

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ (05.13.18)

УДК 004.942.004.14:62.82

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-1-97-104

## Общий подход к построению математических моделей и алгоритмов решения прямой и обратной задач для следящего гидравлического привода с дроссельным управлением

Ю.Ю. Зуев, Е.Ю. Зуева

Отмечено, что решение прямых и обратных параметрических задач для гидравлических следящих приводов с дроссельным управлением потоками энергии (ГСП/Д) обычно базируется на различных математических моделях и комплексах прикладных программ в зависимости от целей решения, установленной структуры и исполнения привода, а также от вида входного информационного сигнала. ГСП/Д с механическим сигналом известен как гидромеханический следящий привод (ГМСП/Д), а с электрическим — как электрогидравлический (ЭГСП/Д). Возможны также ГСП/Д специального назначения с комбинированным сигналом. Разнообразие моделей усложняет формирование алгоритмов и работу с получаемой информацией, в частности, переход от прямых к обратным сценариям. В то же время, независимо от вида информационного сигнала, в структуру привода входит единый энергетический контур — совокупность выходного каскада гидроусиления и гидродвигателя. Именно он определяет энергетические и динамические показатели ГСП/Д.

Представлена универсальная математическая модель одноканального ГСП/Д, одинаково эффективная для решения прямых и обратных задач применительно к ГМСП/Д и ЭГСП/Д.

Подробно рассмотрены особенности записи универсальной модели для ГМСП/Д и ЭГСП/Д, приведена схема реализации комплекса программ численного решения прямой и обратной задач, а также даны алгоритмы решения прямой и обратной параметрической задачи для этой модели.

Сформированы универсальный алгоритм и схема решения прямой и обратной оптимизационной по Парето задач для нескольких частных показателей конкурентоспособности.

Показаны преимущества применения универсальной модели для реального оптимизационного проектирования приводов данного класса.

*Ключевые слова:* гидравлический следящий привод, универсальные математические модели, прямая и обратная задачи, показатели работоспособности и конкурентоспособности, оптимизация по Парето, обобщенный функционал конкурентоспособности.

*Для цитирования:* Зуев Ю.Ю., Зуева Е.Ю. Общий подход к построению математических моделей и алгоритмов решения прямой и обратной задач для следящего гидравлического привода с дроссельным управлением // Вестник МЭИ. 2020. № 1. С. 97—104. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-1-97-104.

## A General Approach to Constructing Mathematical Models and Algorithms for Solving Direct and Inverse Problems for a Fluid Servo Drive with Throttle Control

Yu. Yu. Zuev, E. Yu. Zueva

It is pointed out that direct and inverse parametric problems on fluid servo drives with throttle control of energy flows (FSD/T) are usually dealt with using various mathematical models and packages of application computer programs depending on the solution objectives, established drive structure and design, and the type of input information signal. An FSD/T with a mechanical signal is known as a hydromechanical servo drive

(HMSD/T), and that with an electrical is known as an electrohydraulic servo drive (EHSD/T). Special-purpose fluid servo drives with throttle control that use a combined signal are also possible.

The variety of models is a factor that adds difficulty to development of algorithms and use of the obtained information; in particular, when transition from direct to inverse scenarios is made. At the same time, whatever the type of information signal, the drive structure contains the same energy loop, namely, a combination of the hydraulic amplifier output stage and a hydraulic motor. It is exactly this loop that determines the FSD/T power and dynamic performance characteristics.

A universal mathematical model of a single-channel FSD/T, which is equally effective for solving direct and inverse problems as applied to HMSD/T and EHSD/T, is presented.

The peculiarities of writing the universal model for HMSD/T and EHSD/T are considered in detail; a block diagram of implementing the software package for numerically solving direct and inverse problems is given, and algorithms for solving direct and inverse parametric problems for this model are presented.

A universal algorithm and block diagram for solving the direct and inverse Pareto optimization problem for some particular competition parameters are drawn up.

The advantages of using the universal model for the real optimization design of this class of drives are shown.

*Key words:* fluid servo drive, universal mathematical models, direct problem, inverse problem, performance indicators, competition indicators, Pareto optimization, generalized competition functional.

*For citation:* Zuev Yu.Yu., Zueva E.Yu. A General Approach to Constructing Mathematical Models and Algorithms for Solving Direct and Inverse Problems for a Fluid Servo Drive with Throttle Control. Bulletin of MPEI. 2020;1:97—104. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-1-97-104.

## Введение

Гидравлические следящие приводы с дроссельным управлением потоками гидроэнергии (ГСП/Д) широко применяются в силовых системах самых разнообразных технических объектов (ТО) благодаря своим преимуществам (компактности, быстродействию, сравнительно невысокой стоимости и др.), детально описанным в [1 — 4]. Для снижения затрат и времени при решении прямых (исследовательских) и обратных задач (проектирования, разработки, подбора привода для силовой системы ТО) все более важное значение приобретает численный эксперимент. Известна принципиальная сложность решения любой обратной задачи, связанная с информационным дефицитом и необходимостью оптимизации системы сразу по нескольким частным показателям конкурентоспособности (ПК), чаще всего меняющимся в различных направлениях по мере совершенствования проектного решения (так называемых конфликтных ПК). На практике такие решения обычно реализуются с помощью многофакторного анализа, т. е. многократного решения прямой задачи при изменении в целесообразном направлении структуры системы (структурный синтез) или варьируемых параметров (параметрический синтез). Сказанное в полной мере относится к ГСП/Д, имеющим ряд специфических особенностей, для которых пока не существует замкнутых алгоритмов даже параметрического синтеза.

Решение прямых и обратных параметрических задач для ГСП/Д базируется на различных математических моделях и комплексах прикладных программ в зависимости от целей решения, установленной структуры и исполнения привода, а также от вида входного информационного сигнала (механического, электрического или комбинированного — для приводов специального исполнения и назначения). Разнообразие моделей усложняет формирование алгоритмов и работу

с получаемой информацией, в частности, переход от прямых к обратным сценариям.

Представлены универсальная линейная математическая модель одноканального ГСП/Д, блок-схема реализации комплекса программ численного решения прямой и обратной задач применительно к двум наиболее используемым видам информационного сигнала — механическому (в данном случае ГСП/Д — гидромеханический следящий привод с дроссельным управлением потоками гидроэнергии — ГМСП/Д) и электрическому (ГСП/Д — электрогидравлический следящий привод — ЭГСП/Д) и алгоритмы решения прямой и обратной параметрических задач.

### Гидравлический следящий привод с дроссельным управлением потоками гидроэнергии — как исполнительный модуль силовой системы

#### Допущения при формировании математической модели ГСП/Д.

Функциональное позиционирование ГСП/Д в составе силовой системы ТО, предназначенного для перемещения объекта регулирования (ОР) с использованием ресурсов ТО, представлено на рис. 1.

Схематично внешний вид рассматриваемых одноканальных ГСП/Д с гидродвигателями — гидроцилиндрами Ц и возвратно-поступательным движением выходного звена показан на рис. 2. Известно, что для ГМСП/Д применяется однокаскадный золотниковый гидроусилитель (ЗГУ), а для ЭГСП/Д — одно- или многокаскадный электрогидравлический усилитель (ЭГУ) с непроточным выходным каскадом [1, 3, 4, 5 — 7].

Основные допущения, использованные при составлении моделей, традиционны, их справедливость многократно подтверждена практикой расчетов и проектирования указанных систем [1 — 5, 8]:

- в моделях приводов, работающих в составе силовой системы управления ОР, имеется недеформируе-



Рис. 1. Функциональное позиционирование ГСП/Д в силовой системе объекта

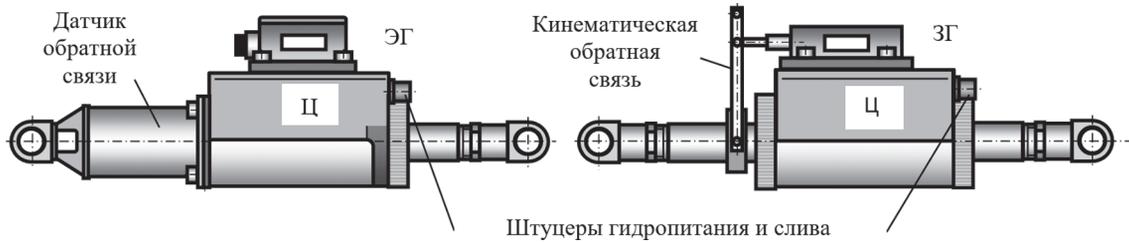


Рис. 2. Внешний вид одноканальных ЭГСП/Д (слева) и ГМСП/Д (справа)

мая безлюфтовая силовая проводка с неизменным по координате штока Ц передаточным отношением  $i_{\text{ст}}$ , соединяющая выходное звено (шток Ц) с ОР;

- исследование динамики линейных моделей проходит «в малом», вследствие чего позиционная составляющая нагрузки приводов равна нулю [1 — 4, 9];
- масса привода существенно меньше массы перемещаемых частей ОР;
- потери энергии при движении жидкости в каналах привода пренебрежимо малы;
- температура жидкости и конструкции приводов, модуль упругости жидкости, давление в линии гидропитания, слива неизменны, волновые процессы быстротечны и завершаются до изменения фазовых переменных в нестационарных режимах приводов.

**Исходные модели и универсальная математическая модель гидравлического следящего привода с дроссельным управлением потоками гидроэнергии**

С учетом введенных допущений линейная модель ЭГСП/Д, используемая для анализа динамики привода при воздействии входного информационного сигнала, равна [3]:

$$\left. \begin{aligned} \Delta U &= k_U U_{\text{вх}} - U_{\text{ос}} = k_U U_{\text{вх}} - k_{\text{дос}} W_{\text{СА}}(s)(y + k_s y_\phi); \\ x &= W_{\text{ЭГУ}}(s) W_{\text{ЭУ}}(s) \Delta U; \\ k_{Qx} x &= Fsy + (k_{Qp} + k_{\text{он}}) \left[ 1 + \frac{V}{2E(k_{Qp} + k_{\text{он}})} s \right] p; \\ Fp &= sD \left( \frac{m}{D} s + 1 \right) y; \quad C_\phi y_\phi = Fp, \end{aligned} \right\} (1)$$

где  $k_U$  — коэффициент коррекции уровня входного информационного сигнала — входного напряжения  $U_{\text{вх}}$ ;  $U_{\text{ос}}$  — напряжение в цепи главной электрической обратной связи (ЭОС) привода;  $\Delta U$  — напряжение элек-

трической ошибки (рассогласования);  $s$  — оператор Лапласа;  $W_{\text{СА}}(s)$  — передаточная функция (ПФ) блока согласующей аппаратуры ЭГСП/Д;  $W_{\text{ЭУ}}(s)$  — ПФ электронного усилителя по току;  $W_{\text{ЭГУ}}(s)$  — ПФ ЭГУ;  $k_{\text{дос}}$  — коэффициент передачи датчика ЭОС (ДОС);  $y_\phi$  — перемещение корпуса моноблочного ЭГСП/Д вследствие нежесткого фундамента;  $x$  — смещение запорно-регулирующего элемента (ЗРЭ) выходного каскада усиления ЭГУ;  $y$  — координата штока Ц;  $p$  — перепад давлений в выходных гидролиниях ЭГУ (полостях Ц);  $k_{Qx}$  — коэффициент усиления по расходу расходно-перепадной характеристики (РПХ) выходного каскада ЭГУ;  $k_{Qp}$  — коэффициент эластичности предельной РПХ выходного каскада ЭГУ;  $k_{\text{он}}$  — коэффициент объемных потерь в выходном каскаде ЭГУ и Ц привода;  $F$  — рабочая площадь поршня Ц;  $V$  — суммарный объем одной полости Ц и гидролинии, соединяющей ЭГУ и Ц;  $E$  — приведенный модуль упругости жидкости и материала стенок Ц и соединительной гидролинии;  $m, D$  — масса нагрузки и эквивалентный коэффициент сил скоростного (вязкого) трения ОР и силовой проводки, приведенные к выходному звену привода (штоку Ц);  $k_s$  — коэффициент, учитывающий знак дополнительной обратной связи по деформации фундамента (координате  $y_\phi$ ), равный нулю для привода разнесенного исполнения (гидродвигатель и ДОС располагаются на разных фундаментах),  $k_s = +1$  — при отрицательной дополнительной обратной связи по деформации фундамента и  $k_s = -1$  — при положительной обратной связи.

Известно, что  $k_{Qx}$  характеризует отношение расхода холостого хода  $q^{xx}$ , генерируемого выходным каскадом ЭГУ, к перемещению ЗРЭ данного каскада. При линеаризации РПХ по ее предельной ветви, т. е. при максимальном смещении ЗРЭ  $x = x_m$  и для режима холостого хода  $q_m^{xx} = q_{\text{ЭГУ}}^{xx}$  коэффициенты  $k_{Qx}$  и  $k_{Qp}$  могут быть найдены из выражений [4, 8, 10, 11]:

$$k_{Qx} = \frac{q_{\Delta\Gamma y}^{xx}}{x_m}; \quad k_{Qp} = \frac{2q_{\Delta\Gamma y}^{xx}}{3p_{пт}}, \quad (2)$$

где  $p_{пт}$  — максимальный перепад давлений (разность напорного  $p_{п}$  и сливного  $p_{сл}$  давлений).

Для таких же допущений для модели ГМСП/Д есть система уравнений (1) с заменой первых двух уравнений на соотношение [10]:

$$x = k_{вх} y_{вх} - y_{oc} - k_s \frac{F}{C_{\phi}} p = k_{вх} y_{вх} - k_{oc} y - k_s \frac{F}{C_{\phi}} p, \quad (3)$$

где  $y_{вх}$  — входной информационный сигнал механической природы (перемещение входного звена качалки привода);  $y_{oc}$  — сигнал главной механической обратной связи;  $k_{вх}$  — коэффициент входа, характеризующий связь  $x$  золотниково-го ГУ и  $y_{вх}$ ;  $k_{oc}$  — коэффициент обратной связи.

На основе уравнений (1) и (3) сформируем единую (универсальную) модель, пригодную для задач анализа и синтеза ЭГСП/Д и ГМСП/Д:

$$\left. \begin{aligned} \Delta g &= W_g(s) g_{вх} - g_{oc} = \\ &= W_g(s) g_{вх} - W_{кoc}(s) \left( k_{кoc} y + k_s \frac{F}{C_{\phi}} p \right); \\ x &= W_{\Delta}(s) \Delta g; \quad k_{Qx} x = Fsy + \frac{1}{k_Q} [1 + T_Q s] p; \\ p &= s \frac{1}{k_M} (T_M s + 1), \end{aligned} \right\} (4)$$

где коэффициенты передачи и постоянные времени определяются соотношениями:

$$\frac{1}{k_Q} = k_{он} + k_{Qp}; \quad T_Q = \frac{V k_Q}{2E}; \quad \frac{1}{k_M} = \frac{D}{F}; \quad T_M = \frac{m}{D}. \quad (5)$$

Передачные функции и фазовые переменные связаны с уравнениями (1), (2) для ГМСП/Д следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} W_{\Delta}(s) &= W_{кoc}(s) = 1; \quad W_g(s) = k_{вх}; \\ g_{вх} &= y_{вх}; \quad \Delta g = x; \quad g_{oc} = y_{oc}; \quad k_{кoc} = k_{oc}, \end{aligned} \right\} (6)$$

а для ЭГСП/Д:

$$\left. \begin{aligned} W_{\Delta}(s) &= W_{\Delta y}(s) W_{\Delta\Gamma y}(s); \quad W_{кoc}(s) = k_{доc} W_{сА}(s); \\ W_g(s) &= k_U; \quad g_{вх} = U_{вх}; \quad \Delta g = \Delta U; \quad g_{oc} = U_{oc}; \quad k_{кoc} = 1. \end{aligned} \right\} (7)$$

Структурная схема, соответствующая единой модели дроссельных приводов, изображена на рис. 3.

$$\left. \begin{aligned} W_p(s) &= \frac{L[y(s)]}{L[\Delta g(s)]} = W_{п}(s) W_{oc}(s); \\ \Phi(s) &= \frac{L[y(s)]}{L[g_{вх}(s)]} = \frac{W_g(s) W_{п}(s)}{1 + W_p(s)}, \end{aligned} \right\} (8)$$

где

$$\left. \begin{aligned} W_{п}(s) &= k_{Qx} W_{\Delta}(s) \frac{1}{F(A_{п} s^3 + B_{п} s^2 + C_{п} s + 1)}; \\ W_{oc}(s) &= k_{кoc} (T_{\phi 2}^2 s^2 + T_{\phi 1} s + 1) W_{кoc}(s); \\ A_{п} &= \frac{T_Q T_M}{k_Q k_M F}; \quad B_{п} = \frac{T_Q + T_M}{k_Q k_M F}; \quad C_{п} = \frac{1}{k_Q k_M F}; \\ T_{\phi 2}^2 &= \frac{k_s F T_M}{k_{кoc} k_M C_{\phi}}; \quad C_{п} = \frac{k_s F}{k_{кoc} k_M C_{\phi}}. \end{aligned} \right\} (9)$$

Исследование жесткости следящих дроссельных гидроприводов в динамических и статических режимах удобно выполнять на основании (4) для отсутствия входного информационного сигнала и воздействия на выходное звено (шток Ц) внешней силой  $R_{вн}$ , т. е. при записи первого и последнего уравнений (4) в виде:

$$\Delta g = -W_{кoc}(s) \left( k_{кoc} y + k_s \frac{F}{C_{\phi}} p \right); \quad pF = R_{вн}(s). \quad (10)$$

Решение системы соотношений (4) с заменой уравнений (10) даст следующее выражение для динамической жесткости дроссельного гидропривода:

$$\left. \begin{aligned} C(s) &= \frac{L[R_{вн}(s)]}{L[y(s)]} \Big|_{g_{вх}=0} = \\ &= - \frac{Fs + W_{\Delta}(s) W_{кoc}(s) k_{Qx} k_{кoc}}{\left( \frac{T_Q s + 1}{F k_Q} \right) + \frac{k_s k_{Qx}}{C_{\phi}} W_{\Delta}(s) W_{кoc}(s)}. \end{aligned} \right\} (11)$$

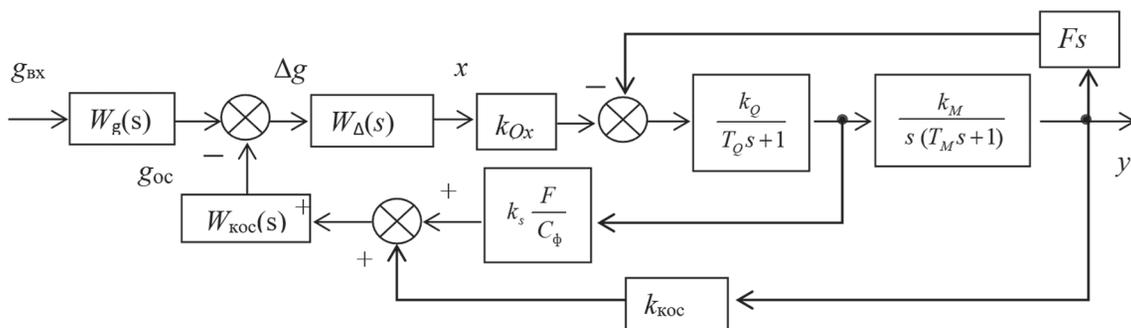


Рис. 3. Структурная схема универсальной модели одноканального ГСП/Д

Выражения статической  $C(0)$  и предельной динамической  $C(\infty)$  жесткостей могут быть найдены из (11) при предельных переходах  $s \rightarrow 0$  и  $s \rightarrow \infty$ . В частности, для ГСП/Д выражения (11), а также  $C(0)$  и  $C(\infty)$  существенно упрощаются [4, 6]:

$$C(s) = -C(0) \frac{(T_{c1}s + 1)}{(T_{c2}s + 1)};$$

$$C(0) = -\frac{k_{Qx}k_{oc}F}{k_{Qp} + k_{on} + k_s k_{Qx} \frac{F}{C_\phi}}; \quad (12)$$

$$C(\infty) = -\frac{2EF^2}{V},$$

где постоянные времени динамической жесткости имеют вид:

$$T_{c1} = \frac{F}{k_{Qx}k_{oc}}; \quad T_{c2} = \frac{V}{2E(k_{Qp} + k_{on} + k_s k_{Qx} F C_\phi^{-1})}. \quad (13)$$

Между параметрами приведенной к выходному звену привода нагрузки и реальной нагрузки ОР, а также перемещениями, скоростями и усилиями силовой системы имеют место соотношения, детально описанные в [8]:

$$i_{сп} = \frac{y_{OP}}{y} = \frac{\dot{y}_{OP}}{\dot{y}} = \frac{R}{R_{OP}}; \quad m = m_{OP} i_{сп}^2; \quad D = D_{OP} i_{сп}^2, \quad (14)$$

где  $y_{OP}$  — перемещение ОР, обеспечиваемое смещением штока Ц на величину  $y$ ;  $R$  — усилие, развиваемое штоком Ц привода и приводящее к передаче усилия  $R_{OP}$  на ОР;  $m_{OP}$ ,  $D_{OP}$  — масса подвижных частей и эквивалентный коэффициент сил скоростного трения ОР. Точками обозначены производные по времени.

**Схема алгоритма решения прямых и обратных задач гидравлического следящего привода с дроссельным управлением потоками гидроэнергии**

Схема алгоритма решения прямой и обратной задач ГСП/Д (на основе частотных характеристик без детализации отдельных фрагментов и очевидности процедур перебора значений параметров из задаваемых массивов, если это допускается условием задачи), основанная на соотношениях (1) — (14) универсальной модели, продемонстрирована на рис. 4.

Синтез привода осуществляется при выполнении необходимого условия существования проектного решения — безусловного достижения всех требуемых показателей функционального назначения (показатель работоспособности ПР) при нехудших сочетани-

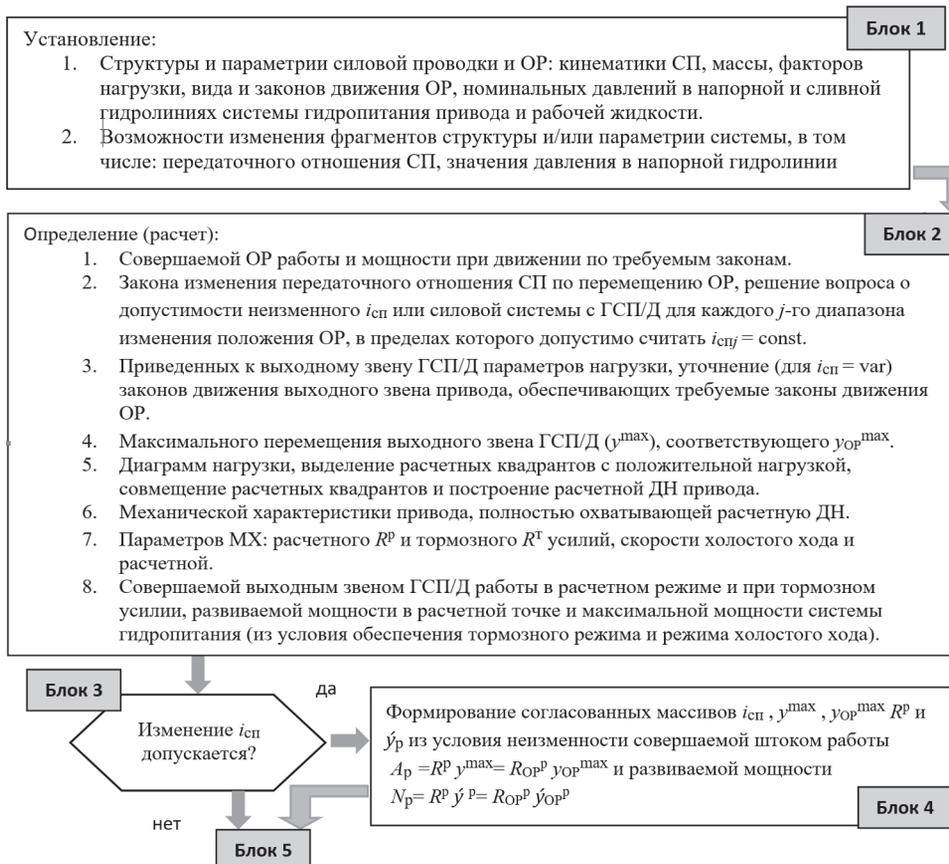


Рис. 4. Блок-схема алгоритма решения прямой и обратной задачи ГСП/Д (см. окончание рис. 4. на стр. 102)

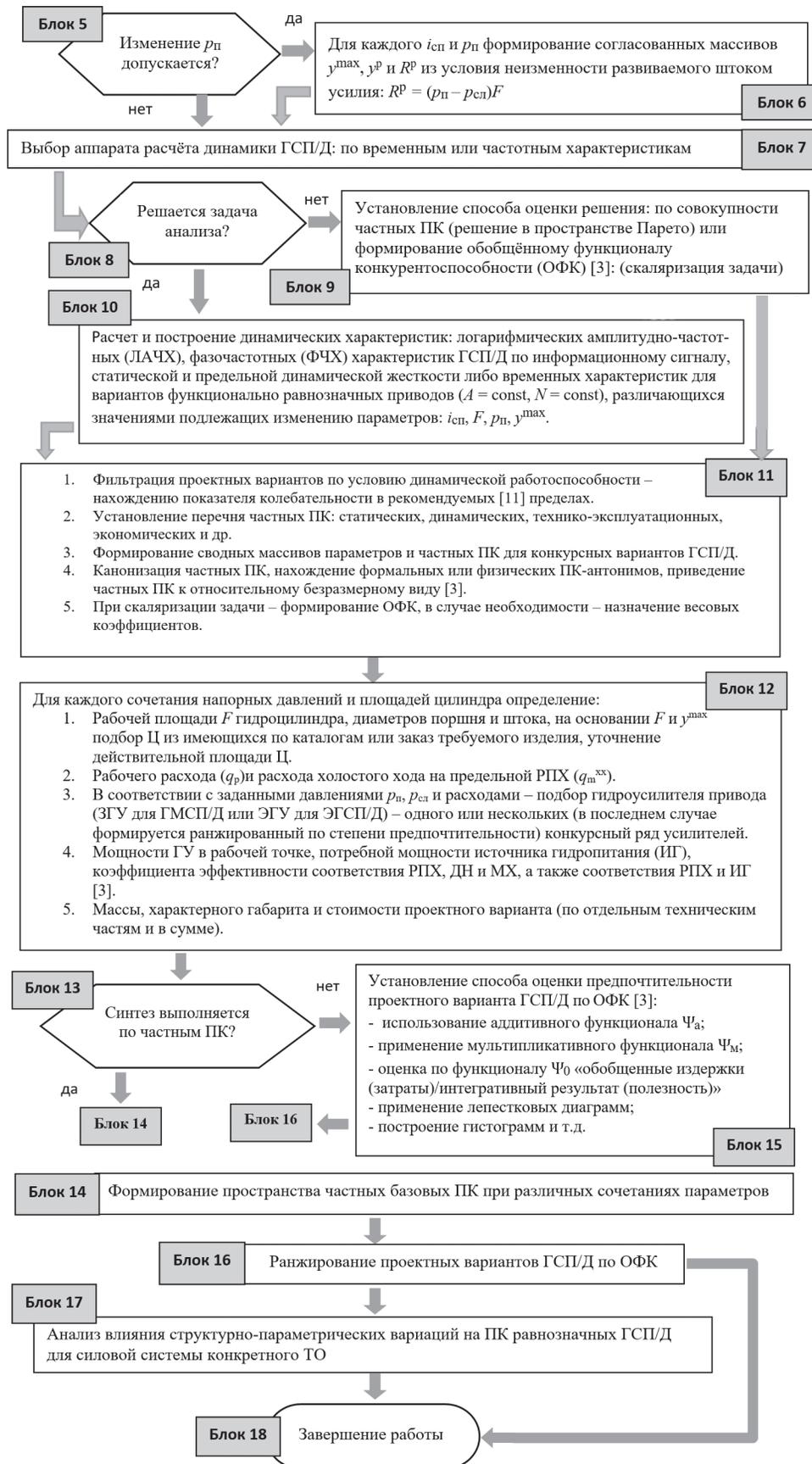


Рис. 4. Блок-схема алгоритма решения прямой и обратной задачи ГСП/Д (см. начало рис. 4. на стр. 101)

ях значений частных показателей конкурентоспособности ПК. Возможно также введение обобщенного функционала конкурентоспособности с целью последующей скаляризации обратной задачи. Как следует из приведенного алгоритма, процедуры анализа и синтеза ГСП/Д в составе силовой системы ТО, выполняемые при условии функциональной равнозначности вариантов ИМ (равенства совершаемой выходным звеном модуля работы и развиваемой мощности — блок 4, рис. 4), существенно отличаются от традиционного подхода исследования и/или расчета ИМ для силовой системы объекта. Следует отметить также, что предложенный алгоритм не имеет традиционных итерационных цепочек с последовательными приближениями, что уже характеризует его как весьма экономичный. Подбор комплектующих устройств в соответствии с рассчитанными параметрами Ц традиционен и осуществляется по методикам, детально описанным в [3, 4, 10] с использованием каталогов соответствующей аппаратуры [5 — 7, 12 — 15].

Работа алгоритма по блокам 1, 2 обычно не вызывает затруднений и подробно представлена в [8, 10, 16].

### Заключение

Таким образом, для ГСП/Д различного вида могут быть использованы универсальные математические модели, существенно упрощающие построение алгоритмов, схем и комплексов прикладных программ для численного решения исследовательских и расчетно-проектных задач.

### Литература

1. Гамынин Н.С., Карев В.И., Потапов А.М., Селиванов А.М. Гидравлические приводы летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1992.
2. Попов Д.Н. Механика гидро- и пневмоприводов: М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.
3. Разинцев В.И. Повышение эффективности гидроприводов с дроссельным регулированием. М.: Машиностроение, 1993.
4. Разинцев В.И. Электродвигательные усилители мощности. М.: Изд-во МЭИ, 1981.
5. MOOG. Номенклатура фирмы MOOG. Электродвигатель [Официальный сайт] [www.moog.com](http://www.moog.com) (дата обращения 20.08.2018).
6. MOOG [Электронный ресурс] [www.moog.com/products/actuator](http://www.moog.com/products/actuator) (дата обращения 25.08.18).
7. Parker Actuator Products [Официальный сайт] [www.parker.com](http://www.parker.com) (дата обращения 20.08.2018).
8. Зуев Ю.Ю. Гидромеханический следящий привод с дроссельным управлением. Ч. 1. Математические модели и статические характеристики привода. М.: Изд-во МЭИ, 2015.
9. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975.

В алгоритме решения прямых и обратных задач реализован принцип последовательного информационного доопределения решаемой задачи [17, 18], т. е. первоначально определяются параметры ГСП/Д из условия энергодостаточности и чувствительности, затем группа динамических показателей, что минимизирует итерационные приближения.

Сравнение конкурсных вариантов ГСП/Д целесообразно выполнять с привлечением как традиционных технических, так и эксплуатационных и стоимостных частных показателей конкурентоспособности, которые для неизменных и традиционных структур приводов являются конфликтными (улучшение одних значимых показателей одновременно приводит к ухудшению других, не менее важных, частных ПК);

Представленный алгоритм решения параметрических прямых и обратных задач позволяет рекомендовать данный сценарий для применения в различных отраслях и объектах, где используются гидрофицированные силовые системы с автоматизированными исполнительными модулями.

Апробированное на практике сокращение времени решения обратных параметрических задач для типовых структур ГСП/Д различных ТО за счет разработанных в соответствии со схемой рис. 4 прикладных программ, по сравнению с существующими «разнопакетными» и перетяжеленными программными блоками составило 30...40% при сохранении необходимой точности вычислений и представления результата в виде пространства нехудших решений по Парето, либо найденного минимального значения обобщенного функционала конкурентоспособности.

### References

1. Gamynin N.S., Karev V.I., Potapov A.M., Selivanov A.M. *Gidravlicheskie Privody Letatel'nykh Apparatov*. M.: Mashinostroenie, 1992. (in Russian).
2. Popov D.N. *Mekhanika Hidro- i Pnevmoприводов*: M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2001. (in Russian).
3. Razintsev V.I. *Povyshenie Effektivnosti Gidроприводов s Drossel'nyim Regulirovaniem*. M.: Mashinostroenie, 1993. (in Russian).
4. Razintsev V.I. *Elektrodvigatel'nye Usiliteli Moshchnosti*. M.: Izd-vo MEI, 1981. (in Russian).
5. MOOG. *Nomenklatura Firmy MOOG. Elektrodvigatel'nykh [Ofits. Sayt] www.moog.com* (Data Obrashcheniya 20.08.2018). (in Russian).
6. MOOG [Elektron. Resurs] [www.moog.com/products/actuator](http://www.moog.com/products/actuator) (Data Obrashcheniya 25.08.18). (in Russian).
7. Parker Actuator Products [Ofits. Sayt] [www.parker.com](http://www.parker.com) (Data Obrashcheniya 20.08.2018). (in Russian).
8. Zuev Yu.Yu. *Gidromekhanicheskiy Sledyashchiy Privod s Drossel'nyim Upravleniem. Ch. 1. Matematicheskie Modeli i Sticheskie Kharakteristiki Privoda*. M.: Izd-vo MEI, 2015. (in Russian).
9. Besekerskiy V.A., Popov E.P. *Teoriya Sistem Avtomaticheskogo Regulirovaniya*. M.: Nauka, 1975. (in Russian).

10. **Зуев Ю.Ю.** Электрогидравлический следящий привод. Расчет основных параметров. М.: Изд-во МЭИ, 2012.
11. **Martin H.R., Keating T.** Mathematical Models for the Design of Hydraulic Actuators // USA Trans. 1973. V. 12. No. 2. Pp.147—155.
12. **Зуев Ю.Ю.** Основы создания конкурентоспособной техники и выработки эффективных решений. М.: Издат. дом МЭИ, 2006.
13. **Parker Hannifin** [Электрон. ресурс] <https://parker-store.ru/catalog/гидравлика> (дата обращения 20.08.18).
14. **Bosch Rexroth** [Официальный сайт] <https://www.boschrexroth.com/en/xc/> (дата обращения 20.08.18).
15. **Павловский** машиностроительный завод Восток. Электрогидравлические усилители мощности (сервоклапаны) [Официальный сайт] <https://www.voskhod.nnov.ru/products/elektrogidravlicheskie-usiliteli/> (дата обращения 15.08.18).
16. **Зуев Ю.Ю.** Гидромеханический следящий привод с дроссельным управлением. Ч. 2. Исследование динамики линейных моделей привода. М.: Изд-во МЭИ, 2016.
17. **Хилл П.** Наука и искусство проектирования. М.: Мир, 1973.
18. **Уайлд Д.** Оптимальное проектирование. М.: Мир, 1981.
10. **Zuev Yu.Yu.** Elektrogidravlicheskiy Sledyashchiy Privod. Raschet Osnovnykh Parametrov. M.: Izd-vo MEI, 2012. (in Russian).
11. **Martin H.R., Keating T.** Mathematical Models for the Design of Hydraulic Actuators. USA Trans. 1973;12;2: 147—155.
12. **Zuev Yu.Yu.** Osnovy Sozdaniya Konkurentosposobnoy Tekhniki i Vyrabotki Effektivnykh Resheniy. M.: Izdat. Dom MEI, 2006. (in Russian).
13. **Parker Hannifin** [Elektron. Resurs] <https://parker-store.ru/catalog/gidravlika> (Data Obrashcheniya 20.08.18). (in Russian).
14. **Bosch Rexroth** [Ofits. Sayt] <https://www.boschrexroth.com/en/xc/> (Data Obrashcheniya 20.08.18). (in Russian).
15. **Pavlovskiy** Mashinostroitel'nyy Zavod Voskhod. Elektrogidravlicheskie Usiliteli Moshchnosti (Servoklapany) [Ofits. Sayt] <https://www.voskhod.nnov.ru/products/elektrogidravlicheskie-usiliteli/> (Data Obrashcheniya 15.08.18). (in Russian).
16. **Zuev Yu.Yu.** Gidromekhanicheskiy Sledyashchiy Privod s Drossel'nym Upravleniem. Ch. 2. Issledovanie Dinamiki Lineynykh Modeley Privoda. M.: Izd-vo MEI, 2016. (in Russian).
17. **Khil P.** Nauka i Iskusstvo Proektirovaniya. M.: Mir, 1973. (in Russian).
18. **Uayld D.** Optimal'noe Proektirovanie. M.: Mir, 1981. (in Russian).

#### Сведения об авторах:

**Зуев Юрий Юрьевич** — кандидат технических наук, доцент кафедры гидромеханики и гидравлических машин НИУ «МЭИ», e-mail: zuevyu@gmail.com

**Зуева Елизавета Юрьевна** — кандидат технических наук, доцент кафедры гидромеханики и гидравлических машин НИУ «МЭИ», e-mail: gelia-05@mail.ru

#### Information about authors:

**Zuev Yuriy Yu.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Hydromechanics and Hydraulic Machines Dept., NRU MPEI, e-mail: zuevyu@gmail.com

**Zueva Elizaveta Yu.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Hydromechanics and Hydraulic Machines Dept., NRU MPEI, e-mail: gelia-05@mail.ru

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 18.03.2019

**The article received to the editor:** 18.03.2019