

В.И. Большаков, И.Б. Листопадов

КРИТЕРИИ ТОЧНОСТИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ НА МОДЕЛИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОСИСТЕМЫ

Приведены результаты исследований гидросистемы на имитационных моделях. Получены данные о влиянии массы жидкости в трубопроводах и основной массы на точность результатов моделирования систем с различными расчетными схемами.

Динамические нагрузки в гидроприводе металлургических машин оказывают существенное влияние на их надежность и долговечность. При неблагоприятном сочетании комплекса динамических условий в их конструкциях и линиях привода возникают колебания, что приводит к нарушению технологических режимов работы машин, отказам основных узлов и деталей привода. Оценка величин нагрузок можно выполнить путем проведения натуральных экспериментов на действующем оборудовании, однако это увеличивает трудоемкость исследований и риск аварий. В то же время значительная часть исследований может выполняться расчетным путем.

Состояние вопроса. Общим для всех известных методик исследований является подготовка исходных данных (длины и сечения трубопроводов, их расположение и коммутация, наличие гидроэлементов и их характеристики, массы движущихся жестких звеньев, вид и параметры привода, условия эксплуатации), которые преобразуются в элементы расчетной схемы, необходимые для исследования гидромеханических систем. Источником информации для подготовки исходных данных являются гидравлические схемы (длины, сечения, расположение), паспортные (справочные) данные о характеристиках гидроэлементов, рабочие чертежи (массы, моменты инерции, коэффициенты передач). На этом этапе исследований серьезных различий методического характера обычно нет.

Различия появляются на стадии преобразования исходных данных в расчетные параметры, такие как, например, представление распределенной массы жидкости в трубопроводах, учет свойств жидкости. Вид и значения расчетных параметров зависят от выбора расчетной схемы, которая является основой математической и имитационной моделей.

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.

Методы и результаты исследования. В данной работе приведены результаты исследований точности воспроизведения динамических параметров гидросистемы с центральной массой и двумя трубопроводами в зависимости от представления дискретных масс замещения распределенной массы жидкости в трубопроводах.

При исследовании гидросистем с двумя трубопроводами и центральной массой рабочего органа применялся подход, использованный при исследовании гидросистем с концевой массой. Объектом исследований являлась гидросистема механизма подачи пилигримового стана, по исследованиям которого, в том числе экспериментальным, имеется достаточная информация, позволяющая адаптировать имитационную модель к реальному объекту.

Схема исследуемой гидромеханической системы приведена на рис.1. Особенностью гидромеханической системы является различие в сечениях напорного и сливного трубопроводов, которые во время вспомогательных операций, выполняемых прототипом, питаются от магистралей давления различной величины. Длины трубопроводов приняты одинаковыми, образующими симметричную систему. Исследования проводили для значений массы рабочего органа системы 1000 – 50000 кг и для длин трубопроводов 5 – 80 м. Выбранные диапазоны массы рабочего органа и длин трубопроводов реализуют период низшей частоты колебаний в диапазоне 0,026–0,666 с, период высшей частоты в диапазоне 0,0074–0,118 с, при отношении периода низшей частоты к периоду высшей частоты в диапазоне 1,97–21,38. На подвижную массу ра-

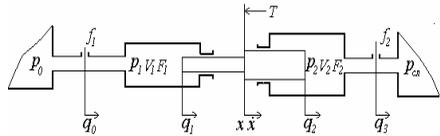


Рис.1– Схема гидромеханической системы с двумя магистральями

бочего органа действует сила сухого трения T , величина которой была постоянной на всех стадиях исследований и сила жидкостного трения, пропорциональная квадрату скорости жидкости в трубопроводах. Расчетная схема базовой одномассовой модели приведена на рис.2. На расчетной схеме обозначено p_0 ; p_1 ; p_2 ; $p_{сл}$ – давления соответственно источника питания, в напорной магистрали, сливной магистрали, слива; f_1 ; f_2 – проходное сечение дросселей на входе в напорную и на выходе из сливной магистралей; F_1 ; F_2 – площади сечения плунжеров в напорной и сливной полостях гидроцилиндра; V_1 ; V_2 – объемы напорной и сливной магистралей; $m_{пр}$ – масса рабочего органа и приведенная к активной площади сечения плунжеров в соответствующих полостях гидроцилиндра масса жидкости в магистралях; q_i – расходы в начальных и конечных сечениях трубопроводов.

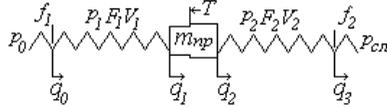


Рис.2 – Расчетная схема одномассовой модели

Уравнения движения приведенной массы и процессов, происходящих в трубопроводах одномассовой модели, записанные в расходах, имеют вид:

$$\begin{aligned}
 m_{пр} dq_1 / dt &= (p_1 - p_2 F_2 / F_1 - T \operatorname{sgn} q_1 / F_1 - h \operatorname{sgn} q_1) F_1^2, \\
 dp_1 / dt &= (q_0 - q_1) E_1 / V_1, \\
 dp_2 / dt &= (q_2 - q_1) E_2 / V_2, \\
 q_0 &= \mu f_2 \sqrt{2(p_0 - p_1) / \rho}, \\
 q_1 &= F_1 dx / dt, \\
 q_2 &= F_2 dx / dt, \\
 q_3 &= \mu f_2 \sqrt{2(p_2 - p_{сл}) / \rho}.
 \end{aligned} \tag{1} \text{ где}$$

$h = 0,5 \rho q_i^2 v l_i / d_i f_i^2$; ρ – плотность жидкости; v – вязкость жидкости; l_i ; d_i ; f_i – длина, диаметр и площадь сечения i -го трубопровода; E_i – приведенный модуль упругости жидкости и трубопровода; μ – коэффициент расхода жидкости через дроссель, $\mu = 0,62$.

Исследование проводилось методами численного интегрирования уравнений (1) с шагом $\Delta t = 0,001$ с при частоте колебаний до 7Гц и $\Delta t = 0,0001$ с при частоте колебаний более 7Гц. Постоянные параметры модели: $p_0 = 10$ МПа; $T = 60000$ Н; $E = 1,83 \cdot 10^9$ МПа; $\rho = 1000$ кг/м³; $F_1 = 0,049$ м²; $F_2 = 0,14$ м²; $f_2 = 0$.

Расчетная схема базовой трехмассовой модели приведена на рис.3.

На расчетной схеме обозначено: p_0 ; $p_{сл}$ – давления источника питания и слива; p_1 ; p_2 ; p_3 ; p_4 – давления в различных сечениях трубопроводов; f_1 ; f_2 – проходное сечение дросселей на входе в напорную и на выходе из сливной магистрали; C_i – жесткости участков трубопроводов $C_i = E_i / V_i$; E_i ; V_i – приведенные модули упругости и объемы участков трубопроводов;

m_1 ; m_3 – дискретные массы жидкости, замещающие распределенную массу жидкости в напорном и сливном трубопроводах $m_i = \rho l_i F_i / 3$, где ρ – плотность жидкости; l_i ; F_i – длина и площадь сечения напорной и сливной магистрали; $m_2 = m_{\text{пр}}$ – масса рабочего органа и приведенная к активной площади сечения плунжеров в соответствующих полостях гидроцилиндра масса жидкости в магистралях; q_i – расходы в начальных и конечных сечениях участков трубопроводов.

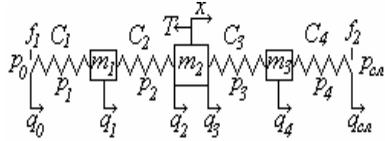


Рис.3. Расчетная схема трехмассовой модели

Приведенная масса жидкости определялась как:

$$m_2 = m + \Sigma \rho l_i F_i / 3 (F_k / F_i)^2,$$

где F_k – активная площадь сечения соответствующего плунжера гидроцилиндра. При составлении расчетной схемы принято центральное расположение дискретных масс жидкости, которые замещают распределенную массу жидкости в магистралях. Остальные параметры исследуемой трехмассовой модели были такие же, как в одномассовой модели.

Уравнения движения масс трехмассовой системы и процессов, происходящих в трубопроводах, записанные в расходах имеют вид:

$$\begin{aligned} q_0 &= \mu f_1 \sqrt{2(p_0 - p_1) / \rho}, \\ dp_1 / dt &= C_1 (q_0 - q_1), \\ dq_1 / dt &= (p_1 - p_2 - h_1 \operatorname{sgn} q_1) F_1^2 / m_1, \\ dp_2 / dt &= C_2 (q_1 - q_2), \\ dq_2 / dt &= (p_2 - p_3 F_3 / F_2 - h_2 \operatorname{sgn} q_2 - T \operatorname{sgn} q_2 / F_2) F_2^2 / m_2, \quad (2) \\ q_3 &= q_2 F_3 / F_2, \\ dp_3 / dt &= C_3 (q_3 - q_4), \\ dq_4 / dt &= (p_3 - p_4 - h_3 \operatorname{sgn} q_4) F_4 / m_3, \\ dp_4 / dt &= C_4 (q_4 - q_{\text{сл}}), \\ q_{\text{сл}} &= \mu f_2 \sqrt{2(p_4 - p_{\text{сл}}) / \rho}, \end{aligned}$$

где $h_i = 0,25 \rho q_i^2 \nu_i / d_i F_i^2$; ν – вязкость жидкости; μ – коэффициент расхода жидкости через дроссель, $\mu = 0,62$.

Исследование проводилось методами численного интегрирования уравнений (2) с шагом $\Delta t = 0,0001$ с при низшей частоте колебаний до 7 Гц и $\Delta t = 0,00001$ с при низшей частоте колебаний более 7 Гц. Необходимость уменьшения шага интегрирования определялась видом кривых графиков. Появление высокочастотных (соизмеримых с высшей частотой колебаний динамических параметров переходного процесса) расходящихся колебаний свидетельствовало о необходимости уменьшения шага интегрирования.

ния. При исследовании дроссель f_2 был закрыт. Постоянные параметры модели соответствуют параметрам одномассовой модели.

Нагружение осуществлялось путем мгновенного открытия дросселя на напорной магистрали до сечения $f_1 = 0,004\text{ м}^2$ с начальными условиями: при $t=0$; $f_1=f_0=0$; $f_2=0=const$; $p_1=0$; $p_2=0$; $p_3=0$; $p_4=0$; $x=0$; $dx/dt=0$; $d^2x/dt^2=0$. На рис. 4 приведены графики реакции гидросистемы на возмущение для принятого варианта исследований. Видно, что при данном построении расчетных схем, давления в напорных полостях гидроцилиндров (p_v) практически не превышает магистрального давления p_0 , что является особенностью моделирования гидромеханических систем с двумя трубопроводами. Внешнее воздействие на массу рабочего органа в данном случае формируется в напорном трубопроводе.

Методика исследований заключалась в решении уравнений (1,2) для каждого значения массы рабочего органа, длины трубопроводов и зависящих от длины трубопроводов параметров жидкостного трения. Результаты решений выводились в виде графиков, показанных на рис.4. С по-

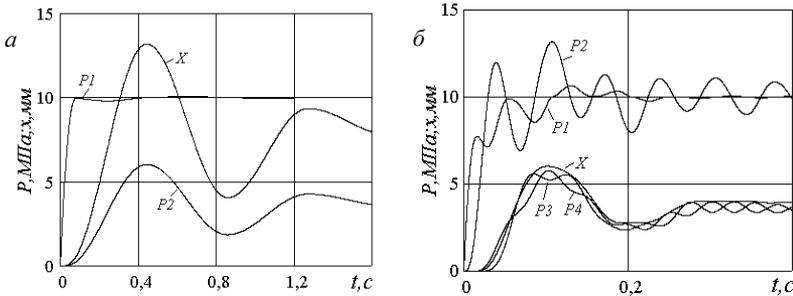


Рис.4. Реакция гидросистем на возмущение:

а– одномассовой при $m=5000\text{ кг}$; $l=80\text{ м}$;

б– трехмассовой при $m=10000\text{ кг}$; $l=40\text{ м}$

мощью графиков и пользуясь электронной таблицей вычислений, определялись частотные и кинематические параметры процесса. В случаях неявно выраженных или нелинейных колебаний, при определении частотных параметров уменьшалось значение сухого трения. Значения кинематических и энергосиловых параметров переходного процесса фиксировались только при расчетных или заданных значениях трения. Обработанные результаты исследования сведены в табл.1. В табл.1 обозначено: m –масса рабочего органа; L – длина магистрали; $m_{ж}$ – масса жидкости в трубопроводах; T_p – расчетное значение нижней частоты колебаний; $2l/a$ – время пробега фронта волны давления по длине трубопровода; $T_{од}$; $T_{тр}$ – полученная в результате исследования одномассовой и трехмассовой моделей низшая частота колебаний; X_{max} ; $2A$ – максимальное перемещение и размах колебаний; P_i –давление жидкости в i -й полости трубопровода; $t_{зат}$ – время переходного процесса.

Таблица 1 Относительная точность динамических параметров систем с различным количеством масс для гидросистемы с двумя магистралями одинаковой длины

Параметры системы		Критерий адаптации	Относительная точность параметров систем									
			Одной	Тремя								
				$\frac{m_{ж}}{m}$	$\frac{T_p}{T_{од}}$	$\frac{T_p}{T_{тр}}$	$\frac{2l/a}{T_{ж1}}$	$\frac{2l/a}{T_{ж2}}$	$\frac{X_{од}}{X_{тр}}$	$\frac{A_{од}}{A_{тр}}$	$\frac{P_{1од}}{P_{1тр}}$	$\frac{P_{2од}}{P_{2тр}}$
1000	5	0,86	0,81	0,76	0,95	0,99	1,02	1,09	0,76	0,99	12,28	
	10	1,71	0,81	0,74	1,07	1,10	1,01	1,02	0,78	0,93	0,830	
	20	3,42	0,81	0,70	1,00	1,06	0,99	0,79	0,79	0,95	0,737	
	40	6,85	0,80	0,67	0,97	1,01	0,98	0,95	0,79	0,94	0,714	
	60	10,3	0,81	0,65	1,05	1,04	0,98	0,82	0,79	0,96	0,841	
	80	13,7	0,81	0,66	0,99	0,95	0,99	0,94	0,80	0,95	0,804	
2000	5	0,43	0,85	0,79	0,96	0,99	1,03	1,10	0,72	1,00	0,916	
	10	0,86	0,81	0,77	1,04	0,96	1,01	1,05	0,74	0,97	1,150	
	20	1,71	0,83	0,73	0,93	1,05	1,01	1,01	0,79	0,94	0,835	
	40	3,42	0,83	0,71	0,97	1,03	0,99	0,99	0,81	0,96	0,737	
	60	5,14	0,80	0,72	0,99	1,02	0,99	0,99	0,81	0,97	0,885	
	80	6,85	0,81	0,71	1,04	1,02	0,99	0,97	0,81	0,97	0,817	
5000	5	0,17	0,82	0,82	0,85	1,04	1,02	1,05	0,70	1,01	1,000	
	10	0,34	0,94	0,82	0,86	1,07	1,01	1,05	0,71	1,01	0,996	
	20	0,69	0,81	0,73	0,89	1,07	1,01	1,05	0,76	1,01	0,919	
	40	1,37	0,81	0,88	0,96	1,06	1,01	1,03	0,80	0,96	0,947	
	60	2,05	0,81	0,73	1,04	0,99	1,01	1,03	0,83	0,96	0,875	
	80	2,74	0,81	0,75	0,96	1,01	1,00	1,03	0,84	0,98	0,896	
10000	5	0,09	0,82	0,84	0,86	1,07	1,01	1,03	0,69	1,01	0,958	
	10	0,17	0,8	0,82	0,82	1,05	1,01	1,04	0,70	1,00	1,020	
	20	0,34	0,83	0,80	0,89	1,04	1,01	1,03	0,72	1,01	1,067	
	40	0,69	0,85	0,79	0,91	1,001	1,00	1,04	0,77	0,99	1,013	
	60	1,03	0,8	0,77	0,98	1,06	1,01	1,05	0,80	0,98	0,951	
	80	1,37	0,81	0,80	1,00	1,04	1,02	1,06	0,823	0,97	0,908	
20000	5	0,04	0,83	0,79	0,85	0,99	1,00	1,01	0,68	1,00	0,929	
	10	0,09	0,83	0,82	0,80	1,04	1,01	1,03	0,68	1,01	0,973	
	20	0,17	0,84	0,80	0,88	1,04	1,01	1,03	0,71	1,01	1,023	
	40	0,34	0,84	0,84	0,84	1,03	1,02	1,05	0,74	1,01	0,987	
	60	0,51	0,79	0,81	0,89	1,03	1,02	1,07	0,76	1,00	0,980	
	80	0,69	0,84	0,77	0,94	1,08	1,02	1,06	0,79	1,01	1,239	
50000	5	0,07	0,85	0,85	0,84	0,97	1,01	1,02	0,69	1,01		
	10	0,03	0,82	0,81	0,81	1,06	1,00	1,01	0,68	1,00	0,982	
	20	0,07	0,82	0,82	0,87	1,03	1,00	1,00	0,60	1,00	1,000	
	40	0,14	0,83	0,83	0,84	1,04	1,00	1,02	0,72	1,00	0,991	
	60	0,21	0,83	0,80	0,89	0,99	1,01	1,04	0,747	1,01	0,973	
	80	0,27	0,82	0,81	1,11	1,04	1,01	1,07	0,75	1,01	0,977	

Дальнейшая обработка результатов исследований заключалась в построении графиков трендов зависимости относительных параметров от критерия $m_{ж}/m$. Обобщенный график трендов зависимости относительных динамических параметров (таблица 1) от критерия $m_{ж}/m$ представлен на рис.5.

Анализ графиков, приведенных на рис.5, показывает, что частотные параметры сохраняют стабильность значений относительной $T_{од}/T_{тр}$ и абсолютной ($Tr/T_{од}$; $Tr/T_{тр}$; $2l/a/T_{ж}$) точности воспроизведения этих параметров в пределах $\pm 5\%$ практически во всем диапазоне значений критерия $m_{ж}/m$ ($0,02 < m_{ж}/m < 15$). Следует отметить, что, до значения критерия $m_{ж}/m = 0,6-0,7$ одно и трехмассовые модели воспроизводят низшую частоту колебаний с одинаковой точностью, причем значения частот, полученные на моделях на 4–5% ниже расчетных значений. Точность воспроизведения высшей частоты колебаний на трехмассовой модели несколько повышается с увеличением значения критерия $m_{ж}/m$ от 6–7% до 3–4%. Таким образом, наблюдается повышение точности воспроизведения высшей частоты с увеличением длины трубопроводов.

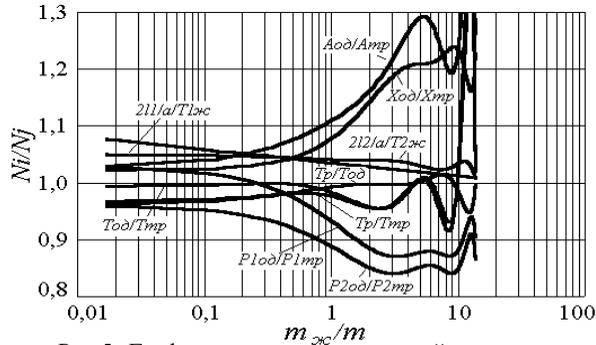


Рис.5. График трендов зависимостей относительных динамических параметров гидросистемы с двумя магистралями от критерия $m_{ж}/m$

Энергосиловые и кинематические параметры сохраняют стабильность значений относительной точности воспроизведения в пределах $\pm 5\%$ в диапазоне значений критерия $0,02 < m_{ж}/m < 0,09$. С увеличением значения критерия до $m_{ж}/m = 0,8$ относительная точность воспроизведения уменьшается до 10% и достигает 15–20% при $m_{ж}/m = 3$. В диапазоне значений критерия $3 < m_{ж}/m < 15$ относительная точность воспроизведения давлений стабилизируется в пределах 15%, кинематических параметров – превышает 20%. Жидкостное трение оказывает незначительное воздействие на высшую частоту колебаний (не более 2%) и на величину давлений в трубопроводах (не более 5%) во всем диапазоне исследуемых параметров.

Анализ данных, приведенных на рис.5 позволил определить диапазоны значения критерия $m_{ж}/m$ при различной точности воспроизведения динамических параметров систем, приведенный в табл.2.

Таблица 2 Диапазон значений критерия $m_{ж}/m$ при различной относительной точности динамических параметров системы с двумя магистралями

Точн. %	Параметры						
	$\frac{T_p}{T_{од}}$	$\frac{T_p}{T_{тр}}$	$\frac{T_{од}}{T_{тр}}$	$\frac{2l/a}{T_{жс}}$	$\frac{A_{од}}{A_{тр}}$	$\frac{X_{од}}{X_{тр}}$	$\frac{P_{од}}{P_{тр}}$
+10–20					0,9–3	1–9	
+5–10					0,2–0,9	0,5–1	
+0–5				0,01–14	0,01–0,2	0,01–0,5	
–0–5	0,01–14	0,01–14	0,01–14				0,01–0,3
–5–10							0,3–0,8
–10–20							0,8–13

В табл.2 обозначено: T_i – расчетный и полученные на моделях значения периода колебаний массы рабочего органа; $T_{ж}$ – период колебаний массы жидкости в трубопроводе; $2l/a$ – время пробега фронта волны давления по двойной длине трубопровода; X ; A – максимальное перемещение и размах колебаний массы рабочего органа; P – максимальные давления; индексы параметров: р, од, тр – соответственно расчетные и полученные при исследованиях одно и трехмассовых систем.

Данные, приведенные в табл.2 показывают, что в диапазоне значений критерия $0,02 < m_{ж}/m < 0,09$ расчетная схема гидросистемы с двумя магистралями может быть представлена в виде одномассовой системы с массой жидкости в трубопроводах приведенной к массе рабочего органа. Точность воспроизведения динамических параметров при такой замене не меньше 5%.

При значениях критерия $0,09 < m_{ж}/m < 0,9$ расчетная схема гидросистемы должна быть представлена в виде трехмассовой системы, в которой распределенная масса жидкости в каждом трубопроводе заменяется одной дискретной массой. Точность воспроизведения частотных параметров при такой замене не меньше 5%. Точность воспроизведения кинематических и энергосиловых параметров не меньше 10%. При значениях критерия $0,9 < m_{ж}/m < 3$ точность воспроизведения частотных параметров не ниже 5%; кинематических и энергосиловых параметров не меньше 20%.

Заключение. При выборе расчетных схем дискретно–континуальных гидромеханических систем с двумя магистралями целесообразно руководствоваться методикой, в которой критерием дискретности системы при замене распределенной массы в трубопроводе дискретными массами является отношение массы жидкости в трубопроводе к массе рабочего органа ($m_{ж}/m$). До значения критерия $m_{ж}/m < 0,09$ распределенная масса жидкости в трубопроводах не учитывается отдельной дискретной массой с точностью воспроизведения динамических параметров при такой замене не меньше 5%. При значениях критерия $0,09 < m_{ж}/m < 0,9$ распределенная масса жидкости в каждом трубопроводе заменяется одной дискретной

массой. Точность воспроизведения частотных параметров при такой замене не меньше 5%, энергосиловых – около 10%. При значениях критерия $0,9 < m_{ж}/m < 3$ точность воспроизведения частотных параметров не ниже 5%; кинематических и энергосиловых параметров не меньше 20%.

Для определения 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.

При применении в качестве критерия точности воспроизведения в имитационной модели гидросистемы с центральной массой частотных параметров (низшая частота колебаний) формулы

$$\beta = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{EF_1^2}{m_{np}V_1} + \frac{EF_2^2}{m_{np}V_2}}$$

следует учитывать, что эта формула выведена

для консервативной системы и, поэтому необходимо корректировать расчетную схему и методику ввода начальных условий в имитационную модель.

1. *Большаков В.И., Листопадов И.Б.* Особенности составления расчетных схем гидравлических систем // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии.* Вып.6. – К.: Наукова Думка, 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 // В сб. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии,* Вып.9, К.: Наукова Думка, 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. – 336с.

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