

# Визуализация взаимосвязи между динамикой системы и ее базовыми характеристиками

Г.В. Крейнин<sup>1,А</sup>, С.Ю. Мисюрин<sup>2,А,В</sup>, А.П. Нелюбин<sup>3,А,В</sup>, Н.Ю. Носова<sup>4,А,В</sup>

<sup>А</sup> Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН

<sup>В</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-9515-6766, [gkreynin@mail.ru](mailto:gkreynin@mail.ru)

<sup>2</sup> ORCID: 0000-0003-1020-0527, [symisyurin@mephi.ru](mailto:symisyurin@mephi.ru)

<sup>3</sup> ORCID: 0000-0002-7064-3103, [nelubin@gmail.com](mailto:nelubin@gmail.com)

<sup>4</sup> ORCID: 0000-0002-1213-9312, [natahys@mail.ru](mailto:natahys@mail.ru)

## Аннотация

В данной работе представлена безразмерная математическая модель динамики приводного комплекса и визуализация решения этой модели в графической форме, позволяющая в первом приближении получить сравнительные оценки (характеристики) полученных решений.

В качестве приводного комплекса авторами предложена оригинальная система управления двумя гидроприводами для поднятия груза в параллельном режиме. Отличительная особенность – это принятая схема управления комплекса через три гидравлических распределительных устройства, отвечающих за регулирование общей скорости подъема (и/или опускания) объекта и поддержание горизонтального положения объекта в пределах заданной точности в условиях наличия возмущающих факторов различной природы. Признаком отклонения объекта от горизонтального положения служит разность перемещений штоков гидроприводов от некоторого начального (базового) положения в данный момент времени. Математическая модель полученного объекта исследуется в безразмерных переменных, что значительно упрощает визуальный синтез объекта.

**Ключевые слова:** динамическая система, гидропривод, синтез, безразмерные параметры, визуализация.

## 1. Введение

В состав технологических процессов могут входить операции управляемого перемещения объектов большой массы, крупных габаритов, сложной геометрии или других неудобных для практики качеств. В ряде случаев такие операции выполняются двумя или более взаимодействующими друг с другом робототехническими устройствами. Фактор взаимодействия нескольких приводных и управляющих блоков существенно усложняет процесс синтеза таких систем, и, тем более, оптимизацию их структуры и параметров с учётом всех требований, критериев и ограничений, предъявляемых к системе. Существенную помощь здесь может оказать визуализация ожидаемых решений, особенно на начальных этапах проектирования. Под визуализацией имеется в виду представление в графическом, удобном для обозрения виде, комплекса результатов компьютерного моделирования динамики системы в диалоговом режиме. Визуальный анализ представленной информации позволяет относительно быстро получить наглядные оценки вариантов и использовать их в качестве исходного материала на последующих этапах поиска оптимального решения. В данной работе в качестве примера рассматривается целенаправленный процесс визуализации динамики манипулятора,

предназначенного для поднятия тяжелых грузов. Подъемная сила создается двумя параллельно, синхронно работающими гидроприводами с общей системой управления. Процедура визуализации использовалась для предварительной оценки общих свойств такой системы, ее предельных возможностей. При этом изучались способность системы обеспечить синхронное движение приводов при неравенстве их нагрузок, чувствительность к кратковременным скачкам нагрузки, влияние на процесс базовых параметров. Особо решалась проблема формирования блока критериев и ограничений, в том числе, не поддающихся формализации. В основе процедуры лежит компьютерное моделирование динамики системы, представленной безразмерной моделью, что способствует обобщению полученных данных.

Как показывает практика, в системах рассматриваемого типа находят применение исполнительные устройства с двигателями различного типа, но, в основном, с гидравлическими и электрическими двигателями. При перемещении особо тяжелых и громоздких объектов предпочтение отдается гидравлическим двигателям, которые отличаются высокой удельной мощностью и не требуют включения в конструкцию дополнительных механизмов усиления. Ряд примеров систем с параллельно действующими приводами приводятся в [1-4]. Однако имеется мало информации о методах синтеза, оптимизации структуры и параметров таких систем. Для решения подобных задач предлагается использовать разработанные авторами подходы, основанные на интерактивной процедуре синтеза динамических систем, рационализации их математических моделей, методах согласования процессов динамики и управления отдельных блоков, а также активном использовании теории подобия и, в особенности, теории аналогичности, в целях обобщения результатов [5-8]. В настоящей работе указанная задача решается на примере управления движением тяжелого объекта, перемещаемого двумя синхронно работающими поршневыми гидравлическими двигателями. Массовая нагрузка предполагается распределенной между двигателями неодинаково. Рассматривается начальный этап синтеза такой системы, в основе которого лежит анализ визуальных изображений компьютерного моделирования ее динамики.

## 2. Математическая модель системы

В основу положена математическая модель, полученная при следующих условиях. Приводами служат гидроцилиндры 1 и 2 одинаковых параметров и питаемых из общего источника (рис.1). Синхронно работающие приводы перемещают объект массой  $m = m_1 + m_2$ , где  $m_{1,2}$  – массовые нагрузки, приходящиеся на приводы. Закон движения реализуется управляемым изменением давления в нижних полостях, которые через регулирующий клапан 3, промежуточную полость 4 (объемом  $V$ ) и распределительный клапан 5 подключены к источнику питания (с давлением  $p_M$ ).

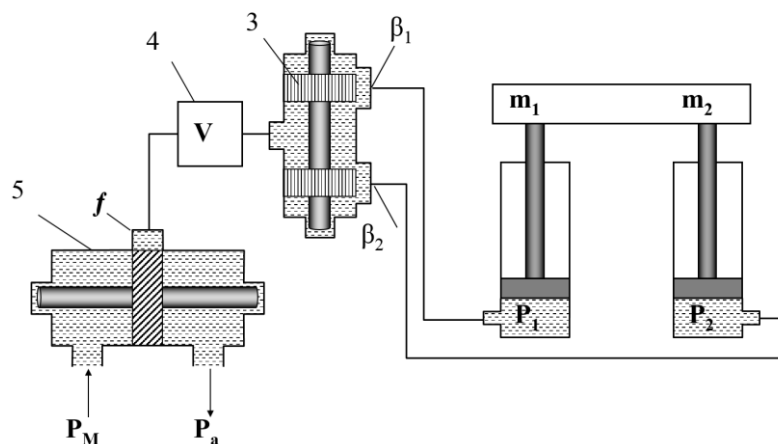


Рис. 1.

Уравнения движения приводов имеют вид:

$$m_{1,2}\ddot{x}_{1,2} = p_{1,2}F + m_{1,2}g - k_{1,2}\dot{x}_{1,2} + P_{L1,2}, \quad (1)$$

где  $x$  – перемещение поршня,  $p$  – давление в нижней полости,  $F$  – эффективная площадь поршня,  $m_{1,2}g$ ,  $P_{L1,2}$  – весовые и силовые нагрузки на штоке,  $k_{1,2}$  – коэффициенты жидкостного трения в приводе.

Изменения давлений  $p_{1,2}$  в нижних полостях приводов и давления  $p$  в промежуточной полости связаны зависимостями:

$$\dot{p} = W(\beta \operatorname{sgn}(\Delta p)\sqrt{|\Delta p|} - \beta_1 a_1 \operatorname{sgn}(\Delta p_1)\sqrt{|\Delta p_1|} - \beta_2 a_2 \operatorname{sgn}(\Delta p_2)\sqrt{|\Delta p_2|}), \quad (2)$$

$$\dot{p}_{1,2} = W_{1,2}(\beta_{1,2} a_{1,2} \operatorname{sgn}(\Delta p_{1,2})\sqrt{|\Delta p_{1,2}|} - \dot{x}_{1,2})$$

где  $W = (Ef / Fx_v)\sqrt{(2p_M) / \rho}$ ;  $W_{1,2} = (Ef / F(x_{01,2} + x_{1,2}))\sqrt{(2p_M) / \rho}$ ;  $\Delta p = p_M - p$ ;  $\Delta p_1 = p - p_1$ ,  $\Delta p_2 = p - p_2$ ;  $\beta$ ,  $\beta_1$  и  $\beta_2$  – степени открытия каналов  $f$ ,  $f_1$  и  $f_2$ ,  $\alpha_{1,2} = f_{1,2} / f$ ;  $E$  – модуль объемной упругости рабочей жидкости;  $x_v$  – приведенная длина промежуточной полости;  $\rho$  – плотность рабочей жидкости.

### 3. Трансформация модели в безразмерную форму

В предыдущих работах авторов [5-8] было показано, что в сложных, многопараметрических механических системах рекомендуется пользоваться безразмерными моделями, в которых реальные параметры и другие характеристики системы представляются безразмерными комплексами. Это сокращает число базовых параметров и позволяет получить обобщенные характеристики, что облегчает анализ и синтез приводного (мехатронного) комплекса. Переход к безразмерным параметрам основан на методике теории аналогичности [9] уравнения (1, 2) трансформируются в безразмерную форму заменой переменных их безразмерными аналогами  $\lambda$ ,  $\tau$ ,  $\sigma$  согласно соотношениям  $x = q_1 \lambda$ ,  $t = q_2 \tau$ ,  $p = q_3 \sigma$ . В результате этой замены, в первом приближении, а также  $m_{1,2} = c_{1,2} m$ ,  $\varepsilon = E / q_3$  и простых преобразований, получим трансформированную систему (3):

$$c_{1,2}\ddot{\lambda}_{1,2} = \sigma_{1,2} + c_{1,2}\chi_L - \kappa_{1,2}\dot{\lambda}_{1,2} + \chi_{L1,2}$$

$$\dot{\sigma} = K_v(\beta \operatorname{sgn}(\Delta\sigma)\sqrt{|\Delta\sigma|} - \beta_1 \alpha_1 \operatorname{sgn}(\Delta\sigma_1)\sqrt{|\Delta\sigma_1|} - \beta_2 \alpha_2 \operatorname{sgn}(\Delta\sigma_2)\sqrt{|\Delta\sigma_2|}) \quad (3)$$

$$\dot{\sigma}_{1,2} = (\varepsilon / (\lambda_{01,2} + \lambda))(\beta_{1,2} \alpha_{1,2} \operatorname{sgn}(\Delta\sigma_{1,2})\sqrt{|\Delta\sigma_{1,2}|} - \dot{\lambda}_{1,2})$$

Здесь приняты обозначения:

а) безразмерных переменных:  $\tau$  – время,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  – перемещения приводов;  $\sigma$ ,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  – давления в полостях;  $\Delta\sigma$ ,  $\Delta\sigma_1$ ,  $\Delta\sigma_2$  – перепады давлений между полостями;

б) безразмерных параметров: распределение  $c_{1,2}$  массовой нагрузки между приводами; общая массовая нагрузка  $\chi_L$  манипулятора  $\chi_L = mg / p_M F$ ; дополнительные силы

сопротивления  $\chi_{L1,2}$ ,  $\chi_{L1,2} = P_{L1,2} / p_M F$ ; жёсткость  $K_v$  промежуточной полости,  $K_v = \frac{\varepsilon}{\lambda_v}$ ;

приведенные начальные объёмы рабочих полостей приводов  $\lambda_{01,2}$ ,  $\lambda_{01,2} = x_{01,2} / q_1$ ; силы жидкостного трения  $\kappa_{1,2}$ ,  $\kappa_{1,2} = k_{1,2} U / p_M F$ , где  $U = (f / F)\sqrt{2p_M / \rho}$ ; соотношение между

размерами проходных сечений каналов  $\alpha_{1,2} = f_{1,2} / f$  клапанов 3 и 5.

Начальными условиями являются действительное время  $\tau_s$  движения массы  $m$  и величина  $x_s$  её хода. Поскольку масштабом  $q_1$  измерения безразмерного перемещения рабочий ход манипулятора, то принимается  $q_1 = x_s$ . Выбор параметров манипулятора основывается на результатах компьютерного моделирования трансформированных систем (3) и систем управления клапанами.

#### **4. Постановка задач выбора параметров манипулятора и их оптимизации**

Параметры манипулятора выбираются по следующим данным: рабочий ход объекта; заданное или минимальное время хода; масса перемещаемого объекта и распределение весовых нагрузок между приводами. Объектами выбора являются размеры гидроцилиндров, рабочее давление в гидравлической системе, проходные сечения клапанов и параметры их расходных характеристик, а также параметры систем управления клапанами.

#### **5. Интерактивный визуальный анализ результатов моделирования**

Трансформированная компьютерная модель (3) используется в данном случае для исследования относительно мало изученной динамической системы с двумя гидравлическими исполнительными блоками, решающими совместно, пусть даже внешне простую, задачу линейного перемещения объекта, обладающего большими размерами и массой. При непрерывном взаимодействии приводов и внешнего объекта возникают достаточно сложные механические и гидравлические перекрестные связи, влияющие на динамику системы. Учёт этих связей затрудняется также тем, что в процессе движения могут возникать заранее непредсказуемые дополнительные возмущения в виде случайных сил сопротивления, нестабильности параметров и других факторов. Узлы системы, участвующие в движении, связаны друг с другом через гидравлические и механические контуры, которые оставляют некоторую взаимную свободу в движениях, что также влияет на качество выполнения операции.

Известно несколько методов поиска и выбора оптимального решения при синтезе сложной системы, в том числе методы многокритериальной оптимизации с введением весовых критериев [5, 7] или с учётом предпочтений. Данная работа посвящена этапу подготовке данных к использованию этих методов, для чего в интерактивном режиме сопоставляются результаты компьютерного моделирования, представленные в удобной для обозрения визуальной форме [10, 11].

Для представления получаемой информации в наглядном виде была написана специальная программа на языке Delphi, облегчающая визуальное сравнение получаемых решений по качеству. Интерфейс программы показан на рисунках 2-10. В левой части окна программы расположены поля для ввода 20 основных параметров модели. Используемые параметры и их обозначения в программе представлены в таблице 1. Правее расположена панель для ввода параметров численного метода Рунге-Кутты решения системы уравнений (3). Пользователь программы может выбрать порядок точности метода: 2-й или 4-й, а также задать шаг сетки  $h$  по шкале  $x$  перемещения поршня. Здесь же пользователь может указать контрольное значение параметра  $x$ , для которого в текстовом поле в окне программы будут выведены промежуточные результаты расчёта в численном виде. Смысл графического представления результатов, расположенного в правой части окна программы, будет пояснен далее при анализе конкретных примеров.

Таблица 1. Параметры модели системы

Обозначения	Обозначения в программе	Диапазоны изменения	Замечания
$c_1$	c1	0,4 – 0,6	Стойкость приводов к дисбалансу весовой нагрузки
$ \chi_L $	del	0,4 – 2	Относительная общая рабочая нагрузка на приводы, служащая одновременно мерой их размеров
$\lambda_V$		0,2 – 1,0	Мера объёма промежуточной камеры
$\beta_0$	beo	0,3 – 0,7	Задаваемая доля открытия общего канала в линии, ведущей к приводам, приходящаяся на первый привод.
$\alpha_1$	a1	0,25 – 1	Соотношение между проходными сечениями общего подводящего канала и канала, ведущего к первому приводу
$\alpha_2$	a2	0,25 – 1	То же для канала, ведущего ко второму приводу
$\kappa_1$	nu1	0,05 – 0,1	Коэффициент жидкостного трения первого привода
$\kappa_2$	nu2	0,05 – 0,1	Коэффициент жидкостного трения второго привода
$\vartheta_1$	kd1	25 – 50	Коэффициент обратной связи по положению
$\vartheta_2$	kv1	0 – 50	Коэффициент обратной связи по скорости
$\vartheta_D$	kd	25 – 100	Коэффициент обратной связи по положению
$\vartheta_V$	kv	0 – 5	Коэффициент обратной связи по скорости
$ \chi_{L1} $	dell1	0 – 0,1	Дополнительная кратковременная скачкообразная сила сопротивления, действующая на первый привод
$ \chi_{L2} $	dell2	0 – 0,1	Дополнительная кратковременная скачкообразная сила сопротивления, действующая на второй привод
$E$	nux	500	Безразмерный аналог модуля упругости жидкости (не варьируется)
$\lambda_{01}$	L1	0,05 – 1	Мера начального (вредного) объёма первого привода
$\lambda_{02}$	L2	0,05 – 1	Мера начального (вредного) объёма второго привода

Анализировалась динамика четырех вариантов системы: 1) с одинаковой нагрузкой на приводы; 2) случай 1) + дополнительные кратковременные нагрузки; 3) с неодина-

ковыми нагрузками на приводы; 4) с разными относительными нагрузками приводов, что эквивалентно их разным размерам.

Вариант 1. На рис. 2. представлены характеристики движения системы при одинаковых массовых нагрузках на приводах ( $c_1 = c_2$ ) и при отсутствии других силовых нагрузок. В нижней части колонки а) представлены кривые перемещения и скорости первого привода, в верхней части этой колонки – давления в его рабочей полости; в колонке б) – аналогичные показатели второго привода. В колонке с) показаны кривые открытия каналов, изменения критерия  $\Delta\lambda$  рассогласования в движении приводов и, вверху – давления в промежуточной полости. Обозначения указанных величин были объяснены в предыдущем разделе. Кривые на последующих рисунках располагаются в таком же порядке. Кроме того, слева от графиков на каждом рисунке приводится таблица значений параметров, выбранных для данного варианта модели. Масштаб по перемещению  $\lambda$  увеличен в два раза относительно давления  $\sigma$ . Масштаб по скорости  $\dot{\lambda}$  в десять раз относительно давления. Масштаб по  $\beta$  (величина проходного сечения) увеличен в пять раз относительно давления.

Из графиков следует, что в условиях варианта 1, не смотря на высокий уровень нагрузки приводов ( $|\chi_L| = 1,6$ ), заданные законы движения приводов реализуются с хорошей точностью, а давления во всех полостях после кратковременного начального возмущения быстро стабилизируются. Функционирование системы при условиях варианта 1 отличается весьма малой чувствительностью к вариации  $\dot{\lambda}$  параметров в пределах всего выбранного диапазона.

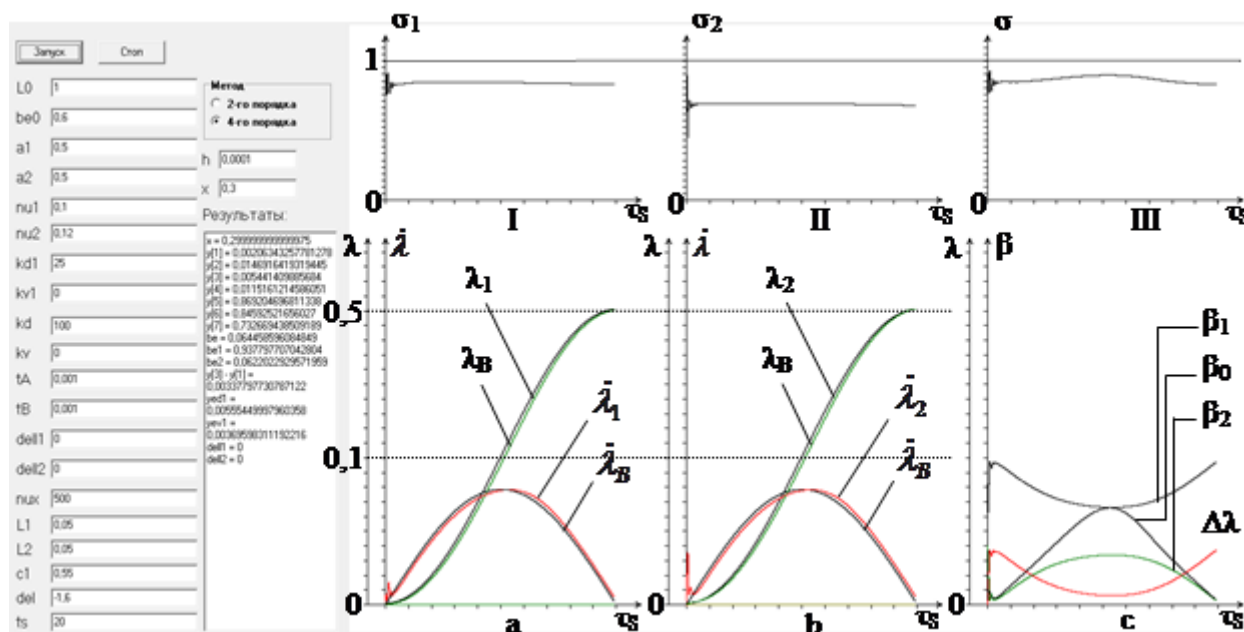


Рис. 2.

Вариант 2. В этом варианте приводы находятся под дополнительным воздействием случайных кратковременных сил сопротивления ( $|\chi_{L,2}| = 0,1$ ). Периоды их действия отмечены метками внизу на графиках, представленных на рис. 3. Можно видеть, что скачкообразные возмущения, хотя и влияют на процесс, но после прекращения действия возмущения процесс восстанавливается. Следует иметь в виду, что результаты, представленные на рис. 2 и рис. 3, получены при условии отсутствия дисбаланса массовых нагрузок на приводах. Именно этим объясняется возможность выбора столь высокой величины  $|\chi_L| = 1,6$ , близкой к верхнему пределу (минимальному размеру приводов).

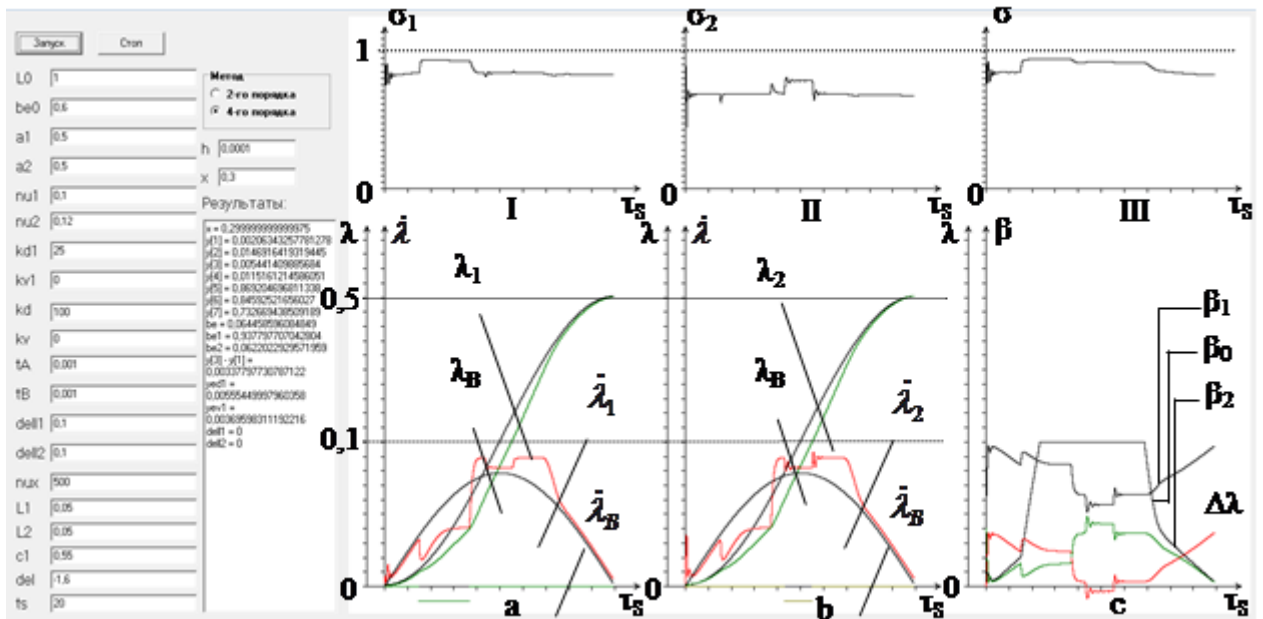


Рис. 3.

Вариант 3. Дисбаланс массовых нагрузок приводов ( $c_1 \neq c_2$ ) оказывает существенное влияние на ход процесса. Исследование показало, что при значениях параметров, указанных на рис. 6, допускаются, причем условно, весьма узкие пределы вариации  $c_1 = 0,45 - 0,55$ , хотя и здесь (см. рис. 6) заметно нарушение процесса. Вне указанных пределов система практически неработоспособна, о чем свидетельствуют графики, представленные на рис. 4 и рис. 5: в первом случае (рис.4)  $c_1 = 0,6$ , т.е. дисбаланс составляет  $\Delta c = 0,6 - 0,5 = 0,1$ , во втором случае (рис. 5) - дисбаланс такой же, но противоположного знака.

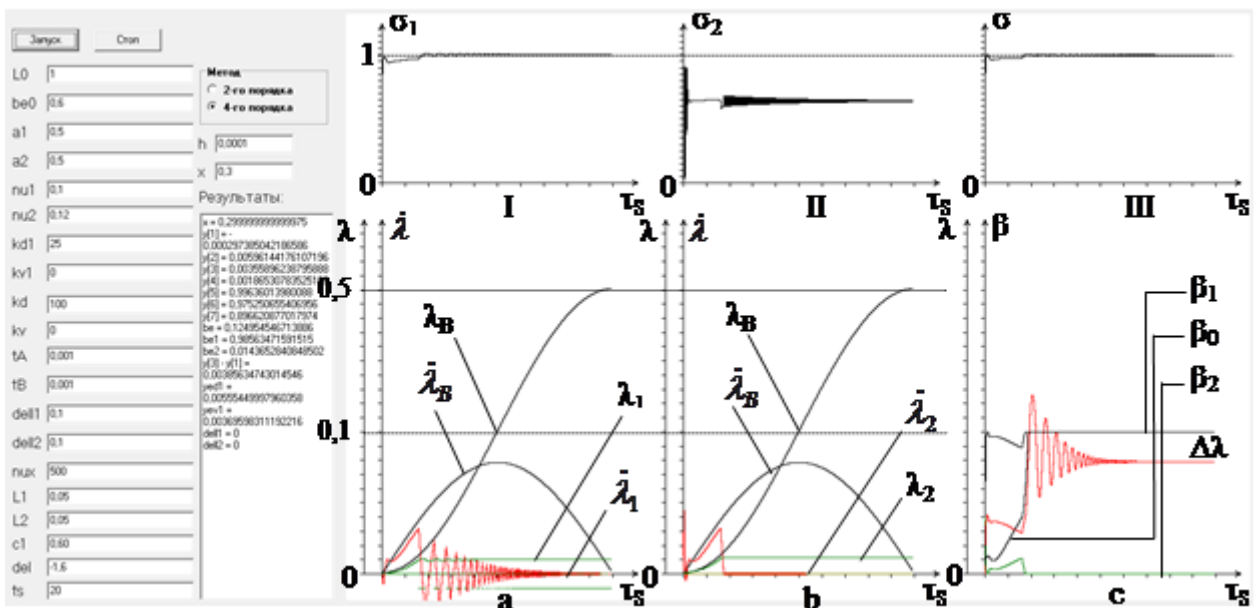


Рис. 4.

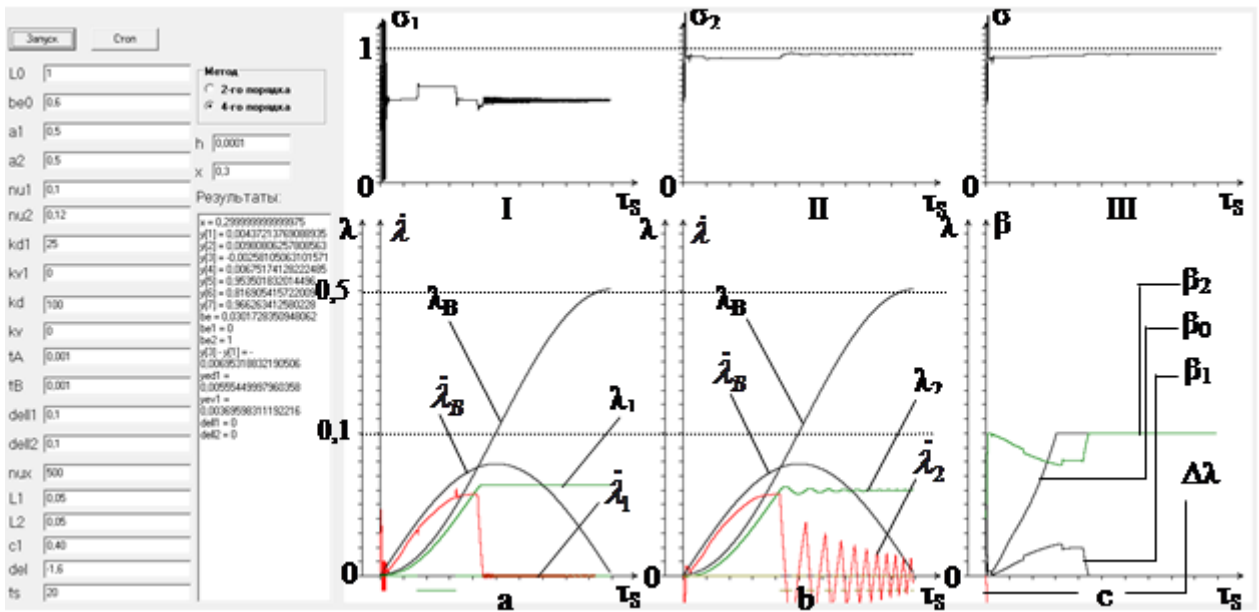


Рис. 5.

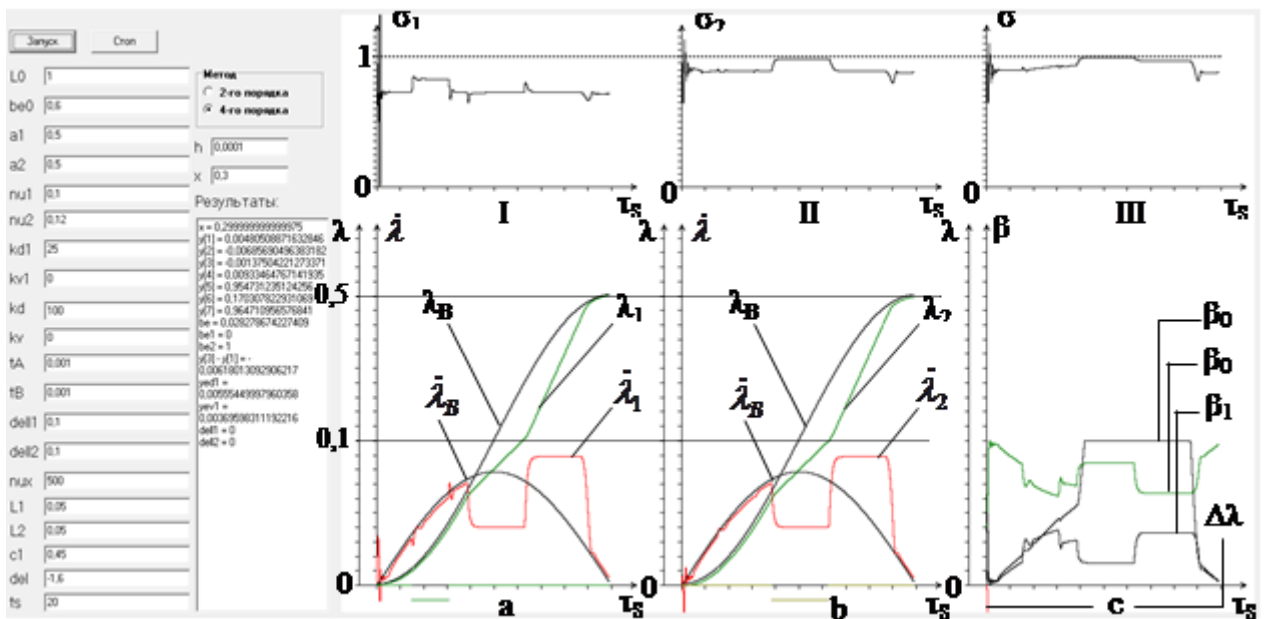


Рис. 6.

Однако этот вывод получен, как уже указывалось выше, при заниженных размерах приводов. Исследование показало, что допустимый дисбаланс может превосходить  $\Delta c = 0,2$ , если  $|\chi_L| = 1$ , что соответствует почти двукратному увеличению размеров приводов. При необходимости допустимый дисбаланс нагрузки можно увеличить за счет приводов еще больше. Эта проблема должна решаться в соответствии с требованиями к проектируемой системе.

Вариант 4. Последний вывод подтверждается также результатами моделирования, представленными на рис. 8, которые получены при значении  $|\chi_L| = 0,2$ . Существенное снижение уровней давления во всех полостях свидетельствует об избыточности движущих сил приводов, которые легко справляются с задачей. А из сравнения кривых,



показанных на рис. 6 ( $|\chi_L| = 1,6$ ) и на рис.7 ( $|\chi_L| = 1,8$ ), виден процесс постепенного разрушения режима движения по мере снижения движущей силы приводов.

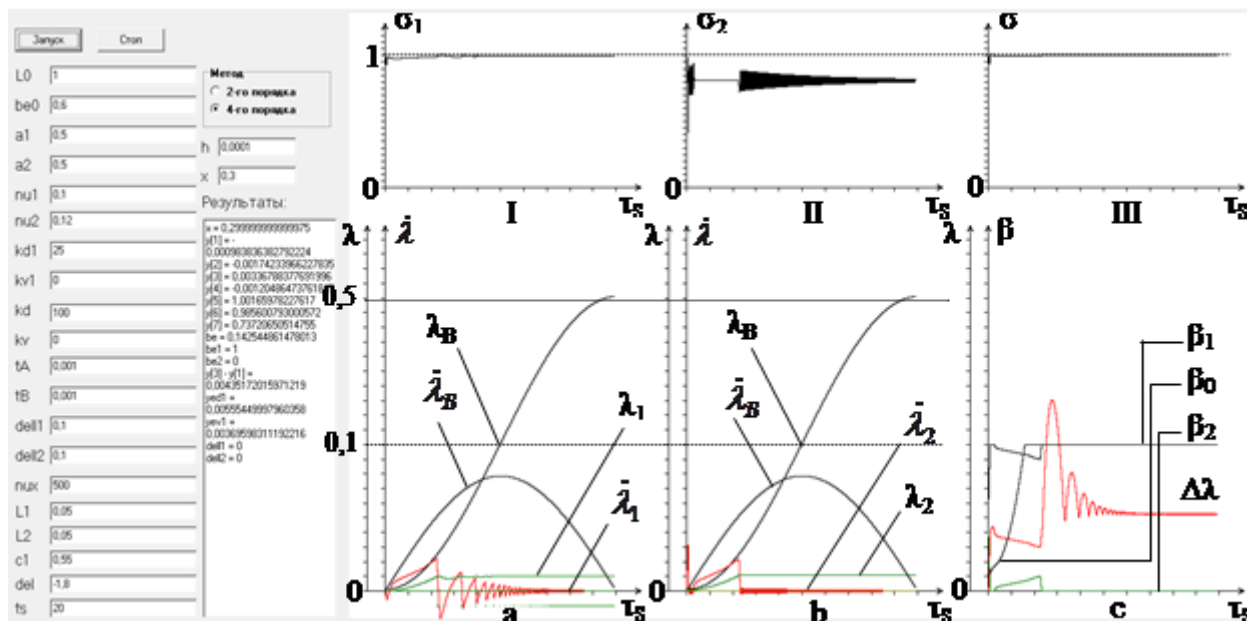


Рис. 7.

В заключение рассмотрим дополнительно влияние на качество процесса фактора времени, который в принятой нами модели задается параметром  $\tau_s$ , выбираемым в интервале 15-40. От величины этого параметра напрямую зависят скоростные возможности привода. Минимальная величина  $\tau_s$ , т.е. предельная скорость привода, ограничена. Условие ограничения можно выразить неравенством  $\dot{\lambda} \geq 0,95\dot{\lambda}_B$ , которое должно выполняться, когда  $\chi_{L1} = \chi_{L2} = 0$  и  $x = \tau_s/2$ . Из сравнения результатов моделирования, представленных на рис. 9 и рис. 10, следует вывод о том, что увеличение  $\tau_s$  (в данном случае от 17 до 40) стабилизирует процесс. Вместе с тем, дальнейшее увеличение  $\tau_s$  может вызвать неустойчивость в конце хода из-за существенного снижения скорости движения.

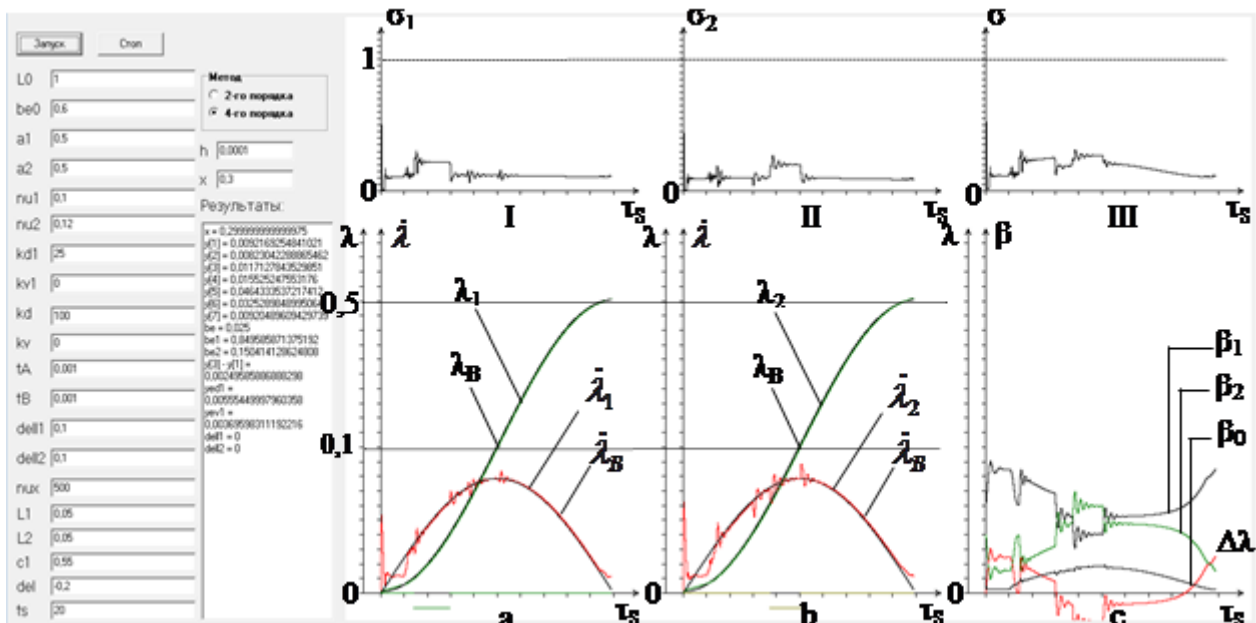


Рис. 8.

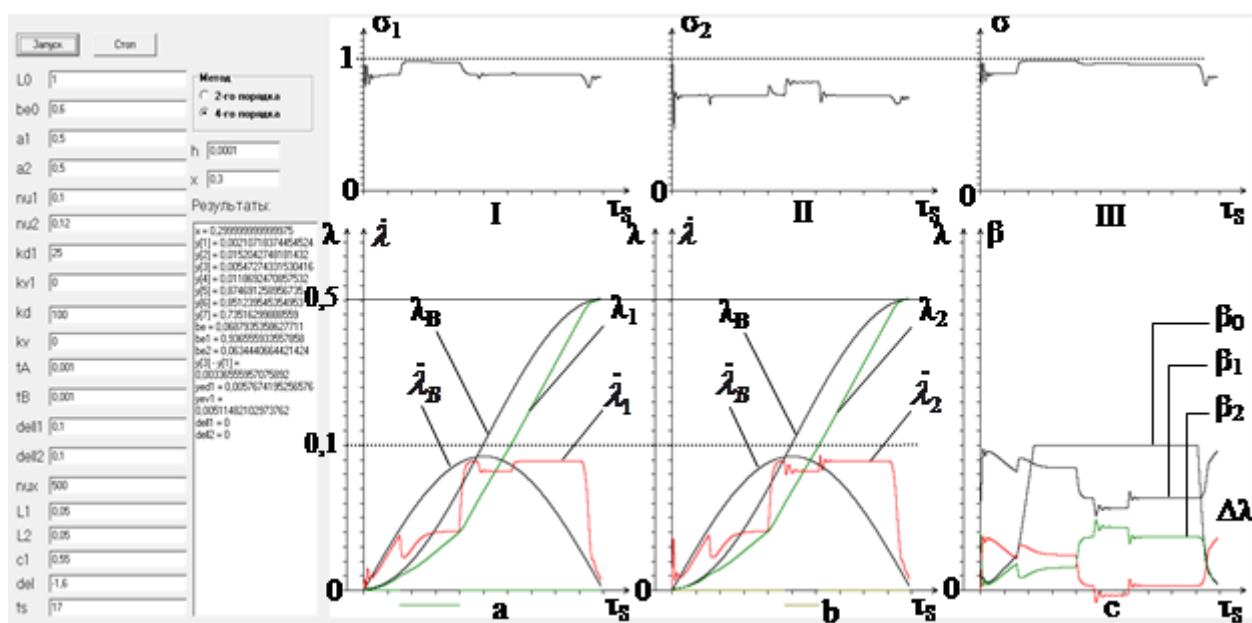


Рис. 9.

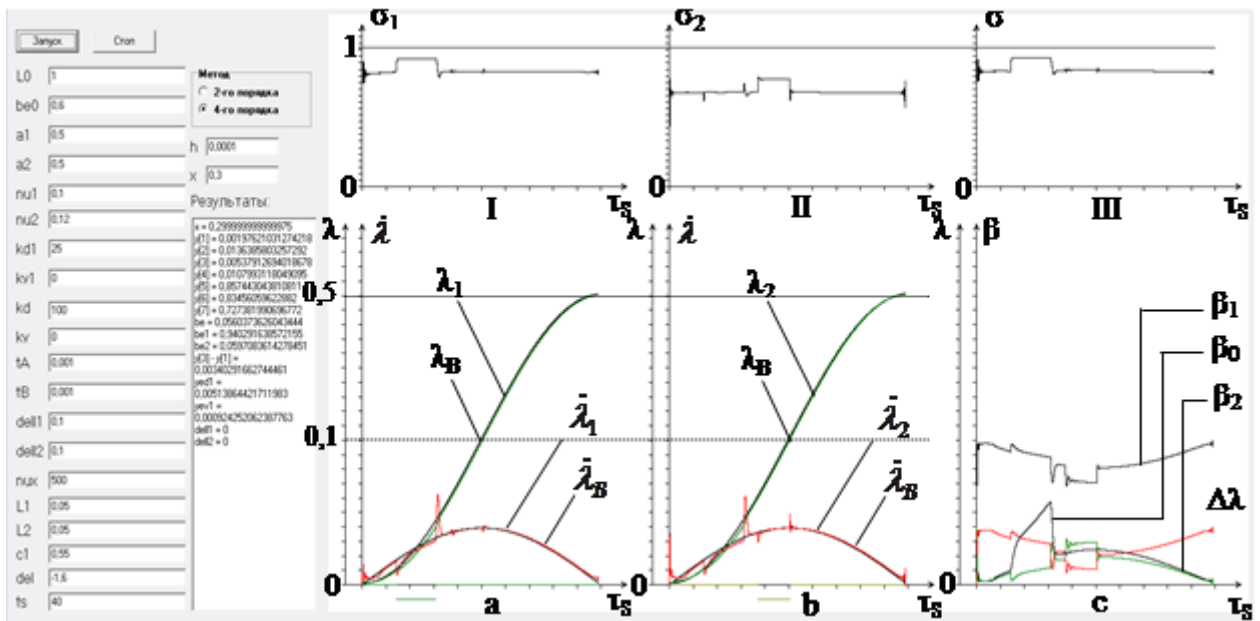


Рис. 10.

## 6. Выводы

В работе представлена аналитическая интерактивная процедура формирования и обработки информации о динамике проектируемого объекта, которая далее может служить базой для его многопараметрической, многокритериальной оптимизации различными методами. Информация получается методом компьютерного моделирования поведения системы. Характерной особенностью процедуры является визуальная форма представления результатов, получаемых в интерактивном режиме с последовательным и целенаправленным выбором значений параметров модели при переходе от одного варианта к другому. Для достижения большей общности выводов модель системы со всеми ее характерными показателями (критериями, ограничениями) приведена к безразмерному виду.

Можно отметить следующие проблемы, которые могут быть решены с помощью предлагаемой процедуры. Прежде всего, это переформирование (сужение) пространства поиска хорошего решения за счет исключением из него явно неперспективных областей, и оценка реализуемости системы при каждом наборе параметров. В примере с манипулятором было в частности установлено, что синхронное движение приводов может быть в принципе реализовано в достаточно широком диапазоне изменения параметров, с отклонениями не более, чем 5% от величины полного хода.

Относительно просто выделяются параметры модели, которые мало влияют на работу системы и, поэтому, для них можно выбирать фиксированные значения. К таким величинам в рассматриваемой модели относится, например, параметр, характеризующий объем промежуточной полости.

Визуализация результатов моделирования полезна для формализации сложных взаимосвязей между несколькими параметрами. В качестве примера можно указать на взаимосвязь дисбаланса нагрузок  $\Delta c$ , параметров  $a_1, a_2$ , характеризующих величины проходных сечений каналов гидросистемы, и размера привода  $|\chi_L|$ . Путем согласования этих величин можно существенно увеличить допустимый дисбаланс. Определенная проблема возникла при формализации оценки чувствительности манипулятора к резким, кратковременным относительно небольшим силовым помехам. В результате выбор пал на использование только наглядной информации.

Было получено относительно простое условие, которое в явном виде дает оценку реализуемости требуемого быстродействия приводов, работающих в режиме заданного закона движения.

Предложенная схема согласованного управления двумя параллельно работающими гидроприводами оказалась весьма эффективной и может быть рекомендована для использования в промышленности. Система обеспечивает достаточно высокую синхронность в движении приводов при дисбалансе массовых нагрузок  $c_1$  ( $c_2$ ) в диапазоне от 0,4-0,6 и выше в условиях действия кратковременных силовых возмущений. Процедура визуализации результатов анализа и синтеза системы упрощает подготовку к поиску оптимального решения и, поэтому, может быть рекомендована для использования в учебном процессе технических вузов при изучении работы приводных систем и мехатронных комплексов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 18-29-10072).

## Список литературы

1. Xiao Y., Zhu K.Y. Optimal Synchronization Control of High-Precision Motion Systems // IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, Vol. 53, Issue 4, pp. 1160-1169. DOI: 10.1109/TIE.2006.878317
2. Hsieh M.-F., Tung C.-J., Yao W.-S., Wu M.-C., Liao Y.-S.. Servo design of a vertical axis drive using dual linear motors for high speed electric discharge machining // International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, Vol. 47, Issues 3-4, pp. 546-554. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.05.011
3. Vorberg D., Schulzeb H.-H.. Linear phase-correction in synchronization: Predictions, parameter estimation, and simulations // Journal of Mathematical Psychology, 2002, Vol. 46, Issue 1, pp. 56-87. DOI: 10.1006/jmps.2001.1375
4. Dongmei Y., Qingding G., Qing H., Jiang L. Position synchronized control of dual linear motors servo system using fuzzy logic // Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA), 2006, Vol. 2, pp. 8041-8044. DOI: 10.1109/WCICA.2006.1713539
5. Ivlev V.I., Bozrov V.M., Misyurin S.Yu., Nelyubin A.P. Parameterization of an air motor based on multiobjective optimization and decision support // Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2013, Vol. 42, No. 5, pp. 353-358. (ISSN 105-6188, Перевод: Выбор параметров пневмомотора на основе методов многокритериальной оптимизации и поддержки принятия решений управления). DOI: 10.3103/S1052618813050051
6. Kreinin G.V., Misyurin S.Yu. Phased synthesis of a mechatronic system // Doklady Physics, 2014, Vol. 59, Issue 11, pp. 539-543. (ISSN 1028\_3358, Перевод: Поэтапный синтез мехатронной системы). DOI: 10.1134/S102833581411010X
7. Misyurin S.Yu., Kreinin G.V. Power optimization criteria of a mechanical unit of an automated actuator // Doklady Physics, 2015, Vol. 60, Issue. 1, pp. 15-18. (ISSN 1028\_3358 Перевод: Критерии оптимизации энергетики механической системы автоматизированного привода). DOI: 10.1134/S1028335815010036
8. Misyurin S.Yu., Nelyubin A.P., Ivlev V.I. Multicriteria adaptation of robotic groups to dynamically changing conditions // Journal of Physics: Conference Series, 2017, Vol. 788, Issue 1, № статьи 012027 (Перевод: Многокритериальная адаптация робототехнических групп к динамически изменяющимся условиям). DOI: 10.1088/1742-6596/788/1/012027
9. Мамонтов М.А. Аналогичность. МО СССР. 1971. С.59.
10. Nelyubin A.P., Galkin T.P., Galaev A.A., Popov D.D., Misyurin S.Yu., Pilyugin V.V. Usage of visualization in the solution of multicriteria choice problems // Scientific Visualization, 2017, Vol. 9, Issue 5, pp. 59-70. DOI: 10.26583/sv.9.5.05

11. Manakov D.V. Data abstraction models: Sampling (parallel coordinates), filtering, clustering // Scientific Visualization, 2019, Vol. 11, Issue 1, pp. 139-176. **DOI:** 10.26583/sv.11.1.11

## Visualization of the interconnection between dynamics of the system and its basic characteristics

G.V. Kreinin<sup>1,A</sup>, S.Yu. Misyurin<sup>2,A,B</sup>, A.P. Nelyubin<sup>3,A,B</sup>, N.Yu. Nosova<sup>4,A,B</sup>

<sup>A</sup> Mechanical Engineering Research Institute RAS

<sup>B</sup> National Research Nuclear University MEPhI

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-9515-6766, [gkreynin@mail.ru](mailto:gkreynin@mail.ru)

<sup>2</sup> ORCID: 0000-0003-1020-0527, [symisyurin@mephi.ru](mailto:symisyurin@mephi.ru)

<sup>3</sup> ORCID: 0000-0002-7064-3103, [nelubin@gmail.com](mailto:nelubin@gmail.com)

<sup>4</sup> ORCID: 0000-0002-1213-9312, [natahys@mail.ru](mailto:natahys@mail.ru)

### **Abstract**

The paper presents a dimensionless mathematical model of the dynamics of the drive complex and the visualization of the solution of this model, which allows to obtain comparative estimates (characteristics) of the solutions obtained in the first approximation.

The authors proposed an original control system for the drive complex of two hydraulic actuators to lift the load in parallel mode. A distinctive feature is the adopted control circuit of the complex through three hydraulic switchgears, which are responsible for regulating the overall lifting (and/or lowering) speed of the object and maintaining the horizontal position of the object within the specified accuracy in the presence of disturbing factors of different nature. The difference in displacements of the hydraulic actuator rods from some initial (basic) position at a given time is a sign of deviation of the object from the horizontal position. The mathematical model of the object obtained is investigated in dimensionless variables, which greatly simplifies the visual synthesis of the object.

**Keywords:** dynamic system, hydraulic drive, synthesis, dimensionless parameters, visualization.

### **References**

1. Xiao Y., Zhu K.Y. Optimal Synchronization Control of High-Precision Motion Systems // IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, Vol. 53, Issue 4, pp. 1160-1169. **DOI:** 10.1109/TIE.2006.878317
2. Hsieh M.-F., Tung C.-J., Yao W.-S., Wu M.-C., Liao Y.-S.. Servo design of a vertical axis drive using dual linear motors for high speed electric discharge machining // International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, Vol. 47, Issues 3-4, pp. 546-554. **DOI:** 10.1016/j.ijmachtools.2006.05.011
3. Vorberg D., Schulzeb H.-H.. Linear phase-correction in synchronization: Predictions, parameter estimation, and simulations // Journal of Mathematical Psychology, 2002, Vol. 46, Issue 1, pp. 56-87. **DOI:** 10.1006/jmps.2001.1375
4. Dongmei Y., Qingding G., Qing H., Jiang L. Position synchronized control of dual linear motors servo system using fuzzy logic // Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA), 2006, Vol. 2, pp. 8041-8044. **DOI:** 10.1109/WCICA.2006.1713539
5. Ivlev V.I., Bozrov V.M., Misyurin S.Yu., Nelyubin A.P. Parameterization of an air motor based on multiobjective optimization and decision support // Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2013, Vol. 42, No. 5, pp. 353-358. (ISSN 105-6188, Перевод: Выбор параметров пневмомотора на основе методов многокритериальной оп-

- тимизации и поддержки принятия решений управления). **DOI:** 10.3103/S1052618813050051
6. Kreinin G.V., Misyurin S.Yu. Phased synthesis of a mechatronic system // *Doklady Physics*, 2014, Vol. 59, Issue 11, pp. 539–543. (ISSN 1028\_3358, Перевод: Поэтапный синтез мехатронной системы). **DOI:** 10.1134/S102833581411010X
  7. Misyurin S.Yu., Kreinin G.V. Power optimization criteria of a mechanical unit of an automated actuator // *Doklady Physics*, 2015, Vol. 60, Issue. 1, pp. 15–18. (ISSN 1028\_3358Перевод: Критерии оптимизации энергетики механической системы автоматизированного привода). **DOI:** 10.1134/S1028335815010036
  8. Misyurin S.Yu., Nelyubin A.P., Ivlev V.I. Multicriteria adaptation of robotic groups to dynamically changing conditions // *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, Vol. 788, Issue 1, № статьи 012027 (Перевод: Многокритериальная адаптация робототехнических групп к динамически изменяющимся условиям). **DOI:** 10.1088/1742-6596/788/1/012027
  9. Mamontov M. A. Analogichnost'. MO OF THE USSR. (Перевод: Мамонтов М.А. Аналогичность. МО СССР.) 1971. С.59.
  10. Nelyubin A.P., Galkin T.P., Galaev A.A., Popov D.D., Misyurin S.Yu., Pilyugin V.V. Usage of visualization in the solution of multicriteria choice problems // *Scientific Visualization*, 2017, Vol. 9, Issue 5, pp. 59-70. **DOI:** 10.26583/sv.9.5.05
  11. Manakov D.V. Data abstraction models: Sampling (parallel coordinates), filtering, clustering // *Scientific Visualization*, 2019, Vol. 11, Issue 1, pp. 139-176. **DOI:** 10.26583/sv.11.1.11