НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ МГТУ ИМ. Н. Э. БАУМАНА
НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ
Эл № ФС77 - 48211. Государственная регистрация №0421200025. ISSN 1994-0408
электронный научно-технический журнал

# Динамика электрогидравлического регулятора давления

**# 01, январь 2013**
**DOI: 10.7463/0113.0517493**
**Андреев М. А., Семёнов С. Е.**
УДК.62-523.3

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана
andreev@e10-bmstu.ru

**Введение**

Электрогидравлический регулятор давления используется в следящих системах управления мобильной и стационарной техникой для поддержания давления инвариантно к расходу потребителя. Основные способы решения этой технической задачи в современной технике описаны в работах [1 - 3]. Широкое применение находят насосы с LS-регуляторами [2], которые позволяют менять поддерживаемое давление в широком диапазоне значений. Использование этих насосов, однако, затруднено в случае, когда требуется регулировать давление на входе нескольких потребителей. Подобная проблема встречается в гидросистеме регулирования давления полуактивной системы подрессоривания современных транспортных систем [4]. Решить данную задачу позволяет использование электрогидравлического усилителя с электрической обратной связью по давлению в гидроаккумуляторе. Авторам не удалось найти в литературе описание метода расчёта данного типа регулятора. Расчёты, которыми пользуются инженеры при проектировании регуляторов данного типа, часто приводят на испытаниях к появлению незатухающих колебаний в системе на тех частотах, на которых ожидался большой запас по устойчивости. В данной статье описывается динамика электрогидравлического регулятора давления, которая позволяет объяснить природу возникающих колебаний, а так же даются рекомендации по конструктивному исполнению объекта исследования.

## 1. Принцип работы электрогидравлического регулятора давления

Принципиальная схема регулятора показана на рисунке 1.

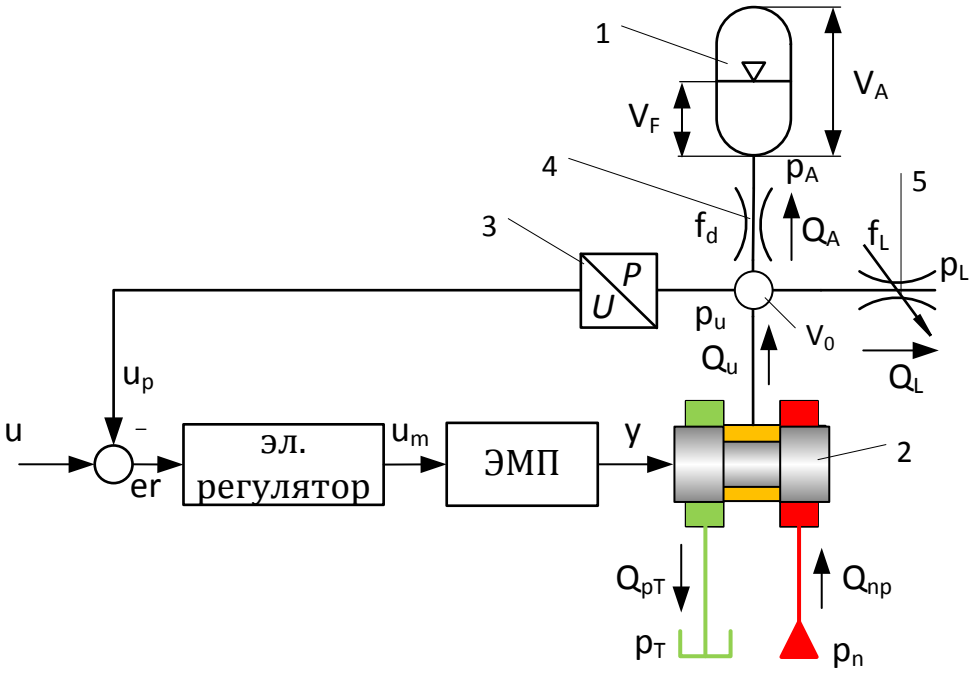



Рисунок 1 – Принципиальная схема регулятора давления

Регулятор состоит из пневмогидравлического аккумулятора 1, управляющего двухкромочного золотника 2, датчика давления 3. При изменении расхода потребителя $Q_L$ меняется давление $p_u$, датчик давления передаёт сигнал по отрицательной обратной связи для сравнения с задающим сигналом. Результат сравнения передаётся на электронный регулятор, который генерирует сигнал для электрогидравлического усилителя (ЭГУ), вызывая смещение золотника 2. В результате происходит соединение регулируемой полости либо с линией нагнетания, либо со сливной линией. Регулирование прекращается при достижении давления $p_u$ заданного. Ошибка регулирования в этом случае определяется параметрами электронного регулятора.

Конструктивно, гидроаккумулятор часто соединяют с распределительной плитой (в которой находится как распределитель, так и датчик давления) посредством трубопровода. Это позволяет удобнее скомпоновать регулятор, в особенности если предполагается его установка в ограниченном пространстве (например, отсек мобильной машины).

## 2. Описание математической модели

Ниже представлена линейная математическая модель регулятора, учитывающая сопротивление соединительного трубопровода, а так же инерцию рабочей жидкости в этом трубопроводе. Волновые процессы не учитываются [5]. Обозначения соответствуют рисунку 1:

$$\frac{dV_F(t)}{dt} = Q_A(t),$$

$$K_{Qp}^A \cdot \frac{\rho \cdot l_A}{f_A} \cdot \frac{dQ_A(t)}{dt} + Q_A(t) = K_{Qp}^A \cdot \left(p_u(t) - p_A(t)\right),$$

$$\frac{dp_u}{dt} = \frac{E_F}{V_0} \cdot \left(Q_u(t) - Q_A(t)\right),$$

$$p_A(t) = K_{pV} \cdot V_F(t),$$

$$Q_u(t) = K_{Qy} \cdot y(t) - K_{Qp} \cdot p_u(t),$$

$$Q_A(\mathrm{t}) = K_{Qp}^A \cdot \left(p_u(t) - p_A(t)\right).$$

Здесь $K_{Qp}^A$ – коэффициент линеаризации расходно-перепадной характеристики гидравлической линии 4;

$K_{pV}$ – коэффициент линеаризации характеристики гидроаккумулятора;

$K_{Qy}$, $K_{Qp}$ – коэффициенты линеаризации расходно-перепадной характеристики золотникового распределителя;

$l_A$ – длина гидравлической линии 4;

$\rho$ – плотность рабочей жидкости;

$f_A$ – площадь поперечного сечения гидравлической линии 4;

$E_F$ – модуль упругости рабочей жидкости;

$V_0$ – искусственно введённый объём жидкости.

Коэффициент линеаризации трубопровода 4 определяется формулой

$$K_{Qp}^{A} = \left.\frac{\partial Q_A(\Delta p)}{\partial p}\right|_{\Delta p=\Delta p^{\mathrm{PT}}} = \sigma_A \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\Delta p^{\mathrm{PT}}}},$$

где $Q_A(\Delta p) = \sigma_A \cdot \sqrt{|\Delta p|} \cdot sign(\Delta p)$ – нелинейная функция расходно-перепадной характеристики;

$\sigma_A$ – гидравлическая проводимость трубопровода;

$\Delta p^{\mathrm{PT}}$ – перепад давлений в окрестностях рабочей точки.

Коэффициент линеаризации гидроаккумулятора определяет выражение

$$K_{pV} = \left.\frac{\partial p_A(V_F)}{\partial V_F}\right|_{V_F=V_F{}^{\mathrm{PT}}} = n \cdot \frac{p_{zA}}{V_A} \cdot \left(1 - \frac{V_F{}^{\mathrm{PT}}}{V_A}\right)^{-n-1},$$

где $V_A$ – объём гидроаккумулятора;

$V_F{}^{\mathrm{PT}}$ – объём жидкости в гидроаккумуляторе в рабочей точке;

$p_{zA}$ – давление зарядки гидроаккумулятора;

$n$ – показатель политропы.

После преобразования перечисленных выше дифференциальных уравнений по Лапласу, можно представить математическую модель в виде структурной схемы, показанной на рисунке 2.

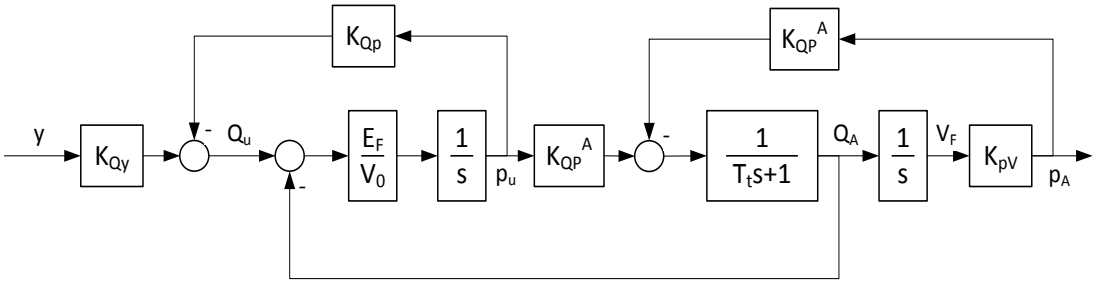



Рисунок 2 – Структурная схема линейной математической модели электрогидравлического регулятора давления

Упрощённая структурная схема показана на рисунке 3.

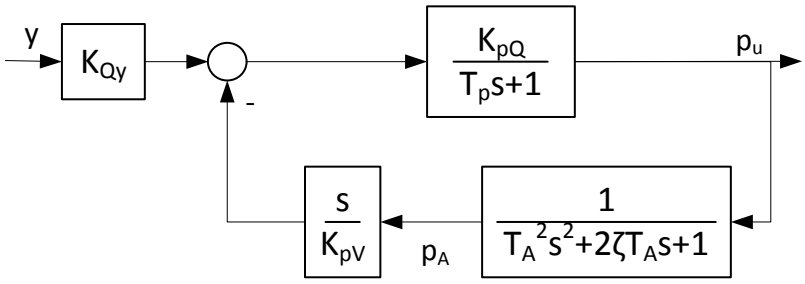



Рисунок 3 – Упрощённая структурная схема линейной математической модели аппаратной части электрогидравлического регулятора давления

На рисунках приняты следующие обозначения:

$T_t = K_{Qp}^A \cdot \frac{\rho \cdot l_A}{f_A}$ – постоянная времени гидравлической линии с учётом инерции рабочей жидкости;

$T_p = \frac{1}{K_{Qp}} \cdot \frac{V_0}{E_F}$ – постоянная времени искусственно введённого объёма жидкости;

$T_A = \sqrt{\frac{1}{K_{pV} \cdot K_{Qp}^A} \cdot T_t}$ – постоянная времени гидроаккумулятора с учётом инерции рабочей жидкости;

$\zeta_A = \frac{1}{2 \cdot K_{Qp}^A} \cdot \sqrt{\frac{K_{Qp}^A}{K_{pV}} \cdot \frac{1}{T_t}}$ – коэффициент демпфирования гидроаккумулятора с учётом инерции рабочей жидкости.

На рисунке 4 показана структурная схема математической модели аппаратной части электрогидравлического регулятора давления в составе следящей системы с П-регулятором.

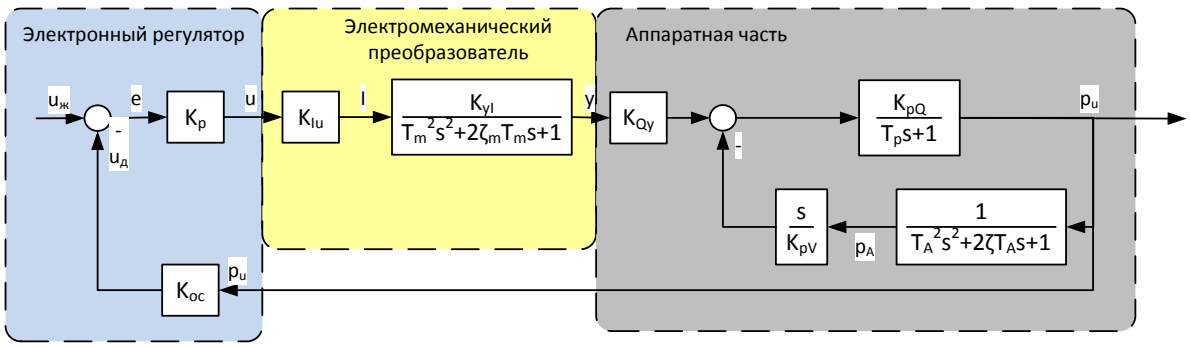
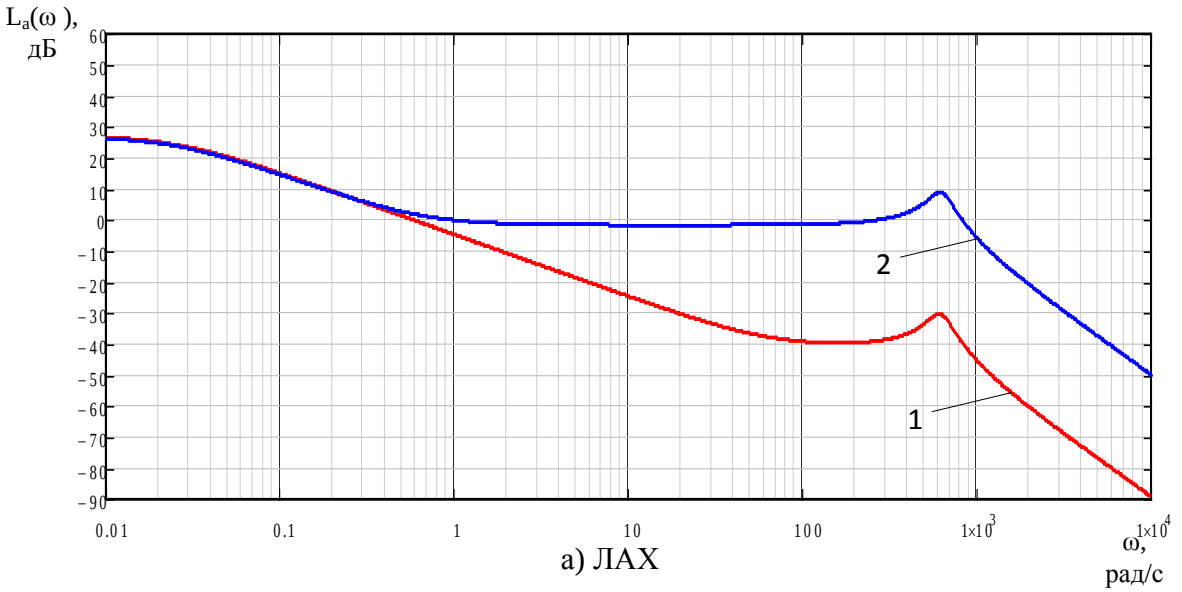


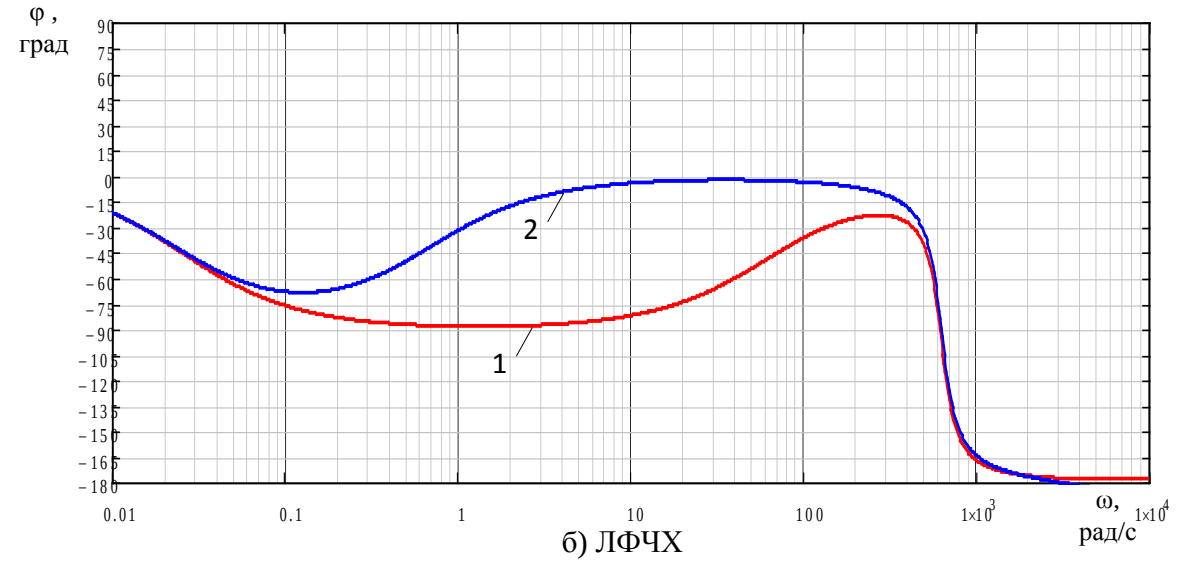

Рисунок 4 - структурная схема математической модели аппаратной части электро-гидравлического регулятора давления в составе следящей системы с П-регулятором.

### 3. Анализ динамики электрогидравлического регулятора давления

На рисунке 5 показано влияние сопротивления гидравлической линии на ЛАХ и ЛФЧХ разомкнутого контура регулятора давления с добротностью 23. Для более наглядного представления, инерция рабочей жидкости не учитывается.




а) ЛАХ



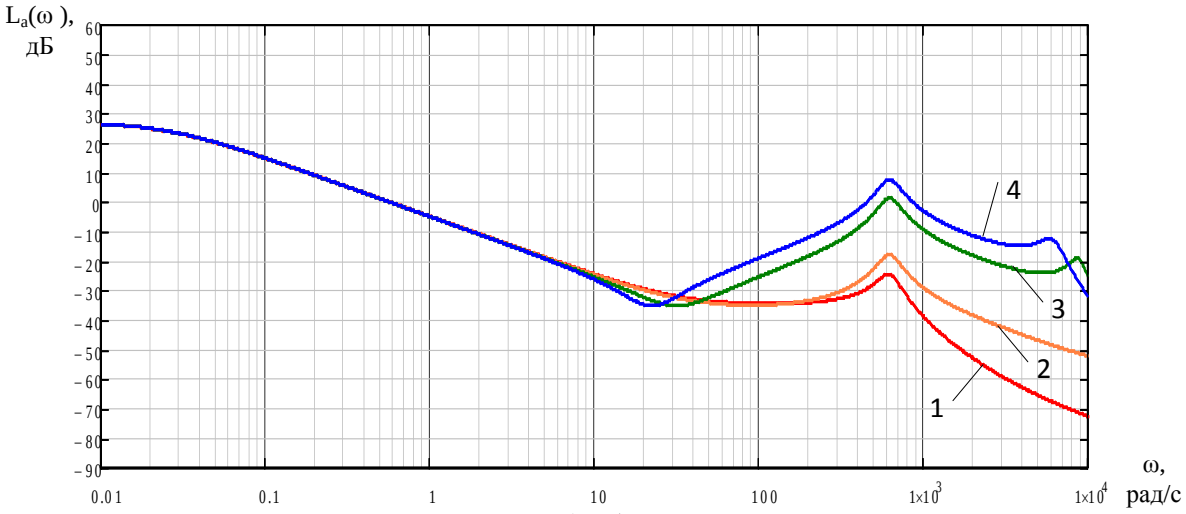

б) ЛФЧХ

1 – Проводимость гидравлической линии $\sigma_A$; 2 - Проводимость гидравлической линии $0{,}01\sigma_A$.

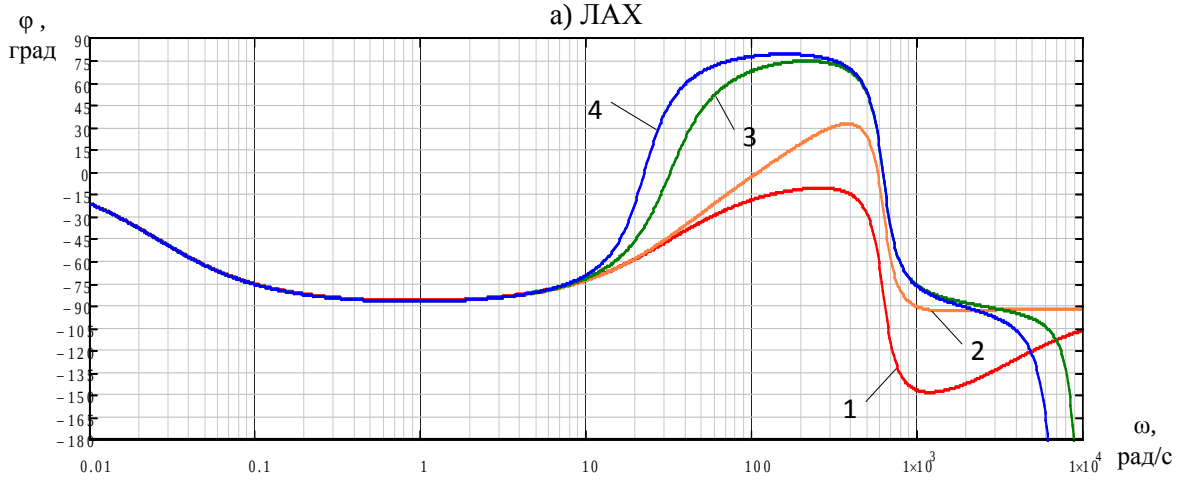
Рисунок 5 - ЛАХ и ЛФЧХ разомкнутого контура

Проводимость гидравлической линии зависит не только от конструктивных параметров гидролинии, но так же может меняться в процессе эксплуатации в зависимости от температуры. В случае работы на холодной рабочей жидкости, различие может доходить до двух порядков. Как видно из рисунка 5, такое изменение проводимости гидравлической линии существенно влияет на динамику системы и приводит к «задиранию» резонансного пика ЭГУ, что может вызвать колебания, в том числе незатухающие.

На рисунке 6 показано влияние параметров гидравлической линии с учётом инерционного напора на ЛАХ и ЛФЧХ разомкнутого контура регулятора давления. Для наглядности, сопротивление гидравлической линии принято постоянным.




а) ЛАХ




б) ЛФЧХ

1 – Параметр $\frac{l}{d^2} = C$, 2 – Параметр $\frac{l}{d^2} = 10 \cdot C$, 3 – Параметр $\frac{l}{d^2} = 100 \cdot C$,

4 – Параметр $\frac{l}{d^2} = 200 \cdot C$

Рисунок 6 - ЛАХ и ЛФЧХ разомкнутого контура

Основным параметром конструкции, определяющим влияние инерционного напора, является отношение длины трубопровода к квадрату его диаметра $\frac{l}{d^2}$. На рисунке 6 показано влияние изменения этого параметра от значения $C = 0{,}1\frac{1}{\text{мм}}$, что соответствует присоединению гидроаккумулятора непосредственно к плите, до значения $20\frac{1}{\text{мм}}$, встречающегося в некоторых конструкциях регуляторов. Как видно, увеличение параметра $\frac{l}{d^2}$ приводит к существенному искажению ЛАХ и ЛФЧХ в области частот резонансного пика ЭГУ, а так же приводит к перемещению в сторону низких частот резонансного пика гидроаккумулятора. Таким образом, близость собственных частот ЭГУ и гидроаккумулятора может привести к явлению резонанса.

**Выводы**

Основными выводами данной работы являются следующие.

1) В электрогидравлическом регуляторе давления возможно возникновение незатухающих колебаний, частота которых зависит от параметров гидравлического сопротивления между распределительным устройством и гидроаккумулятором.

2) В случае соединения гидравлического аккумулятора с распределительным устройством трубопроводом, существенное влияние на динамические характеристики регулятора оказывает инерционный напор жидкости.

3) При расчёте регулятора давления особое внимание необходимо уделять разнице собственных частот ЭГУ и гидроаккумулятора.

**Список литературы**

1. Finzel R. Elektrohydraulische Steuerungssysteme für mobile Arbeitsmaschinen. Aachen : Schaker Verlag, 2011. 17 p.

2. Helduser S. Fluidtechinsche Antriebe und Steurungen. Dresden : Technische Universitaet Dresden, 2009.

3. Шумилов И.С. Системы управления рулями самолётов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 469 с.

4. Жилейкин М.М. Повышение быстроходности многоосных колесных машин путем адаптивного управления упругодемпфирующими элементами системы

подрессоривания : автореф. дис. … докт. техн. наук / МГТУ им. Н.Э. Баумана. М., 2012. 33 с.

5. Попов Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. М.: Машиностроение, 1987. 464 с.

SCIENTIFIC PERIODICAL OF THE BAUMAN MSTU

SCIENCE and EDUCATION

EL № FS77 - 48211. №0421200025. ISSN 1994-0408

electronic scientific and technical journal

# Dynamic processes in an electrohydraulic pressure controller with electric pressure feedback

**# 01, January 2013**

**DOI: 10.7463/0113.0517493**

**Andreev M.A., Semenov S. E.**

Russia, Bauman Moscow State Technical University

andreev@e10-bmstu.ru

The article gives a description of dynamic processes in the electrohydraulic pressure controller with electric pressure feedback. Linear equations of the lumped-parameter mathematical model, allowing for inertia of fluid in the connecting pipeline in lumped parameters, were composed. The authors analyzed the effect of different factors on stability of the system. The conducted research showed that the electrohydraulic pressure regulator might experience sustained oscillations; their existence depends on parameters of hydraulic resistance of the connecting pipeline regulator. Special attention should be paid to the difference of natural frequencies of amplifier and electro hydraulic accumulators.

**Publications with keywords:** hydraulic machinery, dynamic of the hydraulic machinery, pressure regulator, mechatronics
**Publications with words:** hydraulic machinery, dynamic of the hydraulic machinery, pressure regulator, mechatronics

References

1. Finzel R. *Elektrohydraulische Steuerungssysteme für mobile Arbeitsmaschinen*. Aachen : Schaker Verlag, 2011. 17 p. (in German).

2. Helduser S. *Fluidtechinsche Antriebe und Steurungen*. Dresden : Technische Universitaet Dresden, 2009. (in German).

3. Shumilov I.S. *Sistemy upravleniia ruliami samoletov* [Steering system of aircraft]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2009. 469 p.

4. Zhileikin M.M. *Povyshenie bystrokhodnosti mnogoosnykh kolesnykh mashin putem adaptivnogo upravleniia uprugo-dempfiruiushchimi elementami sistemy podressorivaniia. Avtoreferat dokt. diss*. [Increase of speed of multiaxial wheeled machines through adaptive control of elastic damping elements of the system of cushioning. Abstract of dr. diss.]. , Moscow, Bauman MSTU, 2012. 33 p.

5. Popov D.N. *Dinamika i regulirovanie gidro- i pnevmosistem* [Dynamics and regulation of hydro - and pneumatic systems]. Moscow, Mashinostroenie, 1987. 464 p.