XXXI Неделя науки СПбГПУ. Материалы межвузовской научной конференции. Ч. III: С. 106-108, 2003.

УДК 624.2.0012

У Линьяо (6 курс, каф.ТММ), А.В. Ащеулов, к.т.н., доц., В.А. Терешин, к.т.н., доц.

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РАЗВОДКОЙ ТРОИЦКОГО МОСТА В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ

Работа явилась результатом пуско-наладочных мероприятий при ремонте Троицкого моста, в которых ее авторы принимали участие. Разводной пролет, управляемый гидроприводом, должен завершить подъем за возможно меньшее время t_p при ограничении тягового усилия штоков из прочностных соображений. Исследование деформаций пролета доказали, что при разводке крыло колеблется как абсолютно твердое тело. Мониторинг показал, что при быстром изменении расхода жидкости наблюдаются интенсивные колебания давления в гидроцилиндрах. Наибольшее превышение перепада давления P_m статического значения соответствует моменту окончания роста производительности насоса. После этого скачка перепад давления ведет себя как затухающий гармонический процесс, характерный для одностепенных осцилляторов.

Из вышесказанного следует, что в качестве динамической модели можно принять упруго-инерционную колебательную систему, показанную на рис.1, с идеальной кинематической характеристикой двигателя.

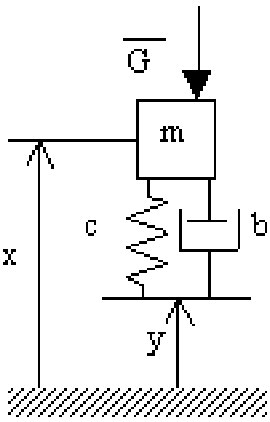

Рис.1. Упруго-инерционная модель механизма разводки моста

В данной модели переменная x(t), характеризует истинное положение поршней, а переменная y(t), определяет движение поршней при идеальной характеристике гидропривода. Величина y(t) является интегрированным по времени объемным расходом, отнесенным к эффективной площади цилиндров S. Скорость поршня при идеальной характеристике привода может быть названа скоростью холостого хода. Она связана с расходом Q(t) и площадью S следующим соотношением.

$$Q = \dot{y}S\,. \qquad (1)$$

Параметры c и b характеризуют упругие и демпфирующие свойства гидропередачи. Запишем уравнение движения массы крыла m, приведенной к поршню.

$$m\ddot{x} = F - G, \qquad (2)$$

где F – сила воздействия жидкости на поршни; G – обобщенная сила, порожденная всеми внешними силовыми факторами, действующими на крыло моста. Дальнейшие расчеты и рекомендации сделаны в предположении ее постоянства. В силу принятой линейной модели, описывающей колебательные процессы, обусловленные упруго-диссипативными свойствами гидросистемы, запишем выражение для суммарного усилия в цилиндрах

$$F = b(\dot{y} - \dot{x}) + c(y - x)\,. \qquad (3)$$

Решим уравнение движения (2), (3), (1) в случае линейного закона изменения расхода Q(t), обозначив 2n=b/m – удвоенный приведенный коэффициент вязкого трения; k^2=c/m – квадрат собственной частоты системы. Из известной функции Q(t) следует закон идеального перемещения поршня (4). Переменная y(t) принимается за ноль при $t \le t_0$, буквой t_1 обозначена длительность выхода системы на постоянный уровень расхода Q_0.

$$\dot{y} = \begin{cases} 0, & t \le t_0 \\ w(t - t_0), & t_0 \le t \le t_1 + t_0, \\ wt_1, & t_1 + t_0 \le t \end{cases} \quad y = \begin{cases} 0, & t \le t_0 \\ \frac{w}{2}(t - t_0)^2, & t_0 \le t \le t_1 + t_0 \\ wt_1\left[t - (\frac{t_1}{2} + t_0)\right] & t_1 + t_0 \le t \end{cases} \tag{4}$$

Величина w является ускорением поршня при холостом ходе, она определяется из равенства (1).

$Q_0 = wt_1S.$ (5)

Нет особого смысла приводить решение уравнения движения с нулевыми начальными условиями и известной правой частью. Следует лишь записать итоговую зависимость перепада давления P = F/S, как функцию времени. t = 0 соответствует моменту отрыва моста.

$$P(t) = \begin{cases} 0, & t \le t_0 \\ \frac{Q_0}{t_1S^2}\left(b(t - t_0) + \frac{c(t - t_0)^2}{2}\right), & t_0 \le t \le 0 \\ \frac{G}{S}, & t = 0 \\ \frac{G}{S} + \frac{mQ_0}{t_1S^2}\left[1 + e^{-nt}\left(\frac{n}{k_1}\left(2\sqrt{1 + \frac{k^2Gt_1S}{2n^2Q_0m}} - 1\right)\sin k_1t - \cos k_1t\right)\right], & 0 \le t \le t_1 + t_0 \\ \frac{G}{S} + \frac{mQ_0}{t_1S^2} & \frac{1}{n} < t = t_1 + t_0 \\ \frac{G}{S} + \frac{mQ_0}{t_1S^2}e^{-n[t-(t_1+t_0)]}\left[\cos k_1[t - (t_1 + t_0)] - \frac{n}{k_1}\sin k_1[t - (t_1 + t_0)]\right] & t_1 + t_0 \le t \end{cases} \tag{6}$$

Динамический коэффициент $k_{дин}$ = m/S^2 = $2\cdot10^9$кг/м^4. Максимальный допустимый всплеск перепада давления $P_m = 60\cdot10^5$Па. Из (6) видно, что

$P_m = k_{дин}Q_0/t_1.$ (7)

Последнее равенство позволяет оценить допустимую скорость нарастания расхода

$Q_0/t_1 = 60\cdot10^5/2\cdot10^9 = 3\cdot10^{-3}$м^3/с^2 =180л/мин·с.

Общий объем цилиндров V = 2,1 м^3. Приняв симметричным закон разгона и торможения, запишем

$V = ½Q_0t_1+Q_0(t_р-2t_1)+ ½Q_0t_1=Q_0(t_р-t_1).$ (8)

Решение системы уравнений (7) и (8) позволяет определить оптимальную производительность насоса и продолжительность выхода на максимальный расход. При расходе меньшем, чем Q_0 из (7) гарантируется не превышение тяговым усилием допустимого значения. При расходе Q_0 из (8) гарантируется завершение разводки за время $t_р$. Из (7) и (8) получается квадратное уравнение для определения t_1. Из положительности его дискриминанта следует ограничение снизу на $t_р$. Его минимальное значение можно назвать оптимальным t_{opt}.

$$t_{opt} = 2\sqrt{Vk_{дин}/P_m} = 57c\ ;\ t_1 = t_{opt}/2 = 26{,}5c\ ;\ Q_0 = t_1P_m/k_{дин} = 4800\,л/мин\ . \tag{9}$$

Выводы. Пробные пуски Троицкого моста выполнялись при Q_0 = 300 л/мин = 0,005 м^3/с. Из (7) t_1= =$k_{дин}Q_0/P_m$=$2\cdot10^9\cdot0{,}005/60\cdot10^5$=2с. Из (8) $t_р = t_1+V/Q_0$ = 2 +2,1/0,005 = 422 с, что соответствует результатам эксперимента. На мосту установлены резервные гидронасосы общей производительностью Q_0= 4x400 = 1600 л/мин = 0,027м^3/с. Если их задействовать, то время выхода на режим $t_1 = k_{дин}Q_0/ P_m = = 2 \cdot 10^9 \cdot 0{,}027/60 \cdot 10^5 = 9$ с. И общая продолжительность разводки сократится до $t_р = t_1+V/Q_0 = 9 +2{,}1/0{,}027 = 90$ с. При этом длительности разгона и торможения должны быть примерно равны 10 с, а для равномерного движения окажется достаточным 70 с. Максимальный всплеск перепада давления будет не более 60 атм.