагрегата от общей сети. Необходимо выявить достаточные условия устойчивости в „большом" при регулированиях изолированно работающего гидроагрегата. Примем выражения для электрического момента в виде

$$M_г = m\omega,$$

где m — коэффициент пропорциональности; ω — угловая скорость вращения вала гидроагрегата.

Для механического момента принимая такую же формулу, как в [2], с учетом уравнения расхода, жесткого гидравлического удара и известного уравнения регулирования, получим

$$\left.\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -b_{11} x_1 + b_{12} x_2 - n_1 \xi + b_1^{*} + F_1(\xi, x_1, x_2), \\ \dot{x}_2 &= b_{21} x_1 - b_{22} x_2 + n_2 \xi + b_2^{*} + F_2(\xi, x_1, x_2), \\ \dot{x}_3 &= -\frac{1}{T_i} x_3 + \frac{\eta_n}{T_i} \xi + \eta_1 f(\sigma), \\ \dot{\xi} &= f(\sigma), \quad \sigma = -c x_1 - x_3. \end{aligned}\right| \qquad (1)$$

Здесь x_1, x_2, x_3, ξ, σ — относительные отклонения соответственно угловой скорости, расхода, обратной связи, открытия регулирующего органа, золотника;

$b_{11}^{*}, b_{12}, b_{21}, b_{22}, n_1, n_2, b_1^{*}, b_2^{*}$ — постоянные коэффициенты, определяются по исходным параметрам системы (табл. 1):

F_1, F_2 — нелинейные функции, разложение которых по степеням x_1, x_2, ξ начинается с членов не ниже второго порядка (табл. 1);

ε — параметр, зависящий от статической характеристики центробежного маятника:

T_i — постоянная времени изодрома;

μ_1 — кинематический коэффициент обратной связи:

μ_2 — степень остающей неравномерности регулирования.

Система дифференциальных уравнений возмущенного движения изолированно работающего гидраогрегата (1) в канонической форме имеет вид:

$$\left.\begin{aligned} \dot z_\rho &= \bar\lambda_\rho z_\rho + f(\sigma), \\ \dot\sigma &= \sum_{\rho=1}^{3} \bar\beta_\rho z_\rho - \mu_2 f(\sigma), \end{aligned}\right| \qquad (\rho = 1, 2, 3) \qquad (2)$$

где

$$\bar\lambda_k = \lambda_k + \frac{\varphi_k}{z_k}, \quad \bar\beta_k = \beta_k \frac{\bar\lambda_k}{\lambda_k}.$$

$$\varphi_k = \frac{\lambda_k}{N_m(\lambda_k)} \sum_{\rho=1}^{2} D_{\rho m}(\lambda_k) F_\rho(\xi, x_1, x_2). \qquad (k = 1, 2, 3).$$

Способ определения $N_m(\lambda_k)$, $D_{\rho m}(\lambda_k)$, β_k изложен в [1] и [3].

Критерий устойчивости в „большом" установившегося режима исследуемой системы (1) при $F_1 = F_2 = 0$ сводятся по Лурье [2]

$$\left.\begin{aligned} M &= -\frac{1}{4}(\mu_1 \Gamma f_3)^{-\frac{2}{3}} \left[B_1 + \mu_1 (f_1^2 - 2f_2)\right] > 0, \\ N &= -\frac{1}{4\Gamma}(\mu_1 \Gamma f_3)^{-\frac{1}{3}} \left(\frac{2f_1 f_3 - f_2^2}{f_3}\Gamma^3 + f_3 B_{-1}\right) > 0 \end{aligned}\right| \qquad (3)$$

или, при несоблюдении одного из условий (3), к

$$F(M, N) = M^3 + N^3 - M^2N^2 - \frac{9}{8}MN + \frac{27}{256} \qquad (4)$$

Здесь

$$f_1 = b_{11} + b_{22} - \frac{1}{T_i}, \quad f_2 = b_{11}b_{22} - b_{21}b_{12} - \frac{1}{T_i}(b_{11}^{*} + b_{22}),$$

$$f_3 = \frac{1}{T_i}(b_{21}b_{12} - b_{11}^{*}b_{22}), \quad \Gamma^3 = \sum_{\rho=1}^{3}\frac{\beta_\rho}{\lambda_\rho} + \mu_1.$$

$$B_{-1} = \sum_{\rho=1}^{3}\frac{\beta_\rho}{\lambda_\rho}, \quad B_1 = \sum_{\rho=1}^{3}\beta_\rho\lambda_\rho.$$

Критерий устойчивости в „большом" системы (1) с учетом F_1 и F_2 определяется по объединенному методу Лурье-Айзермана [1] и

Таблица 1

<table>
<tr><th>Коэффициенты</th><th>Значения коэффицентов</th><th>Выражения нелинейных функций</th></tr>
<tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr>
<tr><td>b_{11}</td><td>$-\frac{1}{T_a}\left\{\frac{2k\sqrt{\zeta_0}}{(1-k)(1-{}_{A})}\left(\frac{\alpha_0-\alpha_x}{1-\alpha_x}+M_A\right)+\right.$
$\left.+\frac{2}{1-\zeta_A}\left[\frac{\zeta_A\varphi_0(\alpha_0-\alpha_x)}{1-\alpha_x}+M_A\varphi_0\right]+1\right\}$</td><td rowspan="6">$F_1(\xi, x_1, x_2)=\frac{1}{T_a}\left\{\frac{2\sqrt{\zeta_0}\,q_0}{\alpha_0^2(1-\zeta_A)(1-k)}\left(\frac{\alpha_0-\alpha_x}{1-\alpha_x}+M_{A*}\right)\frac{\xi^2}{\alpha_0+\xi}-\right.$
$\frac{2\sqrt{\zeta_0}}{\alpha_0(1-k)(1-\zeta_A)}\left[\frac{1}{\alpha_0}\left(\frac{\alpha_0-\alpha_x}{1-\alpha_x}+M_A\right)-\frac{1}{1-\alpha_x}\right]x_2\xi-$
$-\frac{2\zeta_0 q_0}{\alpha_0^2(1-k)(1-\zeta_A)(1-\alpha_x)}\xi^2-\frac{2}{(1-\zeta_A)(1-\alpha_x)}\left(\frac{k\sqrt{\zeta_0}}{1-k}+\right.$
$\left.+\varphi_0\zeta_A\right)x_1\xi+\frac{2\sqrt{\zeta_0}}{\alpha_0^2(1-k)(1-\zeta_A)}\left(\frac{\alpha_0-\alpha_x}{1-\alpha_x}+M_A\right)\frac{x_2\xi^2}{\alpha_0+\xi}-$
$-\frac{1}{1-\zeta_A}\left[\frac{\zeta_A(\alpha_0-\alpha_x)}{1-\alpha_x}+M_A\right]x_1^2-\frac{\zeta_A}{(1-\zeta_A)(1-\alpha_x)}x_1^2\xi+$
$+\frac{2\sqrt{\zeta_0}\,q_0}{\alpha_0^2(1-\zeta_A)(1-\alpha_x)(1-k)}\cdot\frac{\xi^3}{\alpha_0+\xi}-$
$-\frac{2\sqrt{\zeta_0}}{\alpha_0^2(1-k)(1-\zeta_A)(1-\alpha_x)}x_2\xi^2+$</td></tr>
<tr><td>b_{12}</td><td>$\frac{2\sqrt{\zeta_0}}{T_a\alpha_0(1-k)(1-\zeta_A)}\left(\frac{\alpha_0-\alpha_x}{1-\alpha_x}+M_A)\right)$</td></tr>
<tr><td>b_{13}</td><td>$-\frac{A}{T_a}$</td></tr>
<tr><td>b_{21}</td><td>$\frac{2k\sqrt{\zeta_0}}{T_\tau(1-k)}$</td></tr>
<tr><td>b_{22}</td><td>$-\frac{2\sqrt{\zeta_0}}{T_\tau\alpha_0(1-k)}$</td></tr>
<tr><td>n_1</td><td>$\frac{1}{T_a(1-\zeta_A)}\left\{\frac{\zeta_0-\zeta_A\varphi_0^2}{1-\alpha_x}-\frac{2\sqrt{\zeta_0}\,q_0}{\alpha_0^2(1-k)}\left(\frac{\alpha_0-\alpha_x}{1-\alpha_x}+M_A\right)+\right.$
$\left.+\frac{2\sqrt{\zeta_0}}{1-\alpha_x}\left[\frac{q_0}{\alpha_0(1-k)}-\frac{\varphi_0 k}{1-k}-\sqrt{\zeta_0}\right]\right\}$</td></tr>
</table>

1	2	3
n_2	$\frac{2\sqrt{\xi_0}\,q_0}{T_1\alpha_0^2(1-k)}$	$+\frac{2\sqrt{\xi_0}}{\alpha_0^2\,(1-k)(1-\xi_A)\,(1-\alpha_A)}\cdot\frac{x_2\xi^3}{\alpha_0+\xi}\Big\}$
b_1^*	$\frac{2\sqrt{\xi_0}}{T_a\,(1-\xi_A)}\left(\frac{\alpha_0-\alpha_A}{1-\alpha_A}+M_A\right)\left[\frac{q_0}{\alpha_0(1-k)}-\frac{\varphi_0 k}{1-k}-\sqrt{\xi_0}\right]$	$F_2\,(\xi,\ x_1,\ x_2)=-\frac{2\xi_0}{T_1\alpha_0^2(1-k)}\Big(\frac{q_0\xi^3}{\alpha_0+\xi}-$
b_2^*	$-\frac{2\sqrt{\xi_0}}{T_1}\left[\frac{q_0}{\alpha_0(1-k)}-\frac{\varphi_0 k}{1-k}-\sqrt{\xi_0}\right]$	$-x_2\xi+\frac{x_2\xi^3}{\alpha_0+\xi}\Big)$

сводится к существованию вещественных значений относительно t_0, t_1, t_2 системы уравнений:

$$
\left.
\begin{aligned}
&\frac{1}{f_3^2}\, t_2^2 = \bar{B}_{-1} = \Gamma^2, \quad t_0^2 = \bar{B}_1, \\
&\frac{2}{f_3^2}\left(\frac{f_1 f_3 - f_2^2}{f_3^2}\, t_2 - \frac{f_2}{f_3}\, t_1 - t_0 M_2\right) + \left(\frac{f_2}{f_3^2} t_2 + \frac{1}{f_3} t_1\right)^2 + \bar{B}_{-1} = 0,
\end{aligned}
\right| \qquad (5)
$$

где

$$
\bar{B}_{\nu} = \sum_{j=1}^{3} \bar{\beta}_j \lambda_j^{\nu}, \quad \bar{\beta}_j = \beta_j \frac{\bar{\lambda}_j}{\lambda_j},
$$

при соблюдении неравенства Сильвестра

$$
A_{11} > 0, \quad \begin{vmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{vmatrix} > 0, \quad \begin{vmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{vmatrix} > 0. \qquad (6)
$$

Здесь $A_{ij} = \dfrac{\bar{\gamma}_i + \bar{\gamma}_j}{\lambda_i + \overset{*}{\lambda}_j}$, причем $A_{ij} = \overset{*}{A}_{ji}$,

где $\overset{*}{\lambda}_j$, $\overline{\gamma}_j$ — комплексно сопряжено к λ_j, γ_j;

$\overset{*}{A}_{ji}$ — комплексно сопряжено к A_{ji}.

В табл. 2 приведен результат расчета при следующих исходных данных:

$\omega_0 = 101{,}7$ *сек*, $M_{T(0)} = 7{,}5$ *кгм*; $H_0 = 5$ *м*;

$Q_0 = 0{,}190$ *м*^{3}*/сек*; $c = 3{,}125$; $\mu_1 = 1{,}36$; $\mu_2 = 0{,}05$;

$\alpha_T = 0{,}276$, $M_A = 0{,}2015$; $k = 0{,}3$; $q_0 = \alpha_0 = \varphi_0 = \xi_0 = 1$.

Таблица 2

T_a *сек*	T_T *сек*	T_1 *сек*	M	N
6,0	1,5	1,0	1,2033	5,2314
6,0	1,5	5,0	2,0168	2,9892
10,0	2,0	1,0	1,3187	3,1493
10,0	4,0	1,0	0,7666	5,6252
10,0	2,0	10,0	1,9276	3,5936
10,0	2,0	10,0	5,8156	5,7280

Из табл. 2 видно, что для постоянных времени T_a, T_T, T_1, устойчивость в „большем" регулировании гидроагрегата при изолированной работе и с учетом только сервомоторной нелинейности обеспечивается, так как $M > 0$ и $N > 0$.

Теперь определим достаточные условия устойчивости в „большом" указанной регулируемой системы, когда в уравнениях, описывающих переходный процесс, учитывается не только сервомоторная, но и расходная и моментная нелинейные характеристики.

Пусть $x_1 = 0{,}05$; $x_2 = -0{,}06$; $\xi_0 = -0{,}10$. Тогда $F_1 = -0{,}00005$; $F_2 = 0{,}00631$.

С учетом линеаризованных значений F_1 и F_2 численные величины корней $\bar{\lambda}_k$ ($k=1, 2, 3$) приведены в табл. 3.

Таблица 3

T_a *сек*	T_1 *сек*	T_i *сек*	λ_1	λ_2	$\lambda_3 = \bar{\lambda}_3$	$\bar{\lambda}_1$	$\bar{\lambda}_2$
6,0	1,5	1,0	−2,04	−0,122	−1,0	−1,73	−0,128
6,0	1,5	5,0	−2,04	−0,122	−0,2	−1,73	−0,128
10,0	2,0	1,0	−0,508	−0,074	−1,0	−1,329	−1,403
10,0	4,0	1,0	−0,799	−0,070	−1,0	−0,438	−0,508
10,0	2,0	10,0	−1,508	−0,074	−0,1	−1,329	−1,403
20,0	2,0	10,0	−1,506	−0,077	−0,1	−0,580	−0,656

Подставляя найденные значения $\bar{\lambda}_k$ ($k=1, 2, 3$) в (5) и (6), находим, что для данных значений параметров системы при изолированной работе гидроагрегата в случае изодромной обратной связи с учетом нелинейности F_1 и F_2, критерий достаточных условий устойчивости в „большом" не обеспечивается, кроме примера 3 (табл. 3). Если в системе уравнений (1) принять $M =0$ и начальное открытие регулирующего органа равным открытию при холостом ходе, т. е. $\alpha_0 = \alpha_x$, получим систему, описывающий переходный процесс регулирования скорости гидроагрегата в режиме холостого хода.

Очевидно, что критерии устойчивости в „большом" при работе гидроагрегата на холостом ходу, если $F_1 = F_2 = 0$, аналогичны критериям (3)—(4), а с учетом F_1 и F_2 — критериям (5)—(6).

Выполненные численные расчеты показывают, что нелинейности расхода и механического момента, выражаемые в функциях F_1 и F_2, существенно влияют на достаточные условия устойчивости регулирования скорости вращения гидроагрегата при режиме холостого хода и при изолированной работе.

Исходя из этого при выборе параметров регулятора и агрегата необходимо установить устойчивость регулирования гидроагрегата в случае изолированной его работы и в режиме холостого хода.

НИИВПиГ

Поступило 14.IX 1964

Ն. Կ. ԽԱՆՆԻՅԱՆ

ՀԻԴՐՈԱԳՐԵԳԱՏՆԵՐԻ ԿԱՐԳԱՎՈՐՄԱՆ ՄԵԾ ԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ԲԱՎԱՐԱՐ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐԻ ՄԱՍԻՆ

Ամփոփում

Հոդվածում համատեղ օգտագործելով Ա. Ի. Լուրյեի և Մ. Ա. Այզերմանի մեթոդները, քննարկվում և բացահայտվում են մեկուսացած աշխատանքի և պարապ ընթացքի ժամանակ հիդրոագրեգատի կարգավորման մեծ կայունության բավարար պայմանները։

(1) հավասարումների սիստեմը ներկայացնում է ճնշման խողովակաշար-հիդրոագրեգատ-ավտոմատ կարգավորիչ սիստեմի գրգռված շարժումը,

որտեղ ջրի, ագրեգատի մեխանիկական մոմենտի և սերվոշարժիչի խարակտերիստիկները ոչ գծային են։

Ուսումնասիրելով տվյալ սիստեմի կարգավորման մեծ կայունության բավարար պայմանները, նախ երբ (1) սիստեմը պարունակում է միայն մեկ ոչ գծային խարակտերիստիկ՝ սերվոշարժիչինը ($F_1 = F_2 = 0$), իսկ այնուհետև, երբ հաշվի է առնվում նաև դժանմացնելի ոչ գծային F_1 և F_2 ֆունկցիաները. Հոդվածում եզրակացվում է, որ ջրի ու մեխանիկական մոմենտի ոչ գծային խարակտերիստիկները էապես ազդում են մեծ կայունության բավարար պայմանների վրա։ Հետևապես, հիդրոագրեգատի և կարգավորիչի պարամետրերն ընտրելիս անհրաժեշտ է հաստատել հիդրոագրեգատի կարգավորման կայունությունը մեկուսացված աշխատանքի և նրա պարապ ընթացքի ժամանակ։

ЛИТЕРАТУРА

1. *Иоаннисян Н. К.* О достаточных условиях динамической устойчивости регулирования гидроагрегата. Известия АН Армянской ССР (ТН), XVI, №№ 2—3, 1963.
2. *Картвелишвили Н. А.* Неустановившиеся режимы в силовых узлах гидроэлектрических станций, М.—Л., 1951.
3. *Лурье А. И.* Некоторые нелинейные задачи теории автоматического регулирования. Гостехиздат, 1951.
4. *Аронович Г. В.* К определению достаточных условий динамической устойчивости энергетических систем. Тр. ВНИИ электроэнергетики, т. IX, 1959.