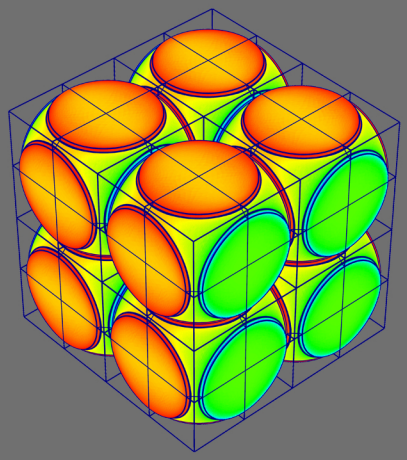
ISSN 2309-3684



Математическое моделирование и численные методы

Бушуев А.Ю., Резников А.О. Применение генетического алгоритма в задаче моделирования и оптимизации пневмогидравлической системы синхронизации исполнительных органов. Математическое моделирование и численные методы, 2021, № 3, с. 62–73.

Источник: https://mmcm.bmstu.ru/articles/257/

Параметры загрузки:
IP: 216.73.216.154
12.03.2026 02:36:47

УДК 519.6: 629.7.02 DOI: 10.18698/2309-3684-2021-3-6273

Применение генетического алгоритма в задаче моделирования и оптимизации пневмогидравлической системы синхронизации исполнительных органов

© А.Ю. Бушуев, А.О. Резников

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Построена модель генетического алгоритма с бинарным кодированием с независимой селекцией Шеффера, позволяющая производить поиск глобального оптимума по нескольким критериям без их скаляризации. При расчетах учитывается область всех возможных перемещений исполнительных органов в условиях неопределённых внешних воздействий в некотором, заранее заданном, диапазоне. Разработан алгоритм, позволяющий хранить промежуточные результаты для устранения проблемы большого количества повторяющихся расчетов в ходе работы эволюционного алгоритма, что позволило снизить время вычислений. Эффективность работы оптимизационного алгоритма демонстрируется на примере решения модельной задачи.

Ключевые слова: *система синхронизации, нерегулируемой дроссель, гидравлический цилиндр, генетический алгоритм, моделирование, оптимизация*

Введение. Системы синхронизации широко применяются в установках многих отраслей промышленности для обеспечения одновременного перемещения двух или более исполнительных органов (ИО). ИО могут совершать различные виды движений при эксплуатации, например, поступательные или вращательные Некоторые примеры подобных систем: конвейерные механизмы для передвижения изделий, элементы подачи заготовок деталей в узел обработки станкостроительного оборудования, операционные устройства многозвенных роботизированных машин, подсистемы развёртывания солнечных панелей космических аппаратов, механизмы раскрытия крыльев летательных аппаратов, системы выпуска-уборки шасси самолетов и т.д. [1–13].

В общем случае ИО могут функционировать при наличии внешних, различных по модулю и направлению, силовых воздействий, которые оказывают существенное влияние на динамические характеристики системы синхронизации в целом. В этих условиях задача поддержания одновременного перемещения нескольких ИО, конструктивно связанных с деталями газожидкостных силовых цилиндров (СЦ), может решаться методами гидравлической синхронизации с использованием стабилизаторов расхода рабочей жидкости [14–15]. Однако в практике проектирования подобных систем возникают задачи, в которых внешние воздействия определены в достаточно узком диапазоне (порядка ±15% от соответствующих

номинальных значений). В этом случае вместо стабилизаторов расхода можно использовать дроссели, устанавливаемые в жидкостной магистрали каждого СЦ [4].

Установка дросселей упрощает конструкцию системы, но в свою очередь требует более точных предварительных расчетов конструктивных параметров на этапе проектирования системы. Даная работа, является продолжением исследований, представленных в статьях [4–5]. Предлагается решение задачи выбора эффективных площадей дросселей с целью обеспечения минимального времени рассогласования перемещения всех ИО с учетом их прочностных ограничений.

Структура дроссельной системы синхронизации. Принципиальная схема пневмогидравлической системы синхронизации на основе дроссельной шайбы, изображённая на рис. 1*а* представляет собой группу из N СЦ с кривошипно-шатунным механизмом (КШМ) внутри (рис. 1*б*). В системе все СЦ связанны общей пневматической магистралью, по ней газы попадают в полость 1 соответствующих СЦ где за счёт возникающей разности давлений с жидкостной полостью 3 приводят КШМ в движение. Кривошип 5 КШМ конструктивно соединён с ИО 2. На рисунке 1*б* присутствует условно изображен ИО, совершающий вращательное движения. Управление расходом рабочей жидкости из полости 3 происходит путем регулирования эффективной площади $(\mu f)^k$ (μ — коэффициент расхода, $f = \pi d^2/4$ — площадь дроссельного сечения, d — диаметр дросселирующего сечения) k – ого дросселя устанавливаемого перед гидравлической магистралью, $k = \overline{1, N}$.

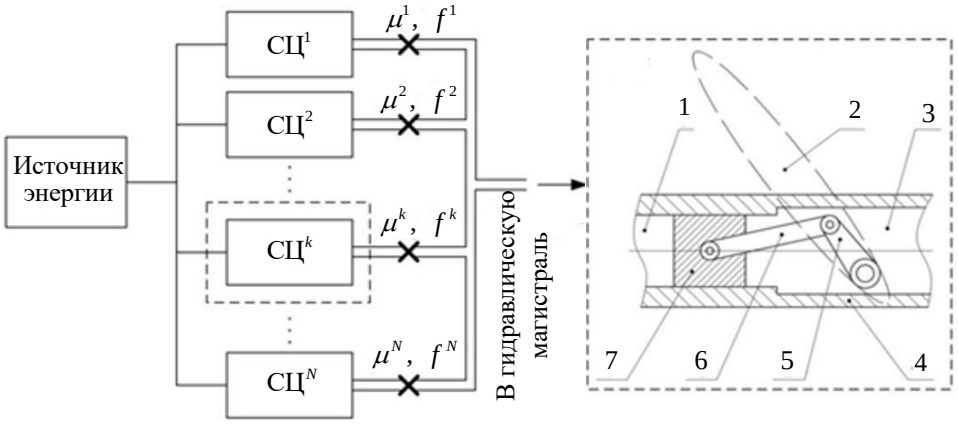


Рис. 1. Структура дроссельной системы синхронизации (а); облик k – ого СЦ, $k = \overline{1, N}$ на основе КШМ (б):
1 — газовая полость; 2 — ИО; 3 — жидкостная полость; 4 — корпус;
5 — кривошип; 6 – шатун; 7 – плунжер

Задача многокритериальной оптимизации. Рассмотрим отображение

$$\Phi = \left(\Phi_1, \Phi_2\right) : Dr^1 \times Dr^2 \times ... \times Dr^{N-1} \times Dr^N \to \mathbb{R}_+^2,$$

для которого:

$$\begin{gathered}\Phi_1\left(\left(\mu f\right)^1, \left(\mu f\right)^2, ..., \left(\mu f\right)^N\right) = \\ = \max\left(t^1, t^2, ..., t^N\right) - \min\left(t^1, t^2, ..., t^N\right) \to \min_{Dr},\end{gathered} \tag{1}$$

$$\begin{gathered}\Phi_2\left(\left(\mu f\right)^1, \left(\mu f\right)^2, ..., \left(\mu f\right)^N\right) = \\ = \max\left(\exp\left(-z^1\right), \exp\left(-z^2\right), ..., \exp\left(-z^N\right)\right) \to \min_{Dr},\end{gathered} \tag{2}$$

где t_k — время движения k – ого ИО при изменении угловой координаты от нуля до максимального значения, $z^i = \left(\hat{\omega} - \omega_{\max}^i\right) / \hat{\omega}$, $\hat{\omega}$ — ограничение на максимальную угловую скорость, $\omega_{\max}^i$ — максимальное значение угловой скорости i – ого кривошипа [14].

Отображение для целевых функций Φ_1, Φ_2 задано на множестве $Dr = Dr^1 \times Dr^2 \times ... \times Dr^N \subset \mathbb{R}^N$, которое определено следующим образом:

$$Dr^k = \left[\left(\mu f\right)_{\inf}^k ; \left(\mu f\right)_{\sup}^k\right], \tag{3}$$

где

$$M^k = \left(\mu f\right)^k = \mu^k \cdot f^k \in Dr^k \subset \mathbb{R}^1,\ k = \overline{1, N},$$

$$\begin{gathered}\left(\mu f\right)_{\inf}^k, \left(\mu f\right)_{\sup}^k \in \left\{\mathbb{R} : \left(\mu f\right)_{\inf}^k, \left(\mu f\right)_{\sup}^k > 0, \left(\mu f\right)_{\inf}^k ; \right. \\ \left. \left(\mu f\right)_{\sup}^k < +\infty, \left(\mu f\right)_{\inf}^k \le \left(\mu f\right)_{\sup}^k \right\}.\end{gathered}$$

Совокупность целевых функций (1), (2) и ограничений (1)–(3) на управляющую пару $\left(\mu f\right)^k$, $k = \overline{1, N}$, а также математической модели системы синхронизации исполнительных органов, построенной ранее и представленной в работе [4], составляет задачу двухкритериальной оптимизации: минимизации времени рассогласования перемещения N ИО и минимизации максимальной нагрузки на N ИО дроссельной системы синхронизации.

Глобальная оптимизация многокритериальной задачи методами эволюционных алгоритмов. Для решения задач поиска

глобального оптимума по нескольким критериям [17], без возможности их скаляризации [18], целесообразно применять такой вид эвристических методов как эволюционные с независимой эволюцией по критериям, среди подобных методов широко распространены генетические алгоритмы с независимой селекцией [19].

Чтобы вычислить глобальное экстремальное значение пары функций (Φ_1, Φ_2) на множестве $Dr^1 \times Dr^2 \times ... \times Dr^N \subset \mathbb{R}^N$ построен модифицированный генетический алгоритм на основе позиционного бинарного кодирования (код Грея) [20], с независимой селекцией, и в качестве операции скрещивания выбран $N-$точечный кроссовер (рис. 2).

Как основную модель независимой селекции возьмем метод Шеффера (рис. 2). Он позволит нам производить независимую селекцию по двум критериям не вводя скаляризацию на них.

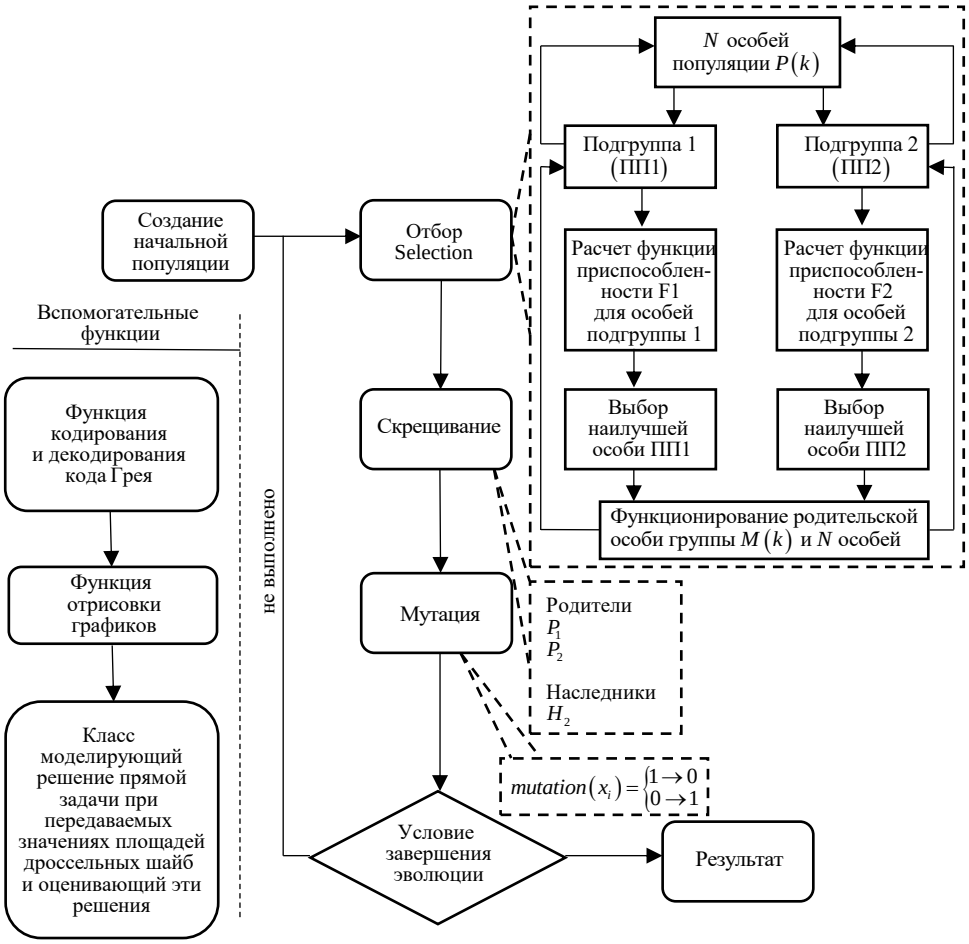


Рис. 2. Схема модифицированного генетического алгоритма

В задаче (3)–(5) хромосомой, однозначно определяющей особь популяции, является вектор точек $\left(M^1, M^2, ..., M^N\right) \in Dr^1 \times Dr^2 \times ... \times Dr^N$, где каждая точка $M^k \in Dr^k$, представляет пару управляющих параметров $\left(\mu f\right)^k$ $k-$ого ИО, является геном. Длина двоичного представления точки $M^k \in \left[\left(\mu f\right)^k_{\inf}; \left(\mu f\right)^k_{\sup}\right] \subset \mathbb{R}^1, k = \overline{1, N}$ определяется из формулы $10^q span^k \le 2^n - 1$, где q — количество знаков после запятой в десятичном представлении, $span^k = \left(\mu f\right)^k_{\sup} - \left(\mu f\right)^k_{\inf}$, n — длина бинарного кода описывающего ген.

Результаты исследований. Смоделируем задачу выбора оптимальных эффективных площадей дросселей в системе синхронизации из четырёх ИО при помощи реализованного в библиотеке поискового алгоритма. Для моделирования системы синхронизации зададим следующие исходные данные: значение угловой координаты *k*-ого кривошипа в конечном состоянии системы $\beta^k_{\max} = 90°$, длина $k-$ого кривошипа $l^k_c = 0,042$ м, длина $k-$ого шатуна $l^k_r = 0,092$ м, масса $k-$ого кривошипа $m^k_c = 0,9$ кг, масса $k-$ого шатуна $m^k_r = 0,4$ кг, масса $k-$ого ползуна $m^k_p = 1,5$ кг, кратчайшее расстояние от линии симметрии плунжера до точки, принадлежащей оси вращения $k-$ого кривошипа $\delta^k = 0,02$ м, угол, образованный продольной осью *k*-ого кривошипа и горизонталью в исходном состоянии системы $\gamma^k_0 = \pi/6$, коэффициент вязкого трения ползуна о корпус $k-$ого цилиндра $r^k_{vfric} = 1,8$ кг/с, момент инерции исполнительно органа относительно оси вращения кривошипа $J^k_A = 0,0005$ кг·м^2, начальная плотность рабочей жидкости $\rho^k_{liq0} = 860$ кг/м^3, начальная величина давления рабочей жидкости $p^k_{liq0} = 101325$ Па, скорость звука в рабочей жидкости $a = 1210000$ м/с, $k = \overline{1,4}$ [4]. Предполагается, что на ИО, соответствующих СЦ, действуют следующие внешние моменты, представленные в таблице 1. Давление газов от источника энергии также выбрано постоянным ($p_{ES} = const$) и равным 100 атмосферам ($\approx 10,13$ Па). Геометрические и прочностные характеристики СЦ^1, СЦ^2, СЦ^3 и СЦ^4 зададим одинаковыми: $\left(\mu f\right)^k_{\inf} = 3$ мм^2, $\left(\mu f\right)^k_{\sup} = 65$ мм^2, что соответствует диаметрам $d^k_{\inf} \approx 2,34$ мм, $d^k_{\sup} \approx 11,68$ мм при $\mu^k = 0,7$ и $\widehat{\omega} = 320$ рад/с, $k = \overline{1,4}$.

Таблица 1

Внешние воздействия на соответствующие исполнительные органы

№ ИО	M_{ext} $(\text{Н}\cdot\text{м})$	Диапазон возможных отклонений
ИО_1	$M_{ext}^1 = 1000$ Н·м	±15%
ИО_2	$M_{ext}^2 = 500$ Н·м	±15%
ИО_3	$M_{ext}^1 = -500$ Н·м	±15%
ИО_4	$M_{ext}^1 = 200$ Н·м	±15%

Для запуска генетического алгоритма определим в нем следующий набор параметров: размер популяции 100 особей, длину гена 12 бит, количество эпох (итераций) возьмём равным 35, вероятность мутации 0,1, число родителей, формирующих новое поколение от текущей популяции 0,4 и для N – точечного кроссовер число N возьмем равным 3.

При предварительном моделировании работы системы возьмём $(\mu f)^k = 55$ мм^2 для $k = \overline{1,4}$. На рис. 3 изображены области, которые показывают возможные значения для углов поворота при неопределенных внешних воздействиях в заданном диапазоне, где верхняя граница обозначает перемещение при максимально возможном внешнем воздействии, а нижняя при минимально возможном.

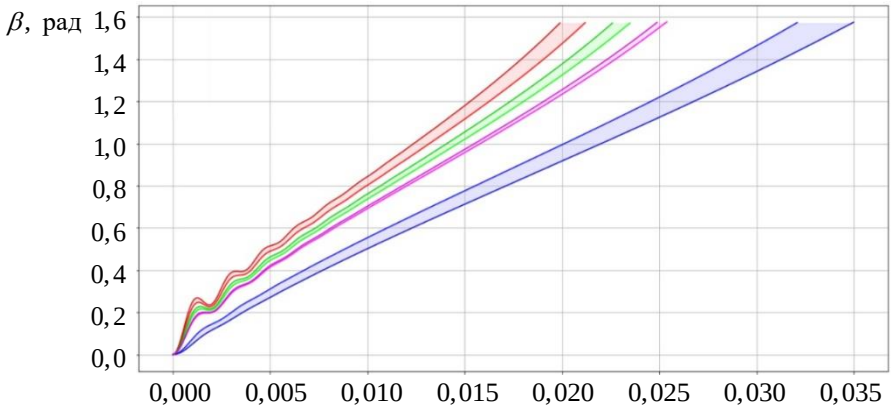


Рис. 3. График, иллюстрирующий результат работы системы до оптимизации; графики углового перемещения:
— $\text{ИО}_{\min}^1$; — $\text{ИО}_{\max}^1$; — $\text{ИО}_{\min}^2$; — $\text{ИО}_{\max}^2$;
— $\text{ИО}_{\min}^3$; — $\text{ИО}_{\max}^3$; — $\text{ИО}_{\min}^4$; — $\text{ИО}_{\max}^4$

На рис. 4 приведены динамические кривые, отображающие колебательный характер изменения вектора угловой скорости каждого ИО во времени. На данном графике показан случай несинхронного перемещения четырёх ИО для значений эффективных диаметров дросселей равных $(\mu f)^k = 55$ мм^2 при $\mu^k = 0,7$, $k = \overline{1,4}$. $\Phi_{2,0} = 1,082$

Разница во времени достижения $\beta_{max} = 90°$ составила $\Phi_{1,0} = 15{,}1 \cdot 10^{-3}$ с и максимальная нагрузка на конструкцию при этом составила $\Phi_{2,0} = 1{,}082$ с, что превышает рекомендованную нагрузку на систему и увеличивает вероятность выхода из строя.

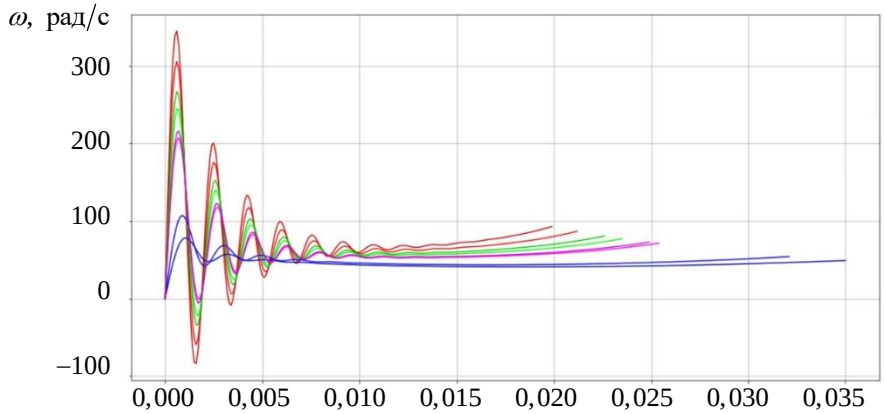


Рис. 4. Изображение графиков изменения угловой во времени
— $ИО^1_{min}$; — $ИО^1_{max}$; — $ИО^2_{min}$; — $ИО^2_{max}$;
— $ИО^3_{min}$; — $ИО^3_{max}$; — $ИО^4_{min}$; — $ИО^4_{max}$

На рис. 5 изображены области возможного нахождения кривых, отображающие изменение угловой координаты каждого ИО во времени после выполнения оптимизационной процедуры минимизации времени рассогласования перемещения четырёх ИО рассматриваемой пневмогидравлической системы синхронизации и минимизации максимальной нагрузки на систему.

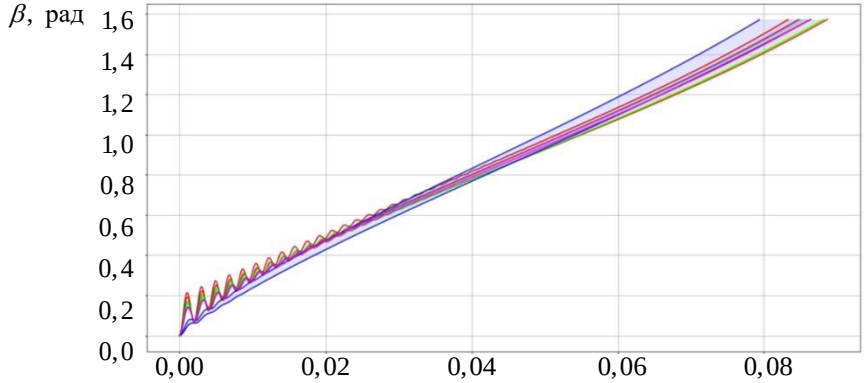


Рис. 5. Графическая иллюстрация результатов работы системы после оптимизационного процесса:
— $ИО^1_{min}$; — $ИО^1_{max}$; — $ИО^2_{min}$; — $ИО^2_{max}$;
— $ИО^3_{min}$; — $ИО^3_{max}$; — $ИО^4_{min}$; — $ИО^4_{max}$

По итогу работы оптимизационного алгоритма были предложены следующие значения для эффективных площадей дросселя $(\mu f)^1 \approx 13{,}08$ мм^2, $(\mu f)^2 \approx 14{,}58$ мм^2, $(\mu f)^3 \approx 22{,}04$ мм^2 и $(\mu f)^4 \approx 16{,}05$ мм^2, что при $\mu^k = 0{,}7$ соответствует диаметрам $d^1 \approx 4{,}88$ мм, $d^2 \approx 5{,}15$ мм, $d^3 \approx 6{,}33$ мм и $d^4 \approx 5{,}40$ мм. При найденных значениях максимально возможное время рассогласования составило $\Phi_{1,\min} = 3{,}78 \cdot 10^{-3}$ с, что почти в 4 раза меньше чем изначальное рассогласование, и максимальная нагрузка при этом на систему составила $\Phi_2 \approx 0{,}98$, что почти на 10% меньше чем $\Phi_{2,0}$ и уже ниже чем максимально допустимый порог нагрузки.

Для иллюстрации сходимости процесса поиска оптимального решения на рис. 6 представлены графики зависимостей целевых функций от номера итерации (эпохи).

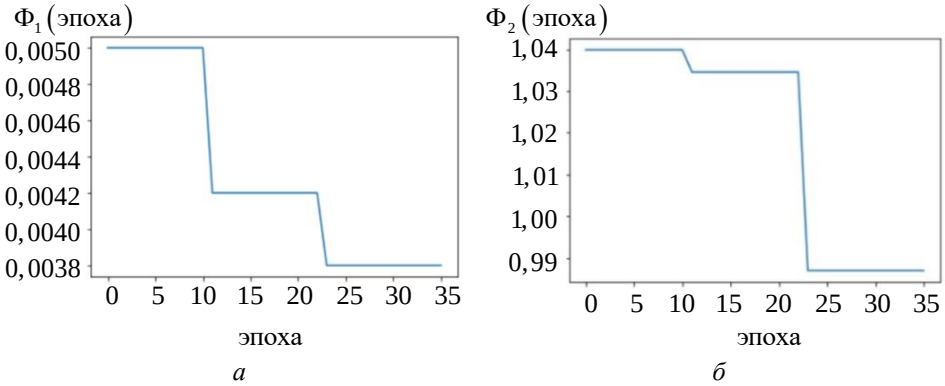


Рис. 6. Зависимость значения целевых функций от номера итерации (эпохи): *а* — $\Phi_1(\text{эпоха})$; *б* — $\Phi_2(\text{эпоха})$

Оптимизационные вычисления за счёт модуля временной памяти заняли 4,06 минуты на тестовом процессоре (Intel CORE i7 7th Gen) при шаге интегрирования 10^{-6} и было смоделировано 2872 задачи анализа для ИО, что составило $\approx 20{,}5$ % от возможного полного числа расчетов. Таким образом, удалось существенно сократить время расчетов без потери их точности.

Выводы. Сформулирована задача оптимизации системы синхронизации ИО, учитывающая два критерия: время рассогласования перемещения N ИО и максимальную нагрузку на N ИО дроссельной системы синхронизации. Построенный генетический алгоритм многокритериальной оптимизации с бинарным кодированием показал свою высокую эффективность на решении модельной задачи. По результатам применения оптимизационного алгоритма получилось

улучшить значение первой целевой функции в $3,5-5,0$ раз и второй на $5-15\ \%$.

Реализованная система устранения повторных расчетов позволила без потери точности существенно уменьшить время поиска оптимального решения, что позволяет рекомендовать её для использования в системах автоматизированного проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Рыбак А.Т. *Моделирование и оптимизация гидромеханических систем мобильных машин и технологического оборудования*. Автореферат дисс. д-р техн. наук. Краснодар, 2008, 41 с.

[2] Гамынин Н.С., Карев В.И., Потапов А.М., Селиванов А.М. *Гидравлические приводы летательных аппаратов: учеб. для авиац. спец. вузов*. Москва, Машиностроение, 1992, 366 с.

[3] Casey B., Tumarkin M. How to Synchronize Hydraulic Cylinders [Электронный ресурс], 2006. URL: https://www.hydraulicsupermarket.com/synchronization.html (дата обращения: 15.05.2021)

[4] Bushuev A.Yu., Ivanov M.Yu., Korotaev D.V. Minimization of mismatch time of movement of actuators of a throttle synchronization system. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1141, art. no. 012090. DOI: 10.1088/1742-6596/1141/1/012090

[5] Bushuev A.Yu., Ivanov M.Yu., Korotaev D.V., Resh G.F. Software environment for computer-aided heuristic optimization of hydraulic systems for synchronous movement of actuators of various functional purposes. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1391, art. no. 012141. DOI: 10.1088/1742-6596/1391/1/012141

[6] Попов Д.Н. *Механика гидро- и пневмоприводов: учеб. для вузов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002, 320 с.

[7] Попов Д.Н. *Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем: учеб. для машиностроительных вузов*. Москва, Машиностроение, 1976, 424 с.

[8] Бекасов В.И., Меланьин А.Н. *Синхронизация параллельно работающих приводов*. Москва, Изд-во МАИ, 1987, 24 с.

[9] Artemenko Y.N., Karpenko A.P., Belonozhko P.P. Synthesis of control of hinged bodies relative motion ensuring move of orientable body to necessary absolute position. *Studies in Systems, Decision and Control*, 2017, vol. 95, pp. 231–239.

[10] Artemenko Y.N., Karpenko A.P., Belonozhko P.P. Features of manipulator dynamics modeling into account a movable platform. *Studies in Systems, Decision and Control*, 2016, vol. 49, pp. 177–190.

[11] Gauer M., Telitschkin D., Gotzig U., Batonneau Y., Johansson H., Ivanov M., Palmer P., Wiegerink R.J. PRECISE — Development of a MEMS-based monopropellant micro Chemical Propulsion System. *48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 2012, Atlanta, Georgia, art. no. AIAA 2012-4072. DOI: 10.2514/6.2012-4072

[12] Gauer M., Telitschkin D., Gotzig U., Hannemann K., Batonneau Y., Rangsten P., Ivanov M., Brunskill C., Wiegerink R.J. PRECISE – Preliminary results of the MEMS-based μCPS. *49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2013, San Jose, CA, art. no. AIAA 2013-3784. DOI: 10.2514/6.2013-3784

[13] Скрицкий В.Я. Рокшевский В.А. *Синхронизация исполнительных органов гидрофицированых машин и механизмов*. Москва, Машиностроение, 1973, 144 с.

[14] Иванов М.Ю., Новиков А.Е., Реш Г.Ф. Особенности проектирования и численного моделирования стабилизаторов расхода в системах синхронизации движения исполнительных органов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2017, № 2, с. 54–65.

[15] Мельникова В.Г., Коцур О.С., Щеглов Г.А. Особенности построения расчетной схемы для моделирования динамики стабилизатора расхода в пакете OpenFOAM. *Труды Института системного программирования РАН*, 2017, т. 29, № 1, с. 53–70.

[16] Черноруцкий И.Г. *Методы оптимизации. Компьютерные технологии*. Санкт-Петербург, БХВ-Петербург, 2011, 384 с.

[17] Weise T. *Global Optimization Algorithms. Theory and Application*. University of Science and Technology of China, 2009, 820 p.

[18] Кутателадзе С.С. Мажорирование, дискретизация и скаляризация. *Сибирский журнал индустриальной математики*, 2008, т. 11, № 4 (36), с. 66–77.

[19] Agasiev T., Karpenko A. The program system for automated parameter tuning of optimization algorithms. *Procedia Computer Science*, 2017, vol. 103, pp. 347–354.

[20] Холодилов С.А. Код Грея. *RSDN* [Электронный ресурс], 2016. URL: https://rsdn.org/article/alg/gray.xml (дата обращения: 20.05.2021)

Статья поступила в редакцию 19.06.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Бушуев А.Ю., Резников А.О. Применение генетического алгоритма в задаче моделирования и оптимизации пневмогидравлической системы синхронизации исполнительных органов. *Математическое моделирование и численные методы,* 2021, № 3, с. 62–73.

Бушуев Александр Юрьевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Вычислительная математика и математическая физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: a.ju.bushuv@yandex.ru

Резников Андрей Олегович — студент кафедры «Вычислительная математика и математическая физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: andry10111999@gmail.com

Application of a genetic algorithm in the problem of modeling and optimization of hydraulic systems for synchronous movement of actuators

© A.Yu. Bushuev, A.O. Reznikov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

A model of genetic algorithm with binary coding with independent Schaeffer selection is constructed, which allows one to search for a global optimum by several criteria without their scalarization. The calculations take into account the range of all possible motions of actuators under uncertain external influences in some predetermined range. An algorithm has been developed that allows storing intermediate results to eliminate the problem of a large number of repeated calculations in the course of the evolutionary algorithm, which reduced the computation time. The effectiveness of the optimization algorithm is demonstrated on the example of solving a model problem.

Keywords*: synchronization system, unregulated throttle, hydraulic cylinder, genetic algorithm, modeling, optimization*

REFERENCES

[1] Rybak A.T. *Modelirovanie i optimizaciya gidromekhanicheskih sistem mobil'nyh mashin i tekhnologicheskogo oborudovaniya* [Modeling and optimization of hydromechanical systems of mobile machines and technological equipment]. Abstract of the diss. Dr. Sc. (Eng.). Krasnodar, 2008, 41 p.

[2] Gamynin N.S., Karev V.I., Potapov A.M., Selivanov A.M. *Gidravlicheskie privody letatel'nyh apparatov: ucheb. dlya aviac. spec. vuzov* [Hydraulic drives of aircraft: textbook. for aviac. spec. universities]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1992, 366 p.

[3] Casey B., Tumarkin M. How to Synchronize Hydraulic Cylinders [Electronic resource], 2006. URL: https://www.hydraulicsupermarket.com/synchronization.html (accessed: 15.05.2021)

[4] Bushuev A.Yu., Ivanov M.Yu., Korotaev D.V. Minimization of mismatch time of movement of actuators of a throttle synchronization system. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1141, art. no. 012090. DOI: 10.1088/1742-6596/1141/1/012090

[5] Bushuev A.Yu., Ivanov M.Yu., Korotaev D.V., Resh G.F. Software environment for computer-aided heuristic optimization of hydraulic systems for synchronous movement of actuators of various functional purposes. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1391, art. no. 012141. DOI: 10.1088/1742-6596/1391/1/012141

[6] Popov D.N. *Mekhanika gidro- i pnevmoprivodov: ucheb. dlya vuzov* [Mechanics of hydraulic and pneumatic actuators: textbook. for universities]. Moscow, BMSTU Publ., 2002, 320 p.

[7] Popov D.N. *Dinamika i regulirovanie gidro- i pnevmosistem: ucheb. dlya mashinostroitel'nyh vuzov* [Dynamics and regulation of hydro- and pneumatic systems: textbook]. for engineering universities. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976, 424 p.

[8] Bekasov V.I., Melanin A.N. *Sinhronizaciya parallel'no rabotayushchih privodov* [Synchronization of parallel drives]. Moscow, MAI Publ., 1987, 24 p.

[9] Artemenko Y.N., Karpenko A.P., Belonozhko P.P. Synthesis of control of hinged bodies relative motion ensuring move of orientable body to necessary absolute position. *Studies in Systems, Decision and Control*, 2017, vol. 95, pp. 231–239.

[10] Artemenko Y.N., Karpenko A.P., Belonozhko P.P. Features of manipulator dynamics modeling into account a movable platform. *Studies in Systems, Decision and Control*, 2016, vol. 49, pp. 177–190.

[11] Gauer M., Telitschkin D., Gotzig U., Batonneau Y., Johansson H., Ivanov M., Palmer P., Wiegerink R.J. PRECISE — Development of a MEMS-based monopropellant micro Chemical Propulsion System. *48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 2012, Atlanta, Georgia, art. no. AIAA 2012-4072. DOI: 10.2514/6.2012-4072

[12] Gauer M., Telitschkin D., Gotzig U., Hannemann K., Batonneau Y., Rangsten P., Ivanov M., Brunskill C., Wiegerink R.J. PRECISE – Preliminary results of the MEMS-based μCPS. *49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2013, San Jose, CA, art. no. AIAA 2013-3784. DOI: 10.2514/6.2013-3784

[13] Skritskiy V.Ya. Rokshevsky V.A. *Sinhronizaciya parallel'no rabotayushchih privodov* [Synchronization of executive bodies of hydrofected machines and mechanisms]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973, 144 p.

[14] Ivanov M.Yu., Novikov A.E. Resh G.F. Features of designing and numerical simulation of flow stabilizers in actuator line synchronization systems. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2017, no. 2, pp. 54–65.

[15] Melnikova V.G., Kotsur O.S., Shcheglov G.A. Numerical simulation of the flow rate regulator valve using OpenFOAM. *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*, 2017, vol. 29, no. 1, pp. 53–70.
[16] Chernorutsky I.G. *Metody optimizacii. Komp'yuternye tekhnologii* [Optimization methods. Computer technology]. St. Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2011, 384 p.
[17] Weise T. *Global Optimization Algorithms. Theory and Application*. University of Science and Technology of China, 2009, 820 p.
[18] Kutateladze S.S. Domination, discretization, and scalarization. *Journal of Applied and Industrial Mathematics*, 2009, vol. 3, no. 1, pp. 96–106.
[19] Agasiev T., Karpenko A. The program system for automated parameter tuning of optimization algorithms. *Procedia Computer Science*, 2017, vol. 103, pp. 347–354.
[20] Kholodilov S.A. Kod Greya [Gray's Code]. *RSDN* [Electronic resource], 2019. URL: https://rsdn.org/article/alg/gray.xml (accessed: 20.05.2021)

Bushuev A.Yu., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor of Department of Computational Mathematics and Mathematical Physics, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: a.ju.bushuv@yandex.ru

Reznikov A.O., Student of Department of Computational Mathematics and Mathematical Physics, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: andry10111999@gmail.com