Горные стационарные установки и машины.
Записки Ленинградского горного института. Л., 1988. Т.117

УДК 622.242

ДИНАМИКА ПРИВОДА ПОДАЧИ ШАРОШЕЧНОГО БУРОВОГО СТАНКА

О.В.КАБАНОВ, Б.С.МАХОВИКОВ, С.Г.ЗАРИ

Привод подачи бурового станка состоит из электродвигателя, объемного насоса переменной производительности, гидролинии, в которую включаются предохранительный клапан и дроссель-регулятор, гидромотора и механической передачи от гидромотора к буровому инструменту, на который также действует привод вращателя. В данной статье приводятся результаты анализа привода подачи как объекта управления при постоянной частоте вращения бурового става применительно к экспериментальному стенду, разработанному в ЛГИ (рис.I)[к].

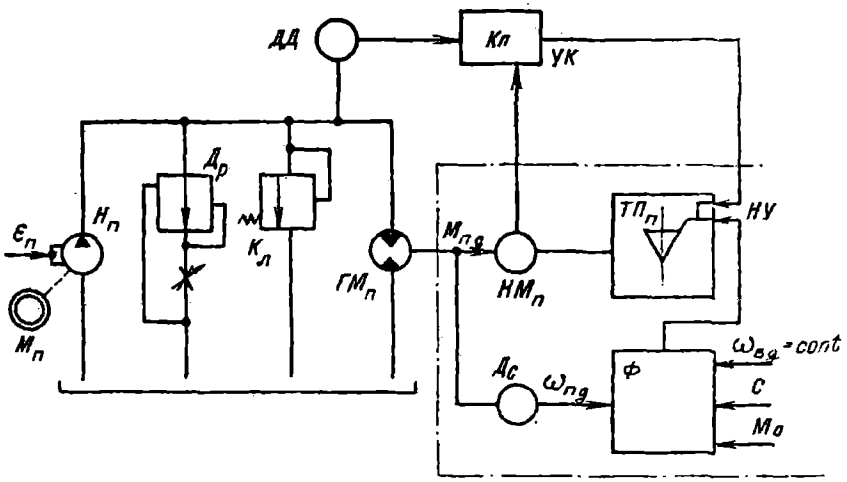


Рис.1. Общая схема привода подачи бурового станка на экспериментальном стенде

Привод подачи опытного стенда состоит из асинхронного электродвигателя $М_П$, насоса переменной производительности $Н_П$, дроссель-регулятора $Д_р$, предохранительного клапана $К_Л$, гидромотора $ГМ_П$, датчика давления ДД, датчика угловой скорости $Д_С$, нагрузочного устройства НУ, состоящего из генератора независимого возбуждения $НМ_П$, тиристорного преобразователя $ТП_П$ и формирователя нагрузки Ф. В привод включено устройство для компенсации

[к] Б.С.Маховиков, О.В.Кабанов, С.Г.Зарицкий. Стенд для испытаний с. нительных органов горных машин // Известия вузов. Горный журнал. 1986.

инерционности гидромотора и генератора УК. Закон изменения нагрузки реализуется формирователем Ф. Экспериментальные исследования показывают, что формирователь и тиристорный преобразователь пропускают периодические сигналы до 200 Гц практически без искажений, поэтому при анализе динамики привода можно принять, что нагрузочное устройство без генератора $НМ_{П}$ является безынерционным звеном, т.е. формирование момента сопротивления не зависит от времени.

В устройстве компенсации УК давление на гидромоторе, определяющее его момент, сравнивается с током якоря генератора, определяющим момент сопротивления. Разность этих сигналов через усилитель подается в качестве дополнительного задания на вход тиристорного преобразователя. При необходимости уменьшения инерционности выход блока УК подается на вход $ТП_{П}$ с отрицательным знаком. Следовательно, при увеличении давления ток якоря нагрузочной машины будет уменьшаться, что приведет к уменьшению времени разгона якоря. Для увеличения инерционности выход блока УК должен подаваться на вход $ТП_{П}$ с положительным знаком. В статике момент сопротивления равен движущему моменту на валу гидромотора, на выходе блока УК сигнал равен нулю.

Математическое описание рассматриваемого объекта представим в виде следующих уравнений:

уравнение электродвигателя

$$T_{П}\dot{M}_{ПН}+M_{ПН}-\frac{1}{\gamma_{П}\omega_{ПО}}(\omega_{ПО}-\omega_{ПН})=0 \qquad (1)$$

уравнение насоса подачи

$$J_{П}\dot{\omega}_{ПН}+\frac{W_{Н}P_{П}\varepsilon_{П}}{\eta^{М}_{ПМ}}-M_{ПН}=0\,; \qquad (2)$$

уравнение неразрывности потока между насосом и гидромотором при закрытых дроссель-регуляторе и предохранительном клапане

$$\frac{W}{E}\dot{P}_{П}+W_{ПД}\,\omega_{ПД}-\varepsilon_{П}\,W_{Н}\,\omega_{ПН}+K_{УП}P_{П}=0\,; \qquad (3)$$

уравнение гидродвигателя

$$J_{ПД}\,\dot{\omega}_{ПД}-W_{ПД}\,P_{П}\,\eta^{М}_{ПД}+M_{ПД}=0\,; \qquad (4)$$

уравнение устройства компенсации инерционности

$$M_{ПД}=M_{ПД1}-K_{П}(\alpha P_{П}-M_{ПД})\,; \qquad (5)$$

уравнение, описывающее формирование момента сопротивления на валу генератора,

$$M_{ПД1}=M_{0}+C\,\frac{\omega_{ПД}}{\omega_{ВД}}+f(t)\,, \qquad (6)$$

где $T_{П}$ - электромагнитная постоянная времени асинхронного двигателя, с;

$M_{пн}$, $M_{пд}$ – моменты на валу насоса и гидродвигателя подачи, Н·м; $M_{пд1}$ момент на валу гидродвигателя без блока компенсации, Н·м; $\omega_{пн}$, $\omega_{по}$, $\omega_{пд}$ – угловая скорость двигателя насоса подачи, синхронная скорость этого двигателя, угловая скорость гидромотора, рад/с; $J_{п}$, $J_{пд}$ – моменты инерции масс соединенных с валом насоса и гидродвигателя, кг·м^2; $W_{пн}$, $W_{пд}$ – удельные объемы насоса и гидродвигателя, м^3/рад; $P_{п}$ – давление в гидролинии, Па; $\varepsilon_{п}$ – параметр регулирования насоса подачи; $\eta^{м}_{пн}$, $\eta^{м}_{пд}$ – коэффициент полезного действия насоса и гидромотора; E – приведенный модуль упругости жидкости, Па; $K_{уп}$ – коэффициент утечек в гидролинии, м^3/оПа; α – коэффициент передачи датчика давления, м^3; $K_{п}$ – коэффициент передачи устройства компенсации инерционных масс; M_0 – начальный момент сопротивления на валу гидромотора, Н·м; C – величина, характеризующая прочность пород, Н·м; $f(t)$ – случайная нагрузка на валу гидромотора, Н·м.

Анализ динамики проведен для привода подачи, определяемого параметрами: $T_{п}$ = 7,96·10^{-2}; $\omega_{по}$ = 157; $J_{п}$ = 9,36·10^{-2}; $\nu_{п}$ = 1,3·10^{-4}; $W_{пн}$ = 7,17·10^{-6}; ε_0 = 0,317; $\eta^{м}_{пн}$ = 0,904; $K_{уп}$ = 5,234·10^{-12}; W = 1,3·10^{-3}; E = 5·10^{8}; $J_{пд}$ = 4,2·10^{-1}; $W_{пд}$ = 5,57·10^{-6}; $\eta^{м}_{пд}$ = 0,87; M_0 = 15; C_0 = 71.

При расчете статического режима были определены параметры $\omega^{0}_{пн}$ = = 156,54 рад/с; $P^{0}_{п}$ = 9·10^{6} Па; $\omega^{0}_{пд}$ = 55,42 рад/с.

Анализ уравнений (1)-(4) показывает, что скорость насоса изменяется в пределах скольжения электродвигателя и в первом приближении может быть принята постоянной, а постоянной времени $T_{п}$ можно пренебречь ввиду ее малости. В этом случае динамика привода будет определяться уравнениями (3)-(6). При условии, что $\omega_{пн}$ = const, уравнения (3)-(5) – линейные. При детерминированном воздействии по нагрузке функция $f(t)$ = 0. Примем по условию задачи $\omega_{вд}$ = const и, линеаризуя уравнение (6), получим в безразмерной форме:

$$T_1 \dot{\bar{P}}_{п} + \bar{P}_{п} - a_1 \bar{\varepsilon}_{п} - a_2 \bar{\omega}_{пд}; \qquad (7)$$

$$T_2 \dot{\bar{\omega}}_{пд} = \bar{P}_{п} - \bar{M}_{пд}; \qquad (8)$$

$$\bar{M}_{пд} = \bar{M}_{пд1} + K_{п}(\bar{M}_{пд} - \bar{P}_{п}); \qquad (9)$$

$$\bar{M}_{пд1} = a_3 \bar{\omega}_{пд} + a_4 \bar{C}, \qquad (10)$$

где T_1, T_2, a_1, a_2, a_3, a_4 – постоянные коэффициенты;

$$\bar{P}_{п} = \frac{P_{п}}{P^{0}_{п}}; \quad \bar{\varepsilon}_{п} = \frac{\varepsilon_{п}}{\varepsilon_0}; \quad \bar{M}_{пд} = \frac{M_{пд}}{M^{0}_{пд}}$$

$$\bar{M}_{пд1} = \frac{M_{пд1}}{M^{0}_{пд1}}; \quad \bar{\omega}_{пд} = \frac{\omega_{пд}}{\omega^{0}_{пд}}; \quad \bar{C} = \frac{C}{C_0}$$

Системе уравнений (7)-(10) соответствует структурная схема $s = d/dt$ (рис.2), из которой следует, что привод представляет собой последователь-

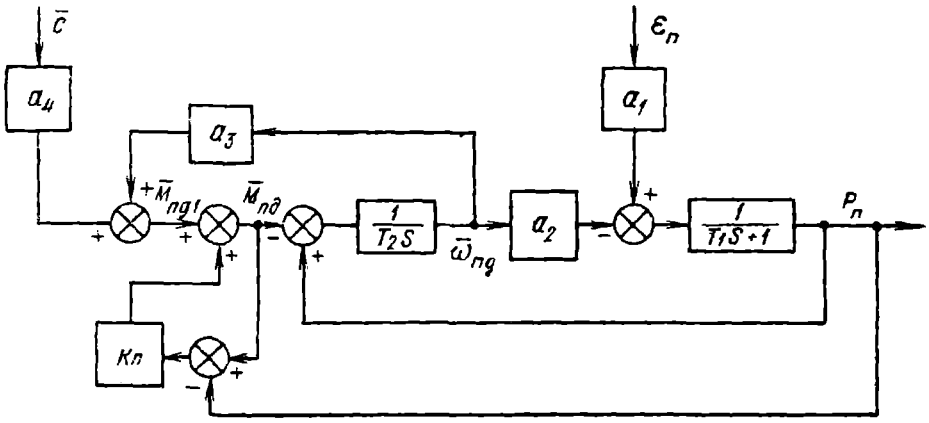


Рис.2. Структурная схема линеаризованной модели привода подачи

ное соединение апериодического и интегрирующего звеньев, охваченных положительными и отрицательными обратными связями по давлению и положительной обратной связью по скорости. При положительном коэффициенте усиления устройство компенсации действует как положительная обратная связь по нагрузке, которая будет увеличивать момент $\bar{M}_{пд}$, подаваемый на вход привода с отрицательным знаком, что приводит к уменьшению времени переходного процесса. При отрицательном коэффициенте действие обратной связи направлено на замедление переходных процессов.

Рассмотрим работу привода при постоянном моменте сопротивления без устройства компенсации инерционности УК. Для этого достаточно взять уравнения (7) и (8).

После исключения $\bar{\omega}_{пд}$ получим

$$T_э^2 \ddot{\bar{P}}_п + 2T_э \xi \dot{\bar{P}}_п + \bar{P}_п = a_в \dot{\bar{\varepsilon}}_п + \bar{M}_{пд}, \qquad (11)$$

где

$$T_э = \frac{1}{W_{пд}} \sqrt{\frac{W J_{пд}}{E \eta^м_{пд}}} \qquad \xi = \frac{K_{уп} \sqrt{J_{пд} E}}{2 W_{пд} \sqrt{W \eta^м_{пд}}} \qquad a_в = \frac{W_н \omega_н J_{пд} \varepsilon_0}{W^2_{пд} \eta^м_{пд} P^0_п}. \qquad (12)$$

Подставляя значения параметров, получаем $T_э = 0{,}2$ с и $\xi = 0{,}202$. Следовательно, привод представляет колебательное звено с небольшим коэффициентом затухания ξ.

Для рассматриваемого привода подачи желательно, чтобы коэффициент затухания приближался к единице (тогда колебания будут отсутствовать), а постоянная времени была минимальной. Момент инерции движущихся масс определяется буровым оборудованием, а модуль упругости – шлангами. Следовательно, изменять постоянную времени и коэффициент затухания можно

за счет величин W, $K_{уп}W_{пд}$, причем уменьшение объема гидролинии приводит к уменьшению времени переходного процесса и колебательности, увеличение рабочего объема гидромотора уменьшает время переходного процесса и увеличивает коэффициент затухания, а коэффициент утечек влияет только на колебательность. В случае постоянного момента сопротивления задан. качество переходного процесса можно получить за счет изменения параметров W и $K_у$. Так, для $T_3 = 0{,}2$ и апериодического переходного процесса $\xi = 1$, коэффициент $K_у$ надо увеличить примерно в пять раз. Уменьшение объема W в два раза приводит к одновременному уменьшению T_3 и увеличению ξ в 1,41.

При включении устройства компенсации инерционности и изменении момента сопротивления в функции скорости $\bar{\omega}_{пд}$ и крепости пород $\bar{C}$ (рис.2) получим из уравнений (7)-(10):

$$T_4^2 \ddot{\bar{P}}_п + 2T_4 \xi_1 \dot{\bar{P}}_п + \bar{P}_п = b_1 \dot{\bar{\varepsilon}}_п + b_2 \bar{\varepsilon}_п + b_3 \bar{C}, \tag{13}$$

где

$$T_4 = T_3 \sqrt{1-K_п} \Big/ \sqrt{1+\frac{K_{уп} C_0}{W_{пд}^2 \eta_{пд}^м \omega_{вд}^0}} \tag{14}$$

$$\xi_1 = \left(\frac{\xi}{\sqrt{1-K_п}} + \frac{C_0}{2(1-K_п)^{3/2} W_{пд} \omega_{вд}^0} \sqrt{\frac{W}{E \eta_{пд}^м}} \right) \sqrt{1+\frac{K_{уп} C_0}{W_{пд}^2 \eta_{пд}^м \omega_{вд}^0}} \tag{15}$$

$$\left.\begin{aligned} b_1 &= \frac{W_н \omega_н^0 \omega_{вд}^0 J_{пд} \varepsilon_0 (1-K_п)}{P_{пд}^0 (W_{пд}^2 \eta_{пд}^м \omega_{вд}^0 + K_у C_0)}; \\ b_2 &= \frac{\varepsilon_0 \omega_{пд}^0 C_0}{\omega_{вд}^0 M_0} \left(1+\frac{K_{уп} C_0}{W_{пд}^2 \eta_{пд}^м \omega_{вд}^0}\right)^{-1}; \qquad b_3 = \frac{b_2}{\varepsilon_0} \end{aligned}\right\} \tag{16}$$

Определив численные значения коэффициентов, можно сказать, что величина

$$\frac{K_{уп} C_0}{W_{пд}^2 \eta_{пд}^м \omega_{вд}^0} \ll 1.$$

Следовательно, при $K_п = 0$ постоянная времени остается без изменения, а коэффициент затухания колебаний увеличивается, причем это увеличение зависит от выбора исходного значения C_0. Включение устройства компенсации инерционности привода при $K_п > 0$ приводит к уменьшению постоянной времени T_4 и увеличению коэффициента затухания, т.е. к улучшению переходного процесса, однако коэффициент $K_п$ не может быть больше единицы, так как при $K_п > 1$ величина T_4^2 становится отрицательной, что свидетельствует о потере устойчивости. Если $K_п < 0$, процесс затягивается, величина T_4 увеличивается, а ξ_1 уменьшается. Поскольку величина $K_п$ не входит в коэффициенты усиления b_2 и b_3, статика процесса при включении устройства УК не изменяется.

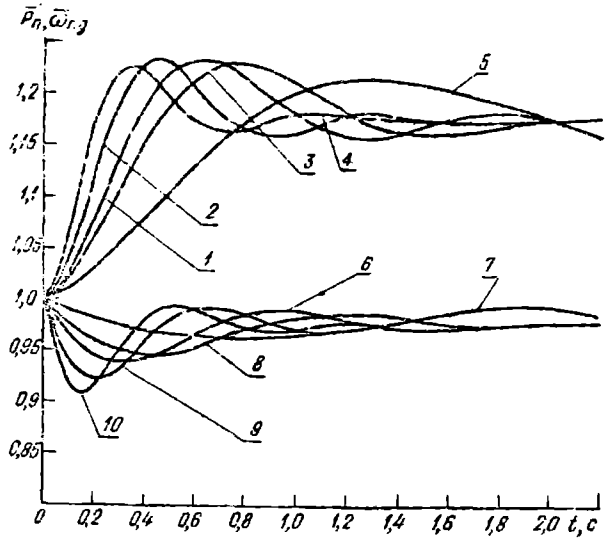


Рис.3. Переходные процессы в приводе подачи при ступенчатом изменении нагрузки

$\bar{C} = 1{,}3$ при $t \geq 0$; $\varepsilon_0 = 0{,}317$; $\bar{C} = 1$ при $t < 0$; кривые 1-5 – $\bar{P}_п$ соответственно при $K_п = 0$; 0,5; -0,5; 0,69, -3; кривые 6-10 – $\bar{\omega}_{пд}$ при $K_п = 0$; 3; -0,5; 0,5; 0,69

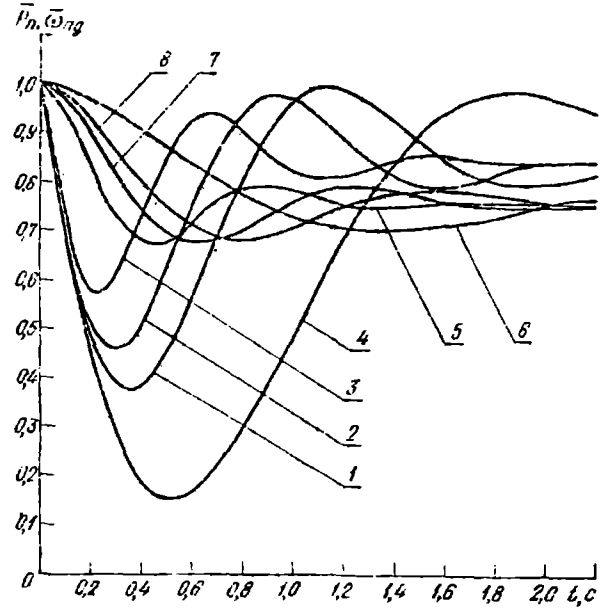


Рис.4. Переходные процессы в приводе подачи при ступенчатом изменении параметра регулирования

$\varepsilon_п = 0{,}244$ при $t \geq 0$; $\varepsilon_п = 0{,}317$ при $t < 0$; кривые 1-4 – $\bar{P}_п$ при $K_п = -0{,}5$; 0; 0,5; 3; кривые 5-8 – $\bar{\omega}_{пд}$ при $K_п = 0{,}5$; 3; 0; -0,5

При физическом моделировании на стенде величин T_4 и ξ_1 являются заданными и определяются моделируемым объектом, например, $T_4 = T_0$, $\xi_1 = \xi_0$. Если постоянная T_3 известна, то для обеспечения подобия между объектом и стендом надо определить коэффициент $K'_п = 1 - (T_4/T_3)^2$. Подставляя значение $K'_п$ в выражение (15), можно определить коэффициент утечек $K_{уп}$. Подобие по входным воздействиям можно обеспечить выбором исходных величин $\omega^0_п$, ε_0, $P^0_п$, используя формулы (16).

Для количественной оценки система уравнений (1)-(6) моделировалась на ЭВМ при разных значениях коэффициента $K_п$ при ступенчатом изменении нагрузки C (рис.3) и параметра регулирования ε (рис.4). Наличие производной $\dot{\bar{\varepsilon}}$ в правой части обуславливает изменение давления при изменении параметра регулирования более интенсивное, чем при изменении нагрузки C, что способствует улучшению качества процесса при включении в привод системы автоматического регулирования.

Сравнение результатов расчета и эксперимента показывает, что привод достаточно точно может быть описан уравнениями (1)-(6) и влияние насоса и электродвигателя на его динамику незначительно.