

УДК 621.22

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРОАГРЕГАТА НАВЕСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТРАКТОРА

Лурье З. Я., д. т. н., проф., Цента Е. Н., асп.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", г. Харьков

61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ «ХПИ», кафедра гидромашин

E-mail: lyakovle@kpi.kharkov.ua

Макей В. А., ведущий инженер

ООО «Промгидропривод», г. Харьков

61177, Харьков, пер. Пластичный, 4, ООО «Промгидропривод»

E-mail: promgidroprivod@online.com.ua

Лиценко И. Г., к. т. н.

ООО «Вниигидропривод», г. Харьков

61030, Харьков, ул. Биологическая, 13, ООО «ВНИИГИДРОПРИВОД»

Викладено результати дослідження динаміки нелінійної моделі гідроагрегату навісного обладнання з урахуванням зони нечутливості керуючого впливу, сигналу про нейтральне положення золотника гідророзподільника, захисту від перевантаження.

Ключові слова: гідроагрегат, навісне обладнання, динаміка, перехідний процес, математична модель.

Article contains the research results of the hydraulic unit non-linear model dynamics of mounting equipment allowing for the control action dead zone, the signal about the neutral position of the hydraulic distributor control valve, the overload protection.

Key words: hydraulic unit, mounting equipment, dynamics, transient, mathematical model.

Введение. Оснащение мобильных машин, в частности тракторов, гидроагрегатами (ГА), в составе которых находятся дросселирующие гидрораспределители (ГР) с электро-гидроуправлением, повышает эффективность работы машин при переменных нагрузках. Качество переходных процессов в части быстрогодействия, величины перерегулирования, числа колебаний, статической точности и др. имеет существенное значение в процессе эксплуатации. Однако этот вопрос не нашел должного отражения в отечественной и зарубежной литературе.

Настоящая статья посвящена исследованию динамических характеристик отечественного ГА навесного оборудования (НО) трактора, созданного ОАО «ХТЗ», НИИГидроприводом и НПП «Хартрон-экспресс».

Анализ литературных источников. В ранее опубликованных нами работах [1 – 3] математическая модель отражает функционирование ГА НО в рабочих режимах подъема и опускания. При этом управляющее воздействие формировалось без учета зоны нечувствительности, возврата золотника ГР в нейтральное положение после отработки заданного машинистом сигнала с пульта управления и обеспечения разгрузки насоса. Кроме того, в процессе работы трактора на неровных поверхностях и на неоднородных почвах возможен режим перегрузки с появлением пиковых давлений, опасных для элементов ГА. Поэтому в гидросхеме ГА линия LS (чувствительная к нагрузке), подключенная к пружинной

полости клапана давления (КД), подается также на вход предохранительного клапана (ПК) (рис. 1). При пиковом значении давления p_1 со стороны нагрузки (по линии LS) открывается ПК, давление за дросселем 1 $p_{др1}$ становится меньше p_1 , предохраняя насосный агрегат (насос (Н) + КД) от перегрузки.

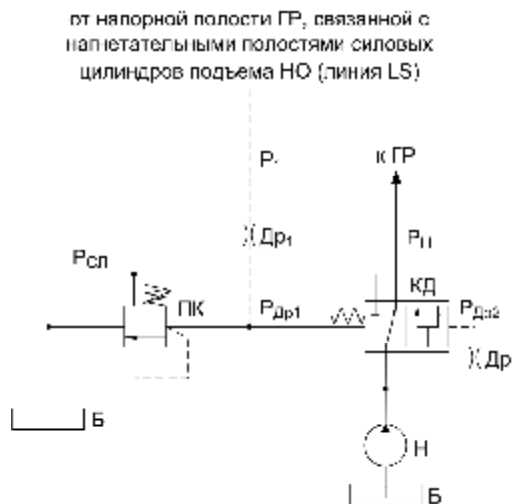


Рисунок 1 – Схема насосной станции гидроагрегата навесного оборудования трактора: Н – насос; КД – клапан давления; ПК – предохранительный клапан; Др₁, Др₂ – дроссели; p_H , p_1 , $p_{др1}$, $p_{др2}$ и $p_{сл}$ – давления РЖ в соответствующих точках схемы

Цель работы. Исследование динамических характеристик ГА НО при вводе в модель [1-3] уравнений формирования управляющего воздействия с учетом зоны нечувствительности; логических уравнений, определяющих возврат золотника ГР в исходную позицию после обработки задающего воздействия на положение НО; уравнений процессов в ПК и исследования динамических характеристик ГА НО трактора в целом.

Материал и результаты исследования. Для решения поставленной задачи математическая модель, изложенная в работах [1-3] дополняется следующим образом. Входной электрический сигнал U_{BX} , например, на подъем НО, поступающий с пульта управления машиниста, формируется электронным устройством (блоком) в управляющее воздействие U_V вида

$$U'_V(t) = \begin{cases} K_1 U_{BX}(t) \text{ при } U_{BX}(t) \leq U_{BX\Delta}, \\ K_1 U_{BX\Delta} + [U_{BX}(t) - U_{BX\Delta}] K_2 \text{ при } U_{BX}(t) > U_{BX\Delta}, \end{cases} \quad (1)$$

$$U_V(t) = U'_V(t) - K_{OZ} y_Z(t) - K_{OGR} x_{GR}(t), \quad (2)$$

где $U_{BX\Delta}$, K_1 – значения входного сигнала и коэффициента усиления по напряжению, соответствующие зоне нечувствительности ГА, при которых золотник ГР смещается на величину положительного перекрытия Δ_{GR} ; K_2 – коэффициент усиления по напряжению U_{BX} на участке линейного перемещения золотника ГР от значения Δ_{GR} до $x_{GR,НОМ}$; $y_Z(t)$, $x_{GR}(t)$ – координаты положения штока гидроцилиндра (ГЦ) и золотника ГР; K_{OZ} , K_{OGR} – коэффициенты обратных связей по положению штока ГЦ и золотника ГР.

При обработке заданного положения НО золотник ГР возвращается в исходную позицию, при которой полости ГЦ с давлением p_1 (поршневая) и p_2 (штоковая) запираются, а насосный агрегат разгружается. Это состояние описывается выражением:

$$A_{GR}(t) = \begin{cases} \pi d_{GR} x_{GR1}(t) \text{ при } x_{GR} > \Delta_{GR}, \\ 0 \text{ при } x_{GR} \leq \Delta_{GR}, \end{cases} \quad (3)$$

где d_{GR} – диаметр золотника ГР, $x_{GR1}(t) = x_{GR}(t) - \Delta_{GR}$.

При этом сигнал, соответствующий $A_{GR} = 0$, обнуляет в модели ГА давление p_1 в уравнении гидродинамической силы ГР и гидролинии LS от ГР до насосного агрегата.

Математическая модель ПК прямого действия представляется следующими уравнениями: - расхода

$$q_{ПК}(t) = \mu_{ПК} A_{Щ,ПК}(t) \sqrt{\frac{2}{\rho} [p_{ДР1}(t) - p_{СЛ}]}, \quad (4)$$

где

$$A_{Щ,ПК}(t) = \pi x_{ПК}(t) \sin \frac{\alpha}{2} \left(d_{ПК} - \frac{x_{ПК}(t)}{2} \sin \alpha \right), \quad (5)$$

$$\mu_{ПК} = \mu_T \sqrt{\text{Re}_{ПК}} / \sqrt{\text{Re}_{ПК} + \text{Re}_{К.ПК}} \quad [4], \quad (6)$$

$$\text{Re}_{К.ПК} = \left(\frac{\mu_T}{k_\mu} \right)^2 \quad [4]; \quad (7)$$

- движения запорно-регулирующего элемента (ЗРЭ)

$$m_{ПК} \ddot{x}_{ПК}(t) = A_{ПК} p_{ДР1}(t) - C_{ПР,ПК} [x_{ПК}(t) + x_{0ПК}] - 2\mu_{ПК}^2 \pi x_{ПК}(t) [p_H(t) - p_{СЛ}] \cdot \cos \theta - \beta_{ПК} \dot{x}_{ПК}(t) - F_{ТРО,ПК} \text{sign } \dot{x}_{ПК}. \quad (8)$$

В уравнении $\mu_{ПК}$ – коэффициент расхода; ρ – плотность РЖ; $A_{Щ,ПК}(t)$ – площадь дросселирующей щели ПК; $p_{СЛ}$ – давление слива; $x_{ПК}(t)$, $d_{ПК}$, α – перемещение, диаметр и угол конусности ЗРЭ; μ_T – предельное значение коэффициента расхода при $\text{Re} \rightarrow \infty$; $\text{Re}_{К.ПК}$ – постоянная коэффициента коррекции; k_μ – начальное значение производной зависимости $\mu = f(\text{Re})$ при $\text{Re} \rightarrow 0$; $\text{Re}_{ПК} = 2\rho q_{ПК}(t) / \pi d_{ПК} \mu_{Ж}$ – число Рейнольдса; $\mu_{Ж}$ – коэффициент динамической вязкости РЖ; $m_{ПК}$ – масса подвижных частей плунжера ПК, приведенных к оси клапана; $A_{ПК}$ – площадь поперечного сечения проходного отверстия, перекрываемого ЗРЭ ПК; $C_{ПР,ПК}$ – жесткость пружины ПК, $x_{0ПК}$ – предварительное сжатие пружины ПК, θ – угол между вектором скорости потока через щель и осью золотника КД, $\beta_{ПК}$ – коэффициент вязкого трения ПК; $F_{ТРО,ПК}$ – модуль силы „сухого“ трения.

Остановимся подробнее на давлении $p_{ДР1}$ за дросселем 1.

При закрытом ПК

$$p_{ДР1}(t) = p_1(t) - \frac{A_{КД}^2 \rho \dot{x}_{КД}^2}{2\mu_{КД}^2 A_{ДР1}^2}, \quad (9)$$

а при открытом ПК -

$$p_{ДР1}(t) \approx p_1(t) - \frac{A_{ДР1}^2 p_1(t) + A_{Щ,ПК}^2 p_{СЛ}}{A_{Щ,ПК}^2 + A_{ДР1}^2}, \quad (10)$$

где $A_{КД}$ – площадь поперечного сечения плунжера КД, $x_{КД}$ – перемещение плунжера КД, $A_{ДР1}$ – площадь дроссельного отверстия Др₁.

Поэтому в математической модели ГА нужно предусмотреть переключение с уравнения (9) на (10) и наоборот. За сигнал переключения примем значение p_1 , соответствующее давлению настройки ПК. Необходимость контроля в модели ГА перемещения штока ГЦ в заданную позицию и включения (отключения) ПК приводят к переменной структуре модели.

Если разрешить уравнения модели ГА относительно одной переменной, то получим нелинейное дифференциальное уравнение 14-го порядка, для

однозначного рішення якого потрібно розпорядитися 14-тю початковими умовами (НУ). До початку перехідного процесу підйому НО і при включенні насосного агрегату всі змінні (фазові координати) ГА рівні нулю за винятком $p_H(0)$ і $x_{КД}(0)$. Вони визначаються з рівнянь руху золотника КД [3] і витрати ГА:

$$\ddot{x}_H(t) = [q_{HG} - C_{II} p_H(t) - q_{KD}(t) - q_{ГР.П}(t)] E_H / V_0, \quad (11)$$

які слід представити для статичного режиму.

Тут q_{HG} – геометрична подача насоса, C_{II} – коефіцієнт переточки насоса, E_H – модуль об'ємної пружності РЖ, V_0 – об'єм РЖ в каналах насоса, клапана тиску і каналі до входу в гідророзподільник, $q_{ГР.П}$ – витрата, що поступає з ГР в ГЦ.

З метою зменшення об'єму ілюстрацій проведених досліджень, на кожному наступному малюнку з 24 осцилограмм приводяться 4-5 найбільш важливих. На рис. 2 зображені криві змінних $x_{ГР1}(t)$, $p_H(t)$, швидкості і переміщення штока ГЦ $V_Z(t)$ і $y_Z(t)$ при підйомі НО на максимальну висоту 0,25 м при відсутності газової складової в РЖ ($m_0 = 0$), ступінчастим входним впливом $U_{BX} = 3,78 В$, коефіцієнтах посилення по напругі $K_1 = 5,45$ і $K_2 = 0,75$, коефіцієнтах зворотних зв'язків $K_{OZ} = 13,45 В/м$ і $K_{OГР} = 400 В/м$. Підйом починається з $t = 0,1 с$, що пов'язано з наявністю навантаження. Тиск p_H зростає до 20 МПа, а при поверненні золотника ГР в вихідне положення ($x_{ГР1} = 0$) зменшується до 0,7 МПа (розвантаження насоса). Процес підйому НО практично закінчується за $\sim 3 с$.

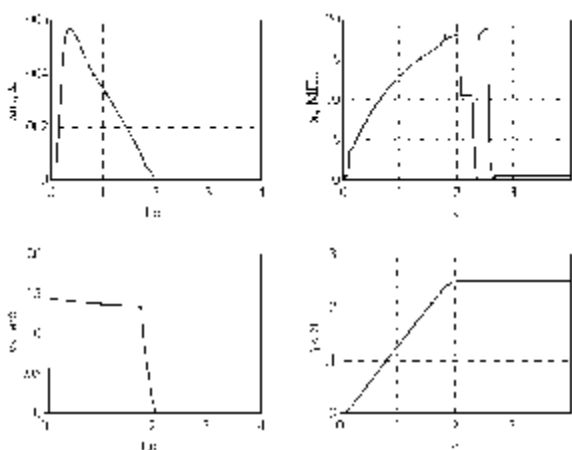


Рисунок 2 – Перехідні процеси $x_{ГР1}(t)$, $p_H(t)$, $V_Z(t)$ і $y_Z(t)$ при підйомі НО

Для оцінки частотних властивостей ГА розглянемо його реакцію на входне ступінчасте вплив гармонічної складової виду $a \sin \omega t$.

На рис. 3 показані осцилограми змінних $x_{ГР1}(t)$, току $i_1(t)$ електромагніта електрогідравлічного перетворювача, а також криві U_Y і гармонічної складової U_S . На вхід моделі ГА поступає вплив

$U_{BX} + U_S = 2,725 В + 2,5 \sin 6,28 t$ с амплітудою гармонічної складової 2,5 В і частотою в 1 Гц. За рахунок нелінійності перетворення входного сигналу коливання току i_1 з частотою 1 Гц суттєво відрізняються від синусоїдальних.

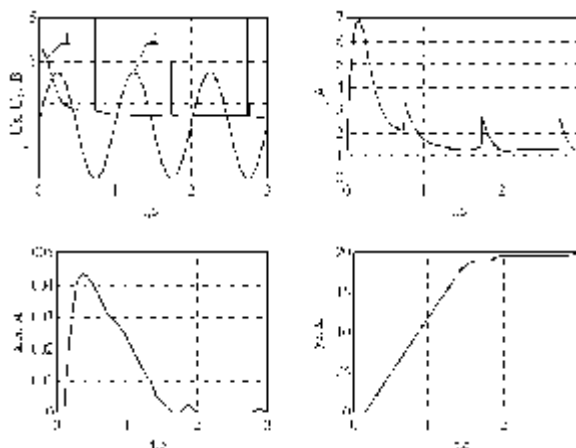


Рисунок 3 – Динамічні характеристики $x_{ГР1}(t)$, $i_1(t)$ і $y_Z(t)$ змінних ГА при підйомі НО при гармонічній складовій входного сигналу частотою в 1 Гц, крива 1 – U_Y , крива 2 – U_S

На кривій $x_{ГР1}$ коливання з невеликою амплітудою і частотою в 1 Гц з'являються в зоні наближення золотника ГР в нейтральне положення і також не мають синусоїдального характеру. На вихідному з'єднанні ГА, т. е. на переміщенні y_Z штока ГЦ, виникає одне коливання в кінці підйому. Таке проходження гармонічного сигналу через модель ГА підкреслює її нелінійність. При частоті гармонічної складової 10 Гц і тій же амплітуді 2,5 В ГА стає фільтром, не пропускаючим цю частоту (рис. 4). Тільки на кривій i_1 видно коливання з амплітудою практично в 15 раз менше, ніж на кривій i_1 (рис. 3).

Перевірка функціонування ПК виконувалася в режимі перевантаження при змінній силі опору F_{CZ} згідно з виразом

$$F_{CZ}(t) = \begin{cases} 180 \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \text{ кН при } 0 \leq t \leq 0,8 \text{ с,} \\ 180 \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + 10000 \text{ кН при } 0,8 \leq t \leq 2,3 \text{ с,} \\ 180 \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \text{ кН при } t > 2,3 \text{ с,} \end{cases} \quad (12)$$

де T – постійна часу, рівна 1 с.

На рис. 5 показаны осциллограммы переходных процессов $x_{ГР1}$, y_z , p_1 и $p_{ДР1}$ при подъеме НО с переменной нагрузкой F_{CZ} на основе выражения (12) с участком перегрузки в интервале времени (0,8; 2,3). При настроечном давлении ПК порядка 22 МПа и времени 0,8 с нагрузка скачком возрастает со 100 до 200 кН, а давление p_1 увеличивается с 12 до 22,5 МПа. ПК срабатывает, давление p_1 возрастает с ростом нагрузки. Давление $p_{ДР1}$ за $p_{ДР1}$ практически остается неизменным, что обеспечивает нормальное функционирование КД (рис. 1). После отработки задающего воздействия давление в линии LS снижается до нуля ($p_{ДР1} = 0$), а при $t = 2,3$ с перегрузка заканчивается.

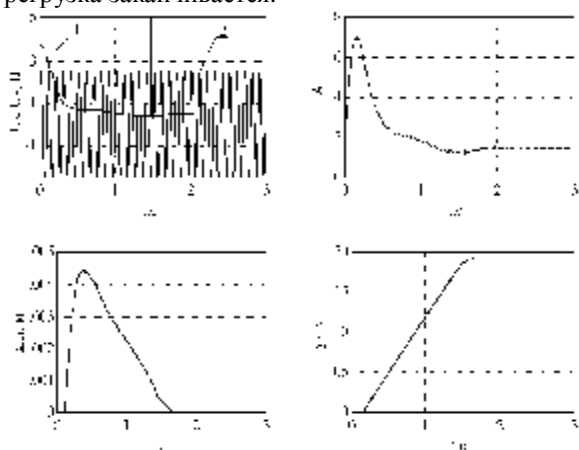


Рисунок 4 – Влияние гармонической составляющей входного сигнала U_s на динамические характеристики переменных $i_1(t)$, $x_{ГР1}(t)$, $y_z(t)$, $f = 10$ Гц : кривая 1 – U_y , кривая 2 – U_s

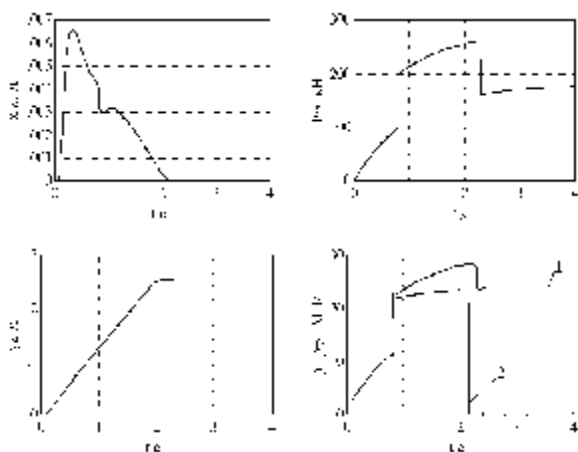


Рисунок 5 – Осциллограммы процессов ГА ($x_{ГР1}(t)$, $y_z(t)$, $p_1(t)$, $p_{ДР1}(t)$) при подъеме НО в режиме перегрузки (кривая F_{CZ}): 1 – давление p_1 , 2 – давление $p_{ДР1}$

Выводы. 1. Введенные в математическую модель ГА НО коррекции управляющего воздействия, сигнала о возвращении золотника ГР в нейтральное положение, предохранительного клапана и, в связи с этим, построение переменной структуры повышают адекватность модели натурному объекту.

2. Проведенные исследования динамических характеристик показали, что ГА является фильтром для входных гармонических сигналов, превышающих частоту 10 Гц.

3. Показано, что в режиме перегрузки, при срабатывании предохранительного клапана, в пружинной полости КД поддерживается более низкое давление, чем в полостях нагруженных цилиндров, что обеспечивает защиту насосного агрегата от повышения давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лурье З. Я., Цента Е. Н. Математическая модель узла «электрогидравлический преобразователь – золотник гидрораспределителя» гидроагрегата навесного оборудования трактора // Промислова гідрравліка і пневматика. – 2007. – № 3 (17). – С. 96 – 98.
2. Лурье З. Я., Цента Е. Н. Математическая модель узла «гидрораспределитель – гидроцилиндр» гидроагрегата навесного оборудования трактора // Вісник Східноукраїнського університету імені Володимира Даля. – 2007. – Ч. 2. – № 3 (109). – С. 89 – 93.
3. Лурье З. Я., Цента Е. Н. Математическая модель клапана давления гидроагрегата с чувствительностью к нагрузке // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета / Сб. науч. тр. – Харьков: ХНАДУ. – 2007. – Вып. 38. – С. 200 – 203.
4. Данилов Ю. А., Кирилловский Ю. Л., Колпаков Ю. Г. Аппаратура объемных гидроприводов. – М.: Машиностроение. – 1990. – 272 с.

Стаття надійшла 05.05.2008 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Саленком О.Ф.