

УДК 62-522.2

Метод экспериментального определения частотных характеристик гидропривода

*Жутов В.В., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Гидромеханика, гидромашины и гидропневмоавтоматика»*

*Научный руководитель: Щербачев П.В., ассистент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
vyaroz@bmstu.ru*

Введение

При проектировании систем важную роль играют амплитудно-фазовые частотные характеристики, необходимые для решения задач устойчивости и обеспечения быстродействия. Одним из наиболее важных элементов, рассматриваемых в технике систем, является исполнительный механизм. В роли исполнительного механизма обычно выступают электрические, гидравлические или пневматические приводы. Именно частотные характеристики привода представляют особый интерес при анализе систем.

Метод экспериментального определения частотных характеристик гидропривода

Рассмотрим метод получения частотных характеристик.

Для этого, как правило, применяют гармоническое входное воздействие

$$u = a_u \sin \omega t, \quad (1)$$

где a_u и ω – амплитуда и угловая частота входного воздействия.

Такое воздействие по сравнению с другими видами детерминированных сигналов проще осуществить при проведении экспериментов и позволяет при минимальном объеме вычислений получить характеристики, достаточно полно отражающие динамические свойства системы.

В теории при гармоническом входном воздействии (1) согласно решению (2) уравнения динамики (3)

$$y(t) = y_{ce}(t) + y_e(t), \quad (2)$$

где $y_{ce}(t)$ и $y_e(t)$ – свободная и вынужденная составляющие рассматриваемого процесса, зависящие от динамических свойств элемента или системы и закона входного воздействия

$$D(p)y = M(p)u, \quad (3)$$

где u и y – входная и выходная величины, $D(p)$ называется собственным оператором, а $M(p)$ – оператором воздействия. Отношение этих двух операторов определяет передаточную функцию элемента или системы $W(p) = M(p)/D(p)$,

в отклике системы можно выделить две составляющие. Одна из них $y_{ce}(t)$, определяемая общим решением однородного дифференциального уравнения, описывает свободное движение, возникающее в системе после приложения гармонического входного воздействия. Вторая составляющая $y_e(t)$ описывает вынужденное движение системы, которое определяется частным решением уравнения (3) и вследствие линейности уравнения (3) будет гармонической, но в общем случае отличающейся от входного гармонического сигнала по амплитуде и фазе:

$$y_e(t) = a_y \sin(\omega t + \varphi), \quad (4)$$

где a_y и φ – амплитуда выходной величины и сдвиг ее по фазе относительно входной величины.

Если система устойчива, то при $t \rightarrow \infty$ составляющая $y_{ce}(t)$ будет стремиться к нулю и закон изменения выходной величины во времени будет приближаться к установившемуся гармоническому (4).

Зависимости от частоты отношения $A = \frac{a_y}{a_u}$ амплитуд выходной и входной величин, а также сдвига φ по фазе дают полную картину динамических свойств системы.

Интересующий нас в данной статье исполнительный механизм также представляет собой динамическую систему.

В реальном процессе проектирования гидропривод является нелинейной системой, в которой при синусоидальном входном сигнале на выходе имеется периодический несинусоидальный сигнал. Указанное обстоятельство препятствует получению частотных характеристик гидроприводов традиционным методом, применяемым для линейных систем.

Для исследования таких систем применяют метод гармонической линеаризации. Суть метода заключается в следующем. Предположим, что состояние какого-либо устройства описывается нелинейным уравнением

$$y = F\left(u, \frac{du}{dt}\right). \quad (6)$$

При гармоническом законе изменения выходной величины

$$u = a_u \sin \psi, \quad \psi = \omega t \quad (7)$$

имеем

$$\frac{du}{dt} = a_u \omega \cos \psi \quad (8)$$

Закон изменения выходной величины y при входном сигнале (7) будет периодическим, но не гармоническим, так как уравнение (7) является нелинейным. Разложим нелинейную функцию в правой части уравнения (7) в ряд Фурье и удержим в этом разложении только те члены, которые соответствуют постоянной составляющей выходной величины и составляющей, изменяющейся с частотой ω , так называемой первой гармоникой. Тогда с точностью до высших гармоник получим закон изменения выходной величины в виде

$$y = \frac{b_0}{2} + b_1 \cos \psi + b_2 \sin \psi, \quad (9)$$

где b_0 , b_1 , b_2 – коэффициенты ряда Фурье, определяемые по известным из гармонического анализа соотношениям:

$$b_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} F(a_u \sin \psi, a_u \omega \cos \psi) d\psi;$$

$$b_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(a_u \sin \psi, a_u \omega \cos \psi) \cos \psi d\psi;$$

$$b_2 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(a_u \sin \psi, a_u \omega \cos \psi) \sin \psi d\psi.$$

Из соотношений (7) и (8) следует, что

$$\sin \psi = \frac{u}{a_u}; \quad \cos \psi = \frac{1}{a_u \omega} \frac{du}{dt},$$

Используя эти соотношения и принимая $b_0 = 0$, функцию (9) представим в виде

$$y = q(a_u, \omega)u + \frac{q_1(a_u, \omega)}{\omega} \frac{du}{dt}, \quad (10)$$

где

$$q(a_u, \omega) = \frac{b_2}{a_u}; \quad (11)$$

$$q_1(a_u, \omega) = \frac{b_1}{a_u}. \quad (12)$$

В результате выполненных операций нелинейное уравнение (6) с точностью до высших гармоник заменено линейным уравнением (10), коэффициенты которого $q(a_u, \omega)$ и $q_1(a_u, \omega)$ являются функциями амплитуды и частоты гармонического входного сигнала (7) и называются коэффициентами гармонической линеаризации.

В основе метода гармонической линеаризации лежит предположение о действии на входе в нелинейное звено гармонического сигнала. На выходе нелинейного звена сигнал, кроме первой гармоники, содержит спектр гармонических составляющих с более высокими частотами. При замкнутом контуре системы эти высшие гармоники не будут существенно искажать гармонический сигнал на входе в нелинейное звено только в том случае, если они, проходя через линейные звенья, включенные в системе до или после нелинейного звена, значительно уменьшаются по амплитуде, т.е. фильтруются. Выполнение этого условия, называемого гипотезой фильтра, является обязательным, если при исследовании системы методом гармонической линеаризации не проводится уточнение получаемых результатов с учетом высших гармоник. Линейная часть системы удовлетворяет гипотезе фильтра, если

$$\frac{a_{y,k}}{a_{y,1}} \frac{|W_n(jk\omega)|}{|W_n(k\omega)|} \ll 1, \quad (5)$$

где $a_{y,1}$ – амплитуда первой гармоники на выходе нелинейного звена; $a_{y,k}$ – амплитуда k -й гармоники на выходе нелинейного звена; $W_n(j\omega)$ – амплитудно-фазовая частотная характеристика линейной части системы.

В общем случае условие (5) должно быть выполнено при $k \geq 2$, а если рассматриваются симметричные колебания, когда в выходном сигнале нелинейного звена отсутствуют четные гармоники, то при $k \geq 3$.

Если в системе управления выполняется правило фильтра, то частотные характеристики нелинейного привода можно получить, разложив периодический выходной сигнал в ряд Фурье и принять для использования первую гармонику колебания.

Для отработки метода гармонической линеаризации были сняты экспериментальные данные со стенда, схема которого представлена на рис. 1.

Предлагаемый электрогидравлический привод предназначен для вращения больших инерционных нагрузок в широком диапазоне угловых скоростей. В зависимости от задачи, привод может работать в различных режимах:

- слежение по углу поворота выходного вала;
- слежение по угловой скорости вращения выходного вала.

Привод состоит из следующих основных элементов:

- исполнительная часть;
- распределяющие устройства;
- электронная система управления.

В качестве исполнительной части могут использоваться как минимум два гидроцилиндра 3 двустороннего действия, работающих совместно на один коленчатый вал 1, кривошипы которого повернуты на 90 градусов друг относительно друга.

Стенд с компьютером для управления и сбора данных показан на рисунке 2. Данные с датчика угла поворота выходного вала поступают в компьютер дискретно с периодом 1 мс.

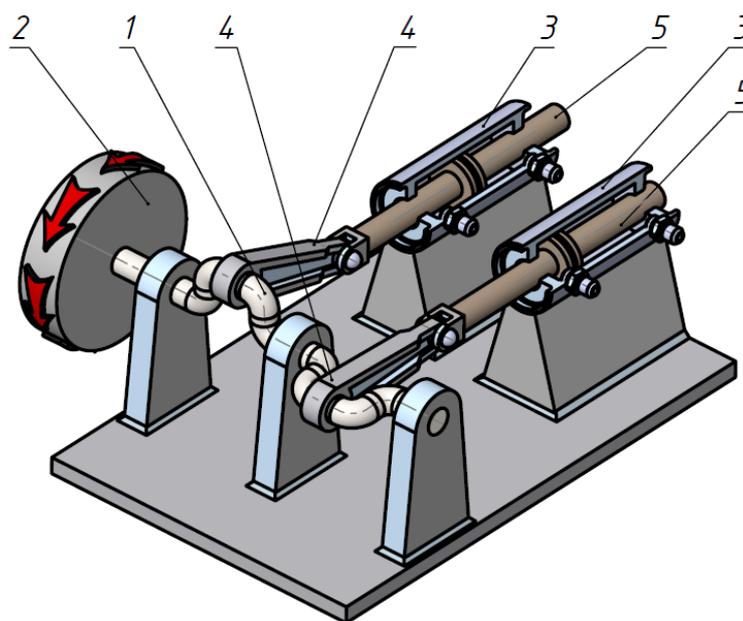


Рис. 1. Схема привода



Рис. 2. Стенд с компьютером для управления и сбора данных



Рис. 3. Исполнительный механизм привода

При проведении эксперимента на вход привода подавался гармонический сигнал $u = \frac{\pi}{12} \sin(2\pi ft)$, где частота f изменялась в соответствии с законом $f = 10^n$, где $n = -0,6; -0,4 \dots 0,8; 1,0$. Выходной сигнал, которым является показание датчика угла поворота вала, в этом случае представляет собой периодическую негармоническую

зависимость. Воспользовавшись правилом фильтра, полученные данные раскладывались в ряд Фурье с удержанием для дальнейшего анализа только первой гармоники.

В качестве примера показано разложение в ряд Фурье экспериментальных данных и выделение первой гармоники для сигнала с частотой 0,25 Гц.

Входной сигнал показан пунктирной линией на рисунке 4.

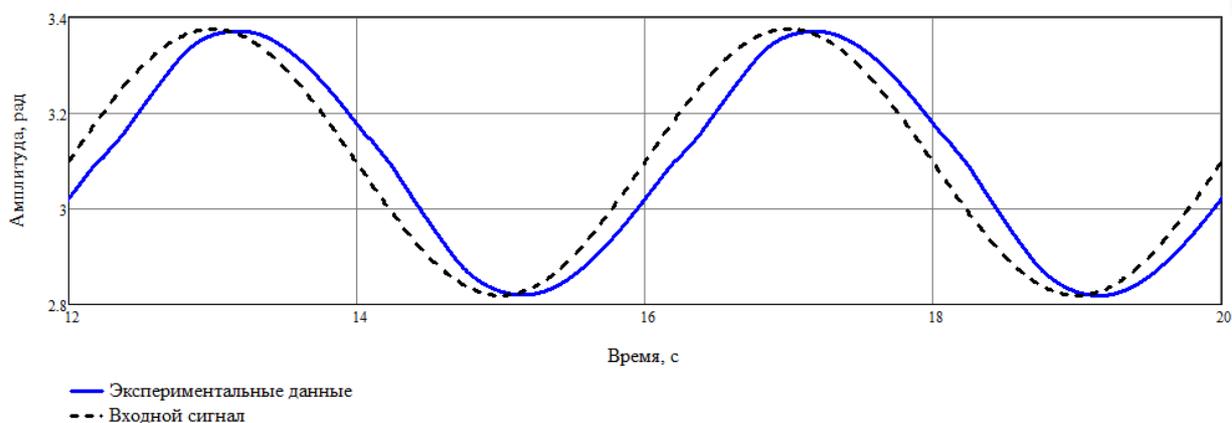


Рис. 4. Входной сигнал и экспериментальные данные для частоты 0,25 Гц

На рисунке 5 показан один период колебаний выходного звена и его разложение в ряд Фурье с удержанием первой гармоники.

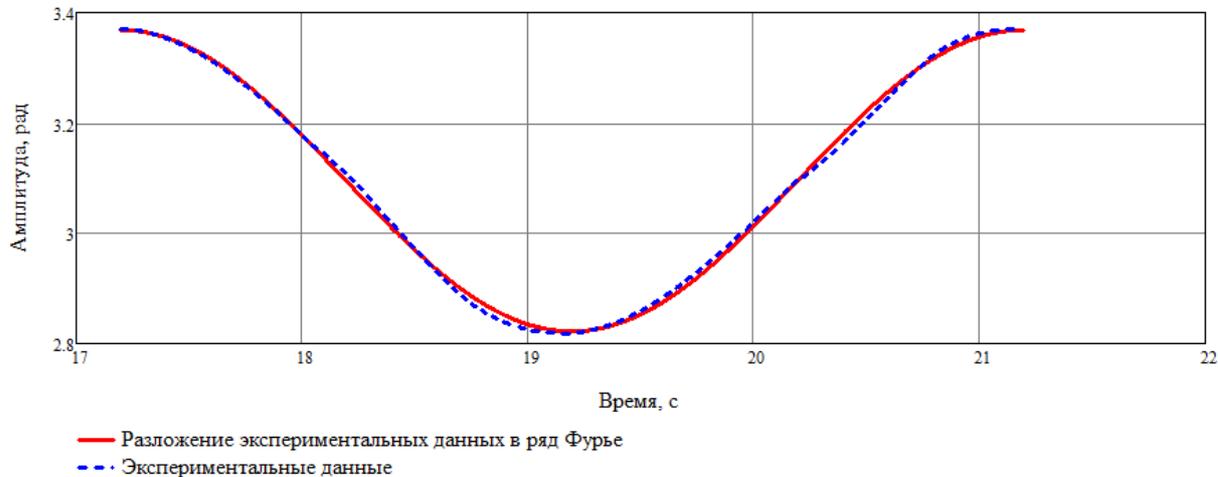


Рис. 5. Разложение экспериментальных данных в ряд Фурье

Для каждой частоты рассчитываются коэффициенты Фурье первой гармоники. По этим коэффициентам определяется амплитуда и фаза выходного сигнала привода.

$$A_{\text{вых}} = \sqrt{(b_1^1)^2 + (b_2^1)^2}, \text{ где } b_1, b_2 - \text{коэффициенты ряда Фурье для первой гармоники;}$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{b_1^1}{b_2^1}\right) - \text{сдвиг фазы.}$$

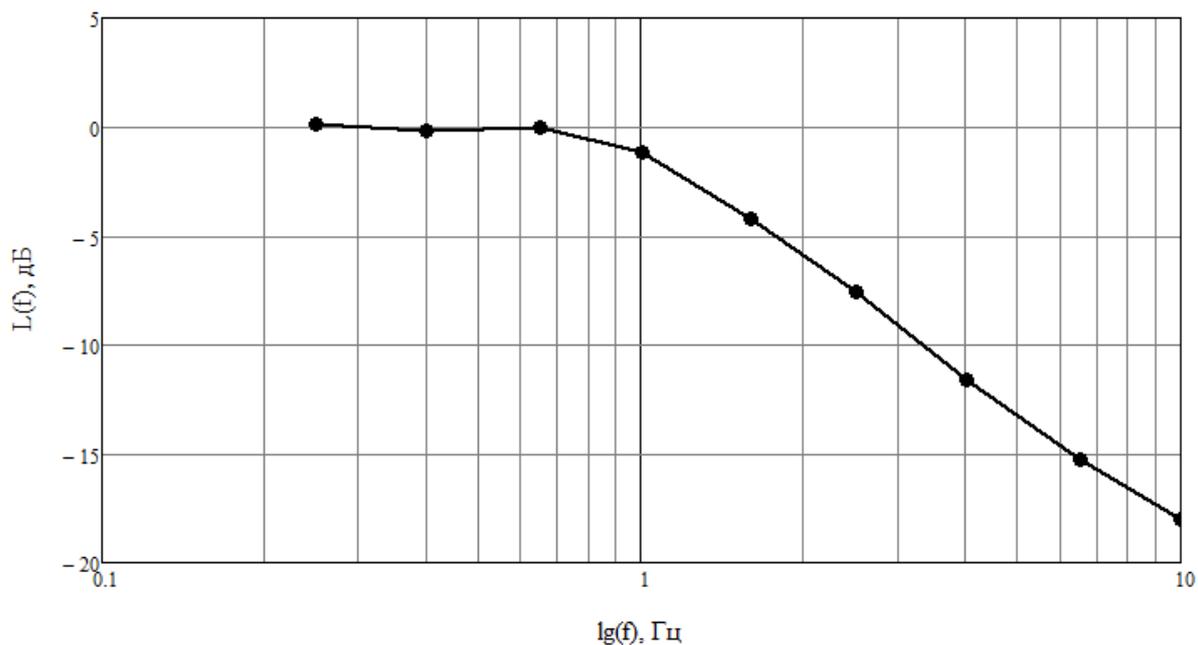


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика

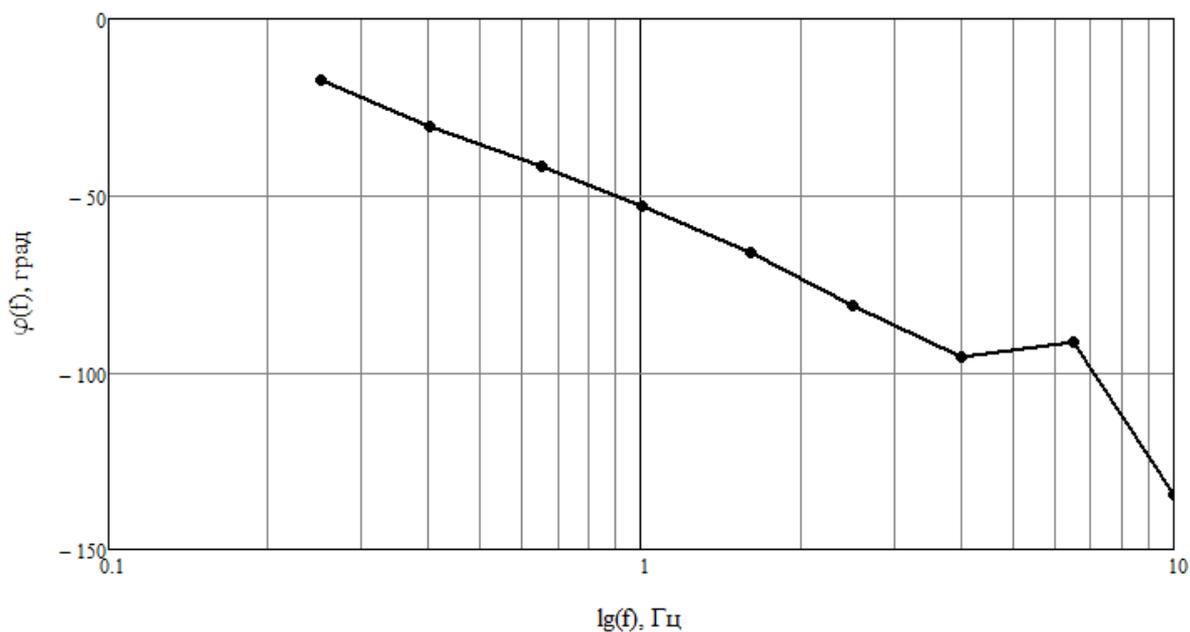


Рис. 7. Фазо-частотная характеристика

Заключение

Рассмотренный в статье метод позволяет экспериментально получить частотные характеристики нелинейных систем. В большинстве случаев достаточно анализировать только первую гармонику сигнала. При необходимости имеется возможность исследовать влияние высших гармоник. В данной статье метод был опробован при снятии частотных характеристик электрогидравлического следящего привода.

Список литературы

1. Попов Д.Н., Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем: Учебник для вузов по специальностям «Гидропневмоавтоматика и гидропривод» и «Гидравлические машины и средства автоматики». – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1987. – 464 с. ил.
2. Динамика следящих приводов: Учеб. пособие для вузов/Б.И. Петров, В.А. Полковников, Л.В. Рабинович и др.; Под ред. Л.В. Рабиновича. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. – 496 с.
3. Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика // Тез. докл. XII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 96 с.