

УДК: 62–8:621.646:531.3.001.5

Большаков В.И., Листопадов И.Б.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧНОСТИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОСИСТЕМЫ ПРИ УПРОЩЕНИИ РАСЧЕТНЫХ СХЕМ

Приведены результаты исследований гидросистемы с концевой массой на имитационных моделях. Приведены зависимости точности воспроизведения динамических параметров гидросистем с различными расчетными схемами от отношения массы жидкости в трубопроводе к массе рабочего органа гидромеханизма.

Одним из наиболее важных вопросов, связанных с заменой распределенной массы жидкости в трубопроводе дискретными массами, является точность воспроизведения динамических процессов на модели в зависимости от методики замены и представления дискретных масс. Анализ публикаций, посвященных этим вопросам, содержится в работах [1–5]. В работе [1] приведен аналитический обзор основных положений работ С.Н.Кожевникова, А.В.Праздника, посвященных базовым вопросам выбора и упрощения расчетных схем. В работе [2] показаны возможности упрощения расчетных схем за счет введения заделок в местах установки запорно–регулирующей арматуры. Приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающих возможности введения заделок при определенном, зависящем от параметров гидросистемы, проходном сечении запорно–регулирующей арматуры. В работах [3,4] приведены результаты исследований гидросистемы с концевой массой, представленной одно и двухмассовой расчетными схемами. Приведены зависимости точности воспроизведения динамических параметров систем от длины трубопровода и отношения массы жидкости в трубопроводе к массе приведенной к рабочему органу. Проведен анализ различных критериев оценки динамичности систем. В работе [5] показано на примерах, что в зависимости от цели исследований и режима работы гидросистему необходимо представлять расчетными схемами, содержащими различное количество дискретных масс замещения распределенной массы жидкости в трубопроводе.

В данной работе приведены обобщенные результаты исследований [1–5], дополненные результатами новых исследований систем с различным числом масс. Исследование точности воспроизведения динамических параметров гидросистемы в зависимости от представления дискретных масс замещения распределенной массы жидкости выполнено для гидросистем с концевой массой и трубопроводом с заделкой.

Рассматривается гидросистема, схема которой приведена на рис.1 –а, представленная в виде одномассовой (рис.1 –б), двухмассовой (рис. 1–в) и трехмассовой (рис.1, г) моделей. Модели адаптированы по результатам

экспериментальных исследований, содержащимся в работе [6]. Экспериментальная осциллограмма приведена на рис.1, а. На рис.1 обозначено: m_0 – масса груза; m_l – приведенная масса ($m_l = m_0 + \rho(V_0 + F_0^2 l / 3F_1)$); $m_2; m_3$ – массы жидкости ($m_2 = m_3 = \rho F_1 l / 3$); F_0 – площадь плунжера; F_1 – площадь трубопровода; V_0 – объем гидроцилиндра; $C = EF_1^2 / (V_0 + F_1 l)$; $C_1 = EF_1^2 / (V_0 + F_1 l / 2)$; $C_2 = 2EF_1 / l$; $C_1^* = EF_1^2 / (V_0 + F_1 l / 3)$; $C_2^* = C_3^* = 3EF_1 / l$ – жесткости связей, E – приведенный модуль упругости жидкости и трубопровода. В качестве нагружения использована начальная скорость концевой массы m_0 определенная при свободном ее падении с заданной высоты на плунжер гидроцилиндра. Начальное положение плунжера гидроцилиндра и высота падения массы оставались постоянными. Принималось, что отскока массы при ее ударе о плунжер не происходит.

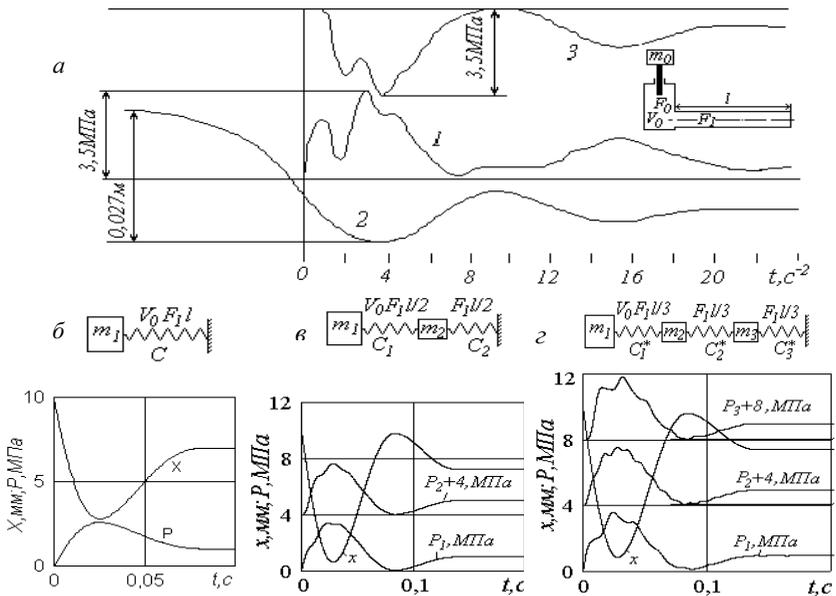


Рис. 1. Схемы моделей и осциллограммы переходных процессов при $m_0 = 18 \text{ кг}$; $l = 9,5 \text{ м}$: а – экспериментальная; полученные на моделях: б – одномассовой; в – двухмассовой; г – трехмассовой

Критериями оценки значений частот колебаний служили: для колебаний низшей частоты – расчетные значения частоты по уравнению

$\beta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{EF_1^2}{m_1(V_0 + F_1l)}}$; для колебаний высшей частоты – время двойного

пробега фронта волны давления по длине трубопровода ($T=2l/a$), где a – скорость пробега волны. На имитационных моделях исследовались одно, двух и трехмассовые системы с изменением концевых масс m_0 от 0,1 кг до 50 кг и длины трубопровода l от 1 м до 50 м.

Одномассовая модель описывалась уравнениями (1).

$$\begin{aligned} m_1 d^2 x / dt &= m_0 g - T \operatorname{sgn} dx / dt - pF_0 - hdx / dt; \\ dp / dt &= E / (V_0 + xF_0 \operatorname{sgn} x + F_1 l). \end{aligned} \quad (1)$$

где $T=60H$ – трение в уплотнениях гидроцилиндра, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, $E=1,3 \cdot 10^3 \text{ МПа}$ – модуль упругости жидкости, $\rho = 900 \text{ кг/м}^3$ – плотность жидкости, F_0 и F_1 – площади сечений гидроцилиндра и трубопровода, h – коэффициент трения.

Двухмассовая модель описывалась уравнениями (2)

$$\begin{aligned} m_1 d^2 x_1 / dt^2 &= m_0 g - p_1 F_0 - T \operatorname{sgn} dx_1 / dt - h_1 dx_1 / dt; \\ dp_1 / dt &= \frac{E(F_0 dx_1 / dt - F_1 dx_2 / dt)}{V_0 - F_0 x_1 + F_1(0,5l + x_2)}; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} m_2 d^2 x_2 / dt^2 &= F_1(p_1 - p_2) - h_2 dx_2 / dt; \\ dp_2 / dt &= \frac{E dx_2 / dt}{0,5l - x_2}; \end{aligned}$$

где x_1 ; x_2 – перемещения масс m_1 и m_2 ; h_1 ; h_2 – коэффициенты жидкостного трения при ламинарном течении жидкости на участках « $m_1 - m_2$ » и « m_2 – заделка».

Трехмассовая модель описывалась уравнениями (3)

$$\begin{aligned} m_1 d^2 x_1 / dt^2 &= m_0 g - p_1 F_0 - h_1 dx_1 / dt - T \operatorname{sgn} dx_1 / dt; \\ dp_1 / dt &= \frac{E(F_0 dx_1 / dt - F_1 dx_2 / dt)}{V_0 + nF_1 l - x_1 F_0 + x_2 F_1}; \\ m_2 d^2 x_2 / dt^2 &= F_1(p_1 - p_2) - h_2 dx_2 / dt; \\ dp_2 / dt &= \frac{EF_2(dx_2 / dt - dx_3 / dt)}{nF_1 - F_1(x_2 - x_3)}; \\ m_3 d^2 x_3 / dt^2 &= F_1(p_2 - p_3) - h_2 dx_3 / dt; \\ dp_3 / dt &= \frac{E dx_3 / dt}{nl - x_3}. \end{aligned} \quad (3)$$

где x_1 ; x_2 ; x_3 – перемещения масс m_1 , m_2 и m_3 ; $n=1/3$.

Изучались расчетные схемы в виде одно, двух и трехмассовых систем, состоящих из гидроцилиндра с рабочим органом (плунжер) и трубопровода постоянного сечения с заделкой. Каждое сочетание параметров исследу-

довалось для таких трех систем. При каждом исследовании возмущение (в виде начальной скорости, сообщенной рабочему органу падением массы груза с одной и той же высоты) было одинаковым. Параметры гидроцилиндра и сечение трубопровода было постоянным. Переменными были масса рабочего органа и длина трубопровода. Определялись перемещение рабочего органа и давления в сечениях: для одномассовой системы – в трубопроводе; для двух и трехмассовой систем – между гидроцилиндром и дискретной массой жидкости; между дискретными массами жидкости; между дискретной массой жидкости и заделкой.

Характерные осциллограммы переходных процессов, полученных при моделировании, приведены на рис. 1, б–г. Обработка результатов исследований заключалась в составлении таблиц для максимального перемещения и размаха колебаний рабочего органа (X и $2A$); периодов колебаний рабочего органа ($T; T_{зс}$); давлений в сечениях; времени затухания колебаний для каждого варианта параметров систем. Указывались параметры системы – масса рабочего органа, длина трубопровода, отношение массы жидкости в трубопроводе к массе рабочего органа. Определялись расчетные данные – период колебаний рабочего органа и время пробега фронта волны давления по двойной длине трубопровода. Результаты исследования приведены в таблице 1.

В дальнейшем вычислялись для каждого параметра относительные величины: отношения расчетных значений периода колебаний массы к значениям периода колебаний массы, полученным при исследованиях; времени пробега волны давления к периоду высшей частоты колебаний, отношения максимальных перемещений рабочего органа, размаха колебаний, давлений и времени затухания систем с меньшим числом масс к аналогичным параметрам систем с большим числом масс. Например, $2A_{\text{одн.}}/2A_{\text{дв.}}$ – отношение размаха колебаний одномассовой системы к размаху колебаний двухмассовой системы (масса рабочего органа и одна дискретная масса жидкости в трубопроводе). Полученные данные сводились в табл.2. Затем принимали, что модели систем с большим числом дискретных масс замещения распределенной массы более точно воспроизводят динамические параметры, чем модели систем с меньшим числом дискретных масс замещения распределенной массы жидкости. Отличие значений относительных параметров оценивалось в процентах. Если относительный параметр имеет значение 1,1, то отличие в значениях параметров составляет 10%.

Далее строили графики зависимости трендов относительных значений всех динамических параметров (упомянуты выше) от отношения массы жидкости в трубопроводе к массе рабочего органа. Аппроксимация массивов данных производилась полиномиальной зависимостью шестой степени. Достоверность аппроксимации не ниже 1.

Таблица 1. Результаты исследования гидросистемы, представленной в виде одно-, двух и трехмассовой моделей

Параметры системы			Одномассовая модель						Двухмассовая модель						Трехмассовая модель									
m_0	L_0	$m_{жк}$	Γp	l/a	T	$\dot{X}m$	$t_{зат}$	P	$2A_1$	T	$\dot{X}m$	$t_{зат}$	P_1	P_2	$2A_1$	T	$\dot{X}m$	$t_{зат}$	P_1	P_2	P_3	$2A_1$		
кг	м	кг	с^{-2}	с^{-2}	с^2	мм	с	МПа	мм	с^2	мм	с	МПа	МПа	мм	с^2	мм	с	МПа	МПа	МПа	мм		
0,1	1,0	0,05	0,78	0,08	1,0	0,3		0,29	0,2	0,87	0,18	0,28	0,30	0,50	0,3	0,80	0,19	0,30		0,37	0,47	0,53	0,3	
0,1	2,0	0,09	1,10	0,17	1,0	0,4	0,01	0,35	0,1	1,21	0,35	0,41	0,01	0,40	0,57	1,21	0,36	0,37	0,02	0,41	0,40	0,64	0,2	
0,1	5,0	0,23	2,02	0,42	2,6	0,8	0,02	0,48	0,2	2,00	0,82	0,79	0,02	0,55	0,68	2,21	0,84	0,73	0,03	0,60	0,52	0,76	0,3	
0,1	9,5	0,43	3,39	0,79	4,2	1,4	0,03	0,77	0,6	3,80	1,48	1,32	0,03	0,65	0,73	3,30	1,40	1,20	0,02	0,74	0,61	0,82	0,3	
0,1	15	0,68	5,05	1,25	6,0	2,2	0,04	0,53	1,1	4,80	2,10	1,97	0,04	0,70	0,75	8,50	2,00	1,77	0,02	0,83	0,65	0,85	0,7	
0,1	50	2,27	15,6	4,16		6,5	0,12	0,56	3,7	10,5	8,06	6,03	0,12	0,80	0,78	2,51	11,0	5,50	0,29	0,13	0,99	0,72	0,89	1,7
1,0	1,0	0,05	1,51	0,08	1,4	0,8	0,01	0,92	0,6	1,80	0,18	0,78	0,01	0,91	0,93	0,6	1,60	0,18	0,76	0,03	0,92	0,99	1,07	0,8
1,0	2,0	0,09	1,82	0,17	2,1	0,9	0,01	0,86	0,6	2,00	0,36	0,90	0,01	0,80	0,95	0,6	1,90	0,35	0,89	0,02	0,81	1,01	1,02	0,7
1,0	5,0	0,23	2,74	0,42	2,6	1,3	0,02	0,76	0,8	3,00	0,85	1,34	0,02	0,78	0,91	0,8	2,80	0,86	1,20	0,04	0,86	0,80	1,19	0,7
1,0	9,5	0,43	4,11	0,79	3,3	1,9	0,03	0,72	1,0	4,10	1,60	1,75	0,03	0,81	0,84	0,8	4,30	1,60	1,66	0,05	0,93	0,81	1,12	0,8
1,0	15	0,68	5,77	1,25	4,6	2,6	0,05	0,67	1,3	6,00	2,40	2,38	0,05	0,82	0,79	0,9	5,90	2,60	2,57	0,07	0,97	0,80	1,08	1,3
1,0	50	2,27	16,3	4,16	20,8	7,2	0,12	0,62	3,2	17,0	7,50	6,36	0,13	0,84	0,73	2,0	16,3	7,80	5,80	0,13	1,05	0,78	0,99	2,2
10	1,0	0,05	4,35	0,08	4,5	3,5	0,05	4,25	5,1	4,70	0,17	3,61	0,05	4,33	4,36	5,4	4,50	0,18	3,47	0,08	4,20	4,22	4,23	5,3
10	2,0	0,09	4,93	0,17	4,6	4,0	0,06	3,76	5,1	5,20	0,36	4,02	0,06	3,81	3,82	5,3	5,20	0,35	3,86	0,09	3,72	3,74	3,77	5,2
10	5,0	0,23	6,46	0,42	6,6	5,0	0,08	2,92	4,9	6,80	0,88	5,03	0,07	2,88	3,07	5,0	6,70	0,89	4,82	0,10	2,92	2,85	3,04	5,4
10	9,5	0,43	8,42	0,79	8,0	6,3	0,10	2,33	5,6	8,60	1,60	6,25	0,10	2,37	2,31	5,5	8,70	1,70	5,92	0,12	2,33	2,39	2,68	5,3
10	15	0,68	10,6	1,25	11,2	7,7	0,08	1,96	6,1	11,0	2,60	7,09	0,08	1,75	1,96	5,2	11,0	2,70	6,94	0,13	2,01	2,04	2,56	5,1
50	1,0	0,05	9,64	0,08	9,8	10,2	0,23	12,4	17	10,0	0,18	10,3	0,23	12,5	12,5	17	10,0	0,18	10,3	0,26	12,3	12,3	12,2	1,9
50	2,0	0,09	10,9	0,17	10,5	11,7	0,25	11,3	17	11,5	0,35	11,8	0,26	11,3	11,3	18	11,2	0,35	11,6	0,29	11,1	11,1	11,1	1,9
50	5,0	0,23	13,9	0,42	13,9	15,6		9,17	19	14,7	0,88	15,7		9,19	9,20	19	14,6	0,89	15,3	0,31	9,02	9,30	9,22	2,1
50	9,5	0,43	17,6	0,79	17,7	20,7		7,69	21	18,8	1,60	20,7		7,68	7,70	21	18,1	1,70	20,1	0,32	7,46	7,60	7,81	2,0
50	15	0,68	21,4	1,25	21,6	26,2		6,73	24	22,8	2,50	26,0		6,65	6,80	24	21,9	2,70	25,3	0,40	6,68	6,50	6,62	3,0
50	50	2,27	39,1	4,16	40,2	55,7		4,82	31	41,0	8,60	54,7		4,56	4,94	29	41,2	8,90	52,3	0,36	4,85	4,78	5,06	4,8

Таблица. 2. Точность расчета динамических параметров одно-, двух и трехмассовой моделей гидросистемы

Параметры системы		Критерии адаптации		Точность параметров при исследовании систем с различным количеством масс													
				Одной						Двумя						Тремя	
				$Tp/Toд$	$2l/a/Tэс$	$Pod/Поб$	$Aод/Aоб$	$Tз_1/Tз_2$	Tp/Tmp	$2l/a/Tэс$	$Pod/P_имп$	$Aде/Aмп$	$Tз_2/Tз_3$				
$m, кг$	$L, м$	$m_{ж}/k, m_1$	$m_{ж}/m_0$	$Tp/Toд$	$2l/a/Tэс$	$Pod/Поб$	$Aод/Aоб$	$Tз_1/Tз_2$	Tp/Tmp	$2l/a/Tэс$	$Pod/P_имп$	$Aде/Aмп$	$Tз_2/Tз_3$				
0.1	1	1.47	0.454	0.76	0.90	0.92	0.96	0.96	0.98	0.87	0.78	0.74					
0.1	2	4.66	0.907	1.05	0.91	0.95	0.89	0.95	0.93	0.91	0.92	0.86	0.73				
0.1	5	18	2.27	0.78	1.01	1.01	0.87	1.04	0.95	0.96	0.99	0.80	0.92				
0.1	9.5	41.1	4.31	0.81	0.89	1.07	1.18	1.33	1.13	1.03	1.13	1.04	1.92				
0.1	15	70.7	6.8	0.84	1.05	1.19	0.75	1.46	1.26	1.01	1.25	0.63	1.20				
0.1	50	265	22.7		1.56	1.43	0.70	1.47	1.08	1.42	1.51	0.57	1.54				
1	1	0.15	0.045	1.12	0.84	0.92	1.01	1.14	1.00	0.94	0.92	1.00	0.67				
1	2	0.47	0.091	0.87	0.91	0.92	1.07	1.08	0.93	0.96	0.95	1.06	0.80				
1	5	1.8	0.227	1.06	0.91	0.98	0.97	1.04	0.95	0.98	0.97	0.88	1.03				
1	9.5	4.11	0.431	1.23	1.00	0.99	0.89	1.27	1.00	0.96	0.99	0.77	0.89				
1	15	7.07	0.68	1.25	0.96	1.04	0.82	1.33	0.92	0.98	0.96	0.69	0.75				
1	50	26.5	2.27	0.79	0.96	1.11	0.74	1.57	0.99	1.00	1.07	0.59	0.93				
10	1	0.015	0.005	0.97	0.93	0.98	0.98	0.93	0.96	0.97	0.92	1.01	1.01				
10	2	0.047	0.009	1.07	0.95	0.92	0.99	0.97	0.92	0.95	0.95	1.01	1.02				
10	5	0.18	0.023	0.98	0.95	0.95	1.01	0.97	1.03	0.96	0.93	1.00	0.93				
10	9.5	0.411	0.0431	1.05	0.98	0.99	0.98	1.00	0.91	0.97	0.93	1.00	1.04				
10	15	0.707	0.068	0.94	0.96	0.96	1.12	1.15	0.90	0.96	0.93	0.98	1.02				
10	50	2.65	0.227	0.95	0.97	1.03	0.99	1.02	0.94	0.99	0.96	0.84	1.09				
50	1	0.003	0.001	0.98	0.96	0.92	0.99	0.97	0.96	0.96	0.92	1.01	0.90				
50	2	0.009	0.002	1.04	0.94	0.95	1.00	0.98	0.93	0.97	0.95	1.02	0.93				
50	5	0.036	0.005	1.00	0.95	0.95	1.00	1.00		0.95	0.93	1.02	0.91				
50	9.5	0.082	0.009	1.00	0.94	0.99	1.00	0.96		0.97	0.93	1.03	1.05				
50	15	0.141	0.014	0.99	0.94	1.00	1.01	1.00		0.98	0.93	1.01	0.77				
50	50	0.53	0.045	0.97	0.95	0.97	1.06	1.06		0.95	0.93	0.99	0.60				

Вводилось условие, если значение тренда любого из параметров в диапазоне изменения отношения масс не превышает 1,2, то модели гидросистем в этом диапазоне отношений масс воспроизводят значения динамических параметров с относительной точностью 20%. Рассматривались дискретные значения трендов отношений параметров – 1,05; 1,1; 1,15; 1,2. Дискретные значения получали округлением фактических значений до этих величин. Если 1,074, то 1,05. Если 1,075, то 1,1. Таким образом, реализовывалось допущение, что, если модели систем с разным числом масс воспроизводят значения динамических параметров с удовлетворительной (до 20%) точностью, то при исследованиях целесообразно использовать имитационную модель с расчетной схемой, имеющей меньшее число масс. Точность воспроизведения динамических параметров гидросистем с концевой массой приведена в табл.3 и на рис.2. В качестве критерия оценки достоверности адаптации модели к реальной гидромеханической системе использовано отношение массы жидкости в гидросистеме ($m_{ж}$) к концевой массы (m_0).

В табл.3 приведены диапазоны значений критерия $m_{ж}/m_0$, при которых достигается различная относительная точность воспроизведения динамических параметров систем. Обозначено: T – период колебаний концевой массы, l/a – время пробега фронта волны давления по длине трубопровода, $T_{ж}$ – период колебаний массы жидкости, P – максимальные давления; индексы параметров: p , od , dv , tr – соответственно расчетные и полученные при исследованиях одно, двух и трехмассовых систем. Данные, приведенные в таблице 3 и на рис.2 показывают, что до значения критерия $m_{ж}/m_0 < 0,045$ расчетная схема гидросистемы с концевой массой может быть представлена в виде одномассовой системы с массой жидкости в трубопроводе приведенной к концевой массе. Точность воспроизведения динамических параметров при такой замене не меньше 10%.

Таблица 3 Диапазон значений критерия $m_{ж}/m_0$ при различной точности воспроизведения динамических параметров систем

Точн. %	Параметры						
	T_p/T_{od}	T_p/T_{dv}	T_p/T_{tr}	$\frac{2l/a}{T_{жdv}}$	$\frac{2l/a}{T_{жtr}}$	P_{od}/P_{dv}	P_{od}/P_{tr}
5		0,001–0,008	0,001–0,7	0,001–0,45	0,001–0,6	0,001–0,045	
10	0,001–0,045	0,008–4	0,7–7	0,45–4	0,6–5	0,045–0,45	
20	0,045–2,2	4–7		4–5	5–7	0,45–4	0,045–5

При значениях критерия $0,045 < m_{ж}/m_0 < 4$ расчетная схема гидросистемы должна быть представлена в виде двухмассовой системы, в которой распределенная масса жидкости в трубопроводе заменяется одной дис-

кретной массой. Точность воспроизведения частотных параметров при такой замене не меньше 10%. Точность воспроизведения давления в магистрали составляет около 20%.

$$\begin{aligned} & \boxed{m_1} \begin{array}{c} V_0 F_1 / 1 \\ \text{---} \\ C \end{array} \quad 0,001 < m_{ж}/m_0 < 0,045 \\ & \boxed{m_1} \begin{array}{c} V_0 F_1 / 2 \\ \text{---} \\ C_1 \end{array} \begin{array}{c} F_1 / 2 \\ \text{---} \\ C_2 \end{array} \quad 0,045 < m_{ж}/m_0 < 4,0 \\ & \boxed{m_1} \begin{array}{c} V_0 F_1 / 3 \\ \text{---} \\ C_1^* \end{array} \begin{array}{c} F_1 / 3 \\ \text{---} \\ C_2^* \end{array} \begin{array}{c} F_1 / 3 \\ \text{---} \\ C_3^* \end{array} \quad 4,0 < m_{ж}/m_0 < 5,0 \end{aligned}$$

Рис– 2 Требуемая дискретность замены распределенной массы жидкости в трубопроводе при различных диапазонах критерия $m_{ж}/m_0$

При значениях критерия $4 < m_{ж}/m_0 < 5$ расчетная схема гидросистемы должна быть представлена в виде трехмассовой системы, в которой распределенная масса жидкости в трубопроводе заменяется двумя дискретными массами. Точность воспроизведения частотных параметров при такой замене не меньше 10%. Точность воспроизведения давления в магистрали

составляет около 20%.

Для оценки абсолютной точности воспроизведения каждого из динамических параметров, использовались другие приемы. Получаемые на имитационных моделях частотные параметры гидросистемы сравнивались с расчетными значениями, которые достаточно точно определяют низшую и высшую частоты системы. Поэтому критериями точности частотных параметров являлись их совпадение с расчетными значениями. При определении на модели энергосиловых параметров критерием точности являлось их совпадение с аналогичными параметрами определенными экспериментальным путем. При исследованиях нами использовались адаптированные модели, т.е. модели, в которых значения динамических параметров, полученных в результате исследования, сравнивались с результатами экспериментальных исследований, полученными на физической модели и опубликованными в литературе. По результатам экспериментальных исследований определялись точные значения коэффициентов для определения сил сухого и жидкостного трения, которые являются определяющими для получения адаптированных значений давлений, размаха колебаний и времени затухания. Поскольку для адаптации имитационной модели использовались данные экспериментальных исследований систем с двумя различными значениями основных параметров – массы рабочего органа и длины трубопровода, то данные исследований использовались для определения поправочных коэффициентов в формулы математического описания. Эти коэффициенты использовались при исследовании гидросистем с другими основными параметрами, Таким образом можно считать, что весь спектр исследований проводился на адаптированной имитационной модели и значения динамических параметров, полученных в результате исследований, имеют точность значений параметров, определенных экспериментальным путем. Следует отметить, что

адаптация модели к экспериментальным исследованиям была возможна при представлении гидросистемы расчетной схемой с одной и двумя дискретными массами замещения распределенной в трубопроводе жидкости, так как на осциллограммах не проявлялись частоты выше второй формы колебаний.

При определении значений дискретных масс и приведения массы жидкости к основной массе целесообразно использовать энергетический метод, основанный на равенстве кинетической и потенциальной энергий начальной и эквивалентной систем. Дискретные массы сосредотачиваются, как правило, в середине участка упругой связи, на которые разбивается трубопровод. К каждой из промежуточных дискретных масс относится одна треть массы прилежащих к ней участков упругих связей. Жесткости упругих связей учитываются полностью.

Критериями оценки точности воспроизведения на модели значений частот колебаний являются для колебаний низшей частоты – расчетные

значения частоты по уравнению
$$\beta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{EF_1^2}{m_1(V_0 + F_1l)}} ;$$
 для колебаний

высшей частоты – время двойного пробега фронта волны давления по длине трубопровода ($T=2l/a$), где a – скорость пробега волны. Для энергосиловых параметров критерием оценки точности воспроизведения является их соответствие аналогичным параметрам определенными экспериментальным путем.

Таким образом при упрощении расчетных схем дискретно–континуальных гидромеханических систем с концевой массой целесообразно руководствоваться методикой, в которой критерием дискретности системы при замене распределенной массы в трубопроводе дискретными массами является отношение массы жидкости в трубопроводе к концевой массе рабочего органа ($m_{ж}/m_0$). Для упрощения расчетной схемы необходимо определить значение критерия дискретности системы. До значения критерия $m_{ж}/m_0 < 0,45$ распределенная масса жидкости заменяется одной дискретной массой. Точность воспроизведения динамических параметров при такой замене не меньше 10%. При значениях критерия $0,045 < m_{ж}/m_0 < 4$ распределенная масса жидкости заменяется двумя дискретными массами. Точность воспроизведения частотных параметров при такой замене не меньше 10%, давления – около 20%. При значениях критерия $4 < m_{ж}/m_0 < 5$ распределенная масса заменяется тремя дискретными массами с точностью воспроизведения частотных параметров не меньше 10%, давления – около 20%.

Следует указать, что анализ характеристик типичной базовой расчетной схемы гидропривода позволил углубить понимание протекания динамических процессов в гидромеханических системах с концевой массой и использовать эти знания при составлении, упрощении расчетных схем и оценке точности результатов.

1. *Большаков В.И., Листопадов И.Б.* Особенности составления расчетных схем гидравлических систем // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии.* – Вып.6. –2003. – С.–408–417.
2. *Большаков В.И., Листопадов И.Б.* Особенности упрощения расчетных схем гидромеханических систем // *Подъемно–транспортная техника.* – 2004.–№1.– С.41–48.
3. *Большаков В.И., Листопадов И.Б.* Исследование гидромеханических систем с различными параметрами расчетных схем // *Подъемно–транспортная техника.* – 2004.–№4.–С.59–69.
4. *Большаков В.И., Листопадов И.Б.* Исследование точности воспроизведения динамических параметров гидросистемы в расчетных схемах // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии.* Вып.9. – 2004. С.–205–210.
5. *Большаков В.И., Листопадов И.Б.* Анализ особенностей составления расчетных схем систем с изменяющейся структурой // *Подъемно–транспортная техника.* – 2005.–№2.–С.38–47.
6. *Праздников А.В.* Гидропривод в металлургии. – М.: Металлургия, 1973. – 336 с.

Статья рекомендована к печати д.т.н.В.А.Носковым