

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ВЯЗКОСТЬ РАБОЧИХ ЖИДКОСТЕЙ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ЭГД ПРЕОБРАЗОВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ

Принцип действия разрабатываемых новых дроссельных электрогидродинамических (ЭГД) электрогидравлических преобразователей, не содержащих инерционных и ненадежных подвижных элементов, основан на изменении гидравлического сопротивления протеканию диэлектрической жидкости на участке напорного трубопровода при приложении к ней продольного или поперечного электрического поля.

При приложении к диэлектрической рабочей жидкости гидросистем поперечного электрического поля можно ожидать увеличения гидравлического сопротивления движению жидкости в первом приближении под влиянием двух составляющих, связанных с микро – и макропроцессами, происходящих в рабочей жидкости под действием поля. Следовательно, для потерь напора по длине в результате изменения сопротивления движущейся жидкости (ΔH) можно записать

$$\Delta H = \left(\Delta H_{11} + \Delta H_{12} \right) \Delta H_2, \quad (1)$$

где ΔH_{11} – потери напора за счет увеличения коэффициента вязкости жидкости вследствие ориентирующего действия поля на дипольные молекулы рабочей жидкости; ΔH_{12} – потери напора за счет гидродинамического воздействия на поток жидкости вследствие взаимодействия дипольных моментов и электрического поля в жидкости; ΔH_2 – потери напора в результате изменения режимов течения жидкости (считаем, что до приложения электрического поля поток жидкости в исследуемом канале был ламинарным).

Для ламинарного потока потеря напора по длине выражается формулой Пуазейля и прямо пропорциональна кинематическому коэффициенту вязкости жидкости $\nu = \mu/\rho$, где μ, ρ – динамический коэффициент вязкости и плотность рабочей жидкости, соответственно.

Отсутствие общей теории жидкого состояния привело к тому, что до настоящего времени пока не удалось разработать точные, теоретически обоснованные методы расчета коэффициентов вязкости. В многочисленных работах показано, что динамический коэффициент вязкости жидкостей связан с потенциалом межмолекулярных сил. По Грину величина динамического коэффициента вязкости μ пропорциональна $\exp \left[-W_r / kT \right]$, где W_r – энергия взаимодействия двух молекул, находящихся на расстоянии r ; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

В силу того, что минеральные масла гидросистем являются слабополярными жидкостями, для вычисления величины W_r можно воспользоваться формулой Леннарда-Джонса

$$W_r = 4a \left(\frac{c}{r} \right)^{12} - \left(\frac{c}{r} \right)^6,$$

где a, c – постоянные сил, зависящие от взаимодействия молекул, которые обычно определяются экспериментально. Поэтому практическое применение известных формул для расчета вязкости встречает серьезные затруднения.

Увеличение динамического коэффициента вязкости рабочей жидкости в электрическом поле оценим по методике Панченкова, в которой предполагается, что вязкость обусловлена переносом количества движения за счет временного объединения близлежащих молекул. Для образования таких объединений необходимо не только чтобы кинетическая энергия молекул была меньше энергии связи, но и чтобы молекулы были

определенным образом ориентированы относительно друг друга для возникновения сил притяжения между ними.

Для динамического коэффициента вязкости имеем $\mu = c_1 \exp \left[-W_0 / RT \right]$, где W_0 – энергия связи; R – универсальная газовая постоянная; c_1 – коэффициент. Вероятность образования связи (вероятность объединения молекул) $\delta_1 = N_1 / N = 1 - \exp \left[-W_0 / RT \right]$, где N_1 – число молекул, энергия которых меньше энергии связи; N – общее число молекул.

При помещении рабочей жидкости в электрическое поле вследствие ориентирующего действия поля коэффициент ее вязкости должен возрасти. Для качественной оценки ориентирующего действия поля воспользуемся дипольной теорией Дебеля, согласно которой с учетом результатов исследований Сосинского можно получить

$$\frac{n/n_0}{\alpha=0} = \frac{n - n_0}{n_0} \alpha=0 = \left\{ \exp \left[\frac{p E'}{RT} \right] \right\}^{-1}, \quad (2)$$

где n, n_0 – число молекул, оси которых лежат в определенном телесном угле при наличии поля и при его отсутствии; α – угол между направлением поля и направлением дипольной оси молекулы; p – дипольный момент молекулы; E' – поле, действующее на молекулу, $E' = \epsilon + 2 \epsilon E / 3$.

Для широко используемого в гидросистемах индустриального масла при $E = 10^7$ В/м, $T = 300^\circ$ С, $\epsilon = 2,2$, $k = 1,37 \cdot 10^{-16}$ из (2) имеем $\frac{n/n_0}{\alpha=0} = 0,0012 = 0,12\%$.

Таким образом, ориентирующее действие электрического поля оказывает незначительное влияние на величину динамического коэффициента вязкости, а следовательно, на величину потерь ΔH_{11} напора по длине трубопровода при движении жидкости (см. выражение (1)).

Величину ΔH_{12} (см. (1)) можно вычислить, используя уравнение Борна, учитывающее взаимодействие электрического поля с дипольными молекулами рабочей жидкости.

В случае течения жидкости через узкий кольцевой канал при приложении к его стенкам электрического напряжения на основании решения уравнения Борна имеем

$$\frac{\Delta \mu}{\mu_0} = \frac{p \epsilon + 2 U}{6 k T r_1^2} \frac{\left[-\epsilon x \ln x \right]^2 - 1}{\left(\ln x \right)^2 - 1 - \left(\epsilon^2 - 1 \right) \ln x}, \quad (3)$$

$\Delta \mu$ – изменение динамического коэффициента вязкости при напряжении $U \neq 0$ на электродах; μ_0 – динамический коэффициент вязкости жидкости при $U = 0$; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость рабочей жидкости; $x = r_2 / r_1$, r_2, r_1 – радиусы внешнего и внутреннего электродов.

Для индустриального масла при $E = 10^7$ В/м, $T = 300^\circ$ С, $\epsilon = 2,2$, $k = 1,37 \cdot 10^{-16}$, $r_2 = 7,9 \cdot 10^{-3}$ м, $r_1 = 6,9 \cdot 10^{-3}$ м из (3) имеем $\Delta \mu / \mu_0 = 0,02\%$.

Таким образом можно заключить, что изменение коэффициента вязкости рабочей жидкости под действием электрического поля незначительно и в первом приближении можно считать в (1) $\left(H_{11} + \Delta H_{12} \right) \approx 0$. В основу же построения ЭГД преобразователей электрического сигнала в гидравлический целесообразно положить управление величиной ΔH_2 за счет изменения ЭГД воздействием режимов течения потока рабочей жидкости систем управления.

Работа выполнена в соответствии с грантами РФФИ 06-08-01234-а, 07-08-12001-офи.