

УЧЕТ СИЛ ТРЕНИЯ ПРИ АНАЛИЗЕ ДИНАМИКИ ГИДРОПРИВОДОВ

В.В. Дубинский, С.П. Кулинич

Задачи теоретического исследования гидравлического привода определяют метод формализации процессов, протекающих в его элементах, в частности, метод учета сил трения при анализе динамики движения выходного звена. При рассмотрении сил, действующих на выходное звено гидравлического привода сила трения разбивается на две составляющие – силу вязкого трения и силу контактного трения.

Сила вязкого трения P_v в элементах гидравлического привода обычно линейно зависит от скорости его движения и описывается зависимостью вида

$$P_v = k_v v, \quad (1)$$

где k_v – коэффициент вязкого трения, v – скорость движения.

Сила сухого трения P_{mp} является существенно нелинейной и, в большинстве случаев, не может аппроксимироваться линейной зависимостью (1). При исследовании нелинейных моделей гидравлических приводов методом гармонической линеаризации силу сухого трения обычно аппроксимируют нелинейной зависимостью вида

$$P_{mp} = |P_{mp}| \operatorname{sgn}(v). \quad (2)$$

Формула (2) нередко применяется также при составлении нелинейных моделей с последующим исследованием их численными и комбинированными методами. Анализ результатов исследования динамики гидравлических приводов показывает, что формула (2) справедлива при всех значениях скорости, кроме $v = 0$, так как в этом случае $\operatorname{sgn}(v) = 0$ и, соответственно,

$P_{mp} = 0$, что противоречит физической природе силы контактного трения.

При старте элемента гидравлического привода, когда его скорость равна нулю, сила контактного трения препятствует началу его движения и направлена в сторону, противоположную направлению действия активной силы

P_a . Поэтому в работах К.Л. Навроцкого и Ю.И. Чупракова предложено нелинейную силу контактного трения аппроксимировать зависимостью

$$P_{mp} = \begin{cases} |P_{mp}| \operatorname{sgn}(v) & \text{при } v \neq 0 \\ |P_{mp}| \operatorname{sgn}(P_a) & \text{при } v = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Однако такая аппроксимация силы контактного трения имеет один существенный недостаток. При $|P_{mp}| > |P_a|$ подстановка P_{mp} , полученного

по формуле (3) в уравнение движения выходного звена гидравлического привода $m\dot{v} = P_a - P_{mp}$ приводит к тому, что движение должно происходить под действием силы трения в направлении, противоположном направлению действия активной силы, что противоречит физической природе явления. В результате, при исследовании динамики движения гидравлического привода, получаются расчетные колебания выходного звена в районе зоны остановки. Эти колебания никак не связаны с неустойчивостью привода, а обусловлены некорректностью аппроксимации силы контактного трения по формуле (3). При этом результаты расчета динамических характеристик гидравлического привода искажаются. Аппроксимация силы контактного трения зависимостью

$$P_{\dot{v}} = \begin{cases} |P_{\dot{v}}| \operatorname{sgn}(v) & \dot{v} \neq 0 \\ P_a & \dot{v} = 0 \quad \text{è} \quad |P_{\dot{v}}| > |P_a| \\ |P_{\dot{v}}| \operatorname{sgn}(P_a) & \dot{v} = 0 \quad \text{è} \quad |P_{\dot{v}}| < |P_a| \end{cases}, \quad (4)$$

позволяет исключить возникновение расчетных колебаний, связанных с некорректным учетом силы контактного трения. При необходимости можно учесть также отличие силы контактного трения в момент страгивания выходного звена гидравлического привода от силы трения при его движении. Для этого в формуле (4) при $v \neq 0$ подставляется значение силы контактного трения, возникающей при движении выходного звена гидропривода $P_{mp,\dot{v}}$, а при $v = 0$ – силу контактного трения, возникающую при страгивании элемента.

Расчеты динамических характеристик гидравлических приводов с использованием формулы (4) для учета силы контактного трения показали, что она выступает стабилизирующим фактором, уменьшающим время переходного процесса и повышающим устойчивость привода, в отличие от других методик учета сил контактного трения.

Предложенная методика аппроксимации силы контактного трения может быть рекомендована для анализа динамических процессов в гидравлических усилителях мощности, гидравлических следящих приводах, останов выходных звеньев которых не регламентирован жесткими упорами.