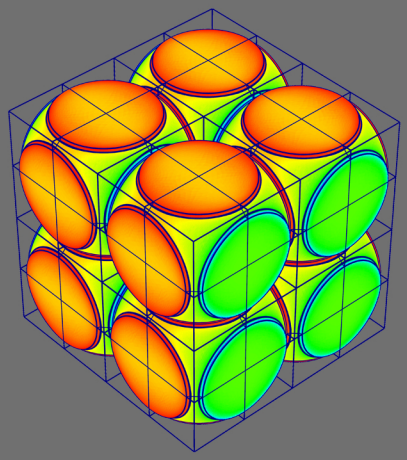
ISSN 2309-3684



Математическое моделирование и численные методы

Бушуев А.Ю., Иванов М.Ю., Коротаев Д.В., Реш Г.Ф.
Программная среда dgsSynchCAD для моделирования и автоматизированной эвристической оптимизации дроссельных гидросистем синхронизации. Математическое моделирование и численные методы. 2020. № 1. с 103–117.

Источник: https://mmcm.bmstu.ru/articles/217/

Параметры загрузки:
IP: 216.73.216.38
05.03.2026 16:40:08

УДК 519.6: 629.7.02 DOI: 10.18698/2309-3684-2020-1-103117

Программная среда dgsSynchCAD для моделирования и автоматизированной эвристической оптимизации дроссельных гидросистем синхронизации

© А.Ю. Бушуев[1], М.Ю. Иванов[2], Д.В. Коротаев[3], Г.Ф. Реш[2]

[1]МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия
[2]АО «ВПК «НПО машиностроения»,
Реутов, Московская область, 143966, Россия
[3]ООО «НПО «ИНКОР», п. Правдинский, Пушкинский район,
Московская область, 141260, Россия

Разработана программная среда dgsSynchCAD автоматизированного проектирования оптимальных дроссельных гидравлических систем синхронизации исполнительных органов различного функционального назначения, работающих в условиях внешних знакопеременных силовых воздействий. Критерием процедуры оптимизации является минимизация времени рассогласования относительного перемещения исполнительных органов при эксплуатации. Вычислительное ядро объектно-ориентированного кода построено на основе динамической математической модели системы синхронизации, состоящей из четырёх силовых цилиндров. С помощью созданной программной среды решена модельная задача, демонстрирующая эффективность предложенного процесса многомерной оптимизации. Методология основана на применении известного эвристического метода (генетического алгоритма с бинарным кодированием) и последующего улучшения (в смысле заданного целевого функционала) получаемого решения методом на основе алгоритма Хука-Дживса. Сформулированы рекомендации по практическому применению программно-математического обеспечения для достижения наилучшей сходимости к экстремальному значению вектора управляемых параметров.

Ключевые слова: *система синхронизации, гидравлический цилиндр, нерегулируемый дроссель, математическое моделирование, метод конечных разностей, уравнение Лагранжа второго рода, эвристическая оптимизация, генетический алгоритм, диаграмма классов, вычислительный эксперимент*

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 [1], [2], [3], [4]. 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 и т.д. В общем случае ИО могут функционировать при наличии внешних, различных по модулю и направлению, силовых воздействий, которые оказывают суще-

ственное 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 [5], [6], [7]. 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. При этом целесообразно сформулировать задачу оптимального выбора так называемой эффективной площади дросселя (площади дросселирующего сечения при заданном коэффициенте расхода, определяющем её типоразмер) с целью обеспечения минимального времени рассогласования перемещения всех ИО.

Структура дроссельной системы синхронизации. Принципиальная схема пневмогидравлической системы представлена на рис. 1: изображена группа из четырёх СЦ с установленными в их корпусе (4) кривошипно-шатунными механизмами (КШМ), состоящими из кривошипа (5), шатуна (6) и плунжера (7). Все СЦ связаны между собой общей пневматической магистралью, по которой газы от источника энергии, например, баллона высокого давления, поступают в газовую полость (1) соответствующего СЦ. Кривошип (5) конструктивно соединён с ИО (2). На рис. 1 условно показан (пунктирная эллиптическая кривая) ИО, совершающий вращательные движения. В жидкостной полости (3) содержится рабочая жидкость, вытесняемая в гидравлическую магистраль плунжером (7) через k-ый дроссель с эффективной площадью $(\mu f)^k$ (μ — коэффициент расхода, f — площадь дросселирующего сечения), $k=\overline{1,4}$.

Математическая модель дроссельной системы синхронизации (прямая задача или задача анализа). Нестационарная математическая модель дроссельной системы синхронизации, состоящей из четырёх СЦ, с учётом допущения о нульмерности динамических процессов течения рабочей жидкости в соответствующих полостях пневмогидроагрегатов, детерминированности функции p_{ES}, определяющей давление в газовых полостях СЦ, и об отсутствии термодинамических процессов теплообмена с внешней средой, представлена системой восьми обыкновенных дифференциальных уравнений $\left(k=\overline{1,4}\right)$ [8]:

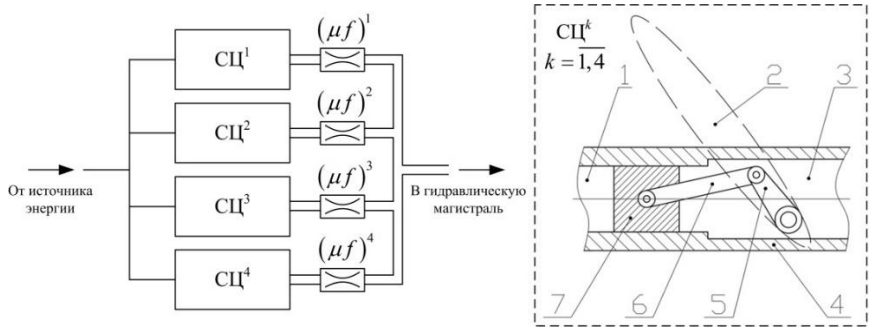


Рис.1. Структура дроссельной системы синхронизации и облик *k*-ого СЦ, $k=\overline{1,4}$, на основе КШМ:
1 — газовая полость, 2 — ИО, 3 — жидкостная полость,
4 — корпус, 5 — кривошип, 6 — шатун, 7 — плунжер

$$\frac{d^2\beta^k}{dt^2}=\frac{1}{J_{red}^k}\left(\left(p_{ES}-p_{liq}^k\right)S^kF_{1\pm}^k-r_{vfric}^k\left(F_{1\pm}^k\right)^2\omega^k-R_{\pm}^k\left(\omega^k\right)^2+M_{ext}^k\right), \quad (1)$$

$$\frac{dp_{liq}^k}{dt}=\frac{a^2}{V_{liq}^k}\left(\rho_{liq}^kS^kF_{1\pm}^k\omega^k+\operatorname{sgn}\left(p_{liq}^k-p_{out}\right)\mu^kf^k\sqrt{2\rho_{liq}^k\left|p_{liq}^k-p_{out}\right|}\right). \quad (2)$$

Уравнения (1), являющиеся законами движения механической системы «КШМ-ИО» и полученные методами аналитической механики на основе уравнений Лагранжа второго рода, описывают процесс перемещения *k*-ого ИО. Здесь t — время, β^k — угловая координата (значение перемещения ИО), p_{liq}^k — давление в жидкостной полости СЦ, S^k — эффективная площадь плунжера, r_{vfric}^k — коэффициент вязкого трения плунжера о корпус СЦ, ω^k — проекция вектора угловой скорости ИО, M_{ext}^k — функция, обладающая, в общем случае, стохастическими свойствами, и определяющая величину, а также направление внешнего силового воздействия на ИО, J_{red}^k — приведённый момент инерции ИО относительно оси вращения кривошипа (ортогональной плоскости рис. 1), $F_{1\pm}^k$, $R_{\pm}^k$ — заданные на отрезке $\left[0;\beta_{\max}\right]$ функции [8], $\beta_{\max}$ — максимальное значение угловой координаты β^k, определяемое конструктивными особенностями КШМ.

Уравнения (2), являющиеся следствием закона сохранения массы в интегральной форме для сжимаемой сплошной однокомпонентной однородной жидкой среды, расположенной внутри жидкостной полости СЦ, и полученные методами технической гидромеханики, описы-

вают физический процесс изменения давления рабочей жидкости p_{liq}^k при перемещении КШМ k-ого СЦ во времени. Здесь a — скорость звука в жидкости, V_{liq}^k — объём жидкостной полости СЦ, ρ_{liq}^k — плотность жидкости, p_{out} — давление жидкости в гидравлической магистрали (за дросселями), $f^k = \pi/4\left(d^k\right)^2$, d^k — диаметр k-ого дросселирующего сечения.

Система (1)–(2) дополняется двенадцатью начальными условиями:

$$\beta^k\left(t_0\right) = \beta_0^k,\ \omega^k\left(t_0\right) = \omega_0^k,\ p_{liq}^k\left(t_0\right) = \left(p_{liq}^k\right)_0,\ k = \overline{1,4}, \tag{3}$$

где t_0 — время начала функционирования системы синхронизации; β_0^k, ω_0^k и $\left(p_{liq}^k\right)_0$ — заданные значения угловой координаты, проекции вектора угловой скорости ИО и давления рабочей жидкости в жидкостной полости СЦ соответственно.

Задача многомерной оптимизации. Рассмотрим отображение $\Phi : Dr^1 \times Dr^2 \times Dr^3 \times Dr^4 \to \mathbb{R}_+$, для которого

$$\Phi\left(M^1, M^2, M^3, M^4\right) = \max\left\{t^1, t^2, t^3, t^4\right\} - \min\left\{t^1, t^2, t^3, t^4\right\} \to \min. \tag{4}$$

Функция четырёх переменных Φ называется целевой для задачи многомерной оптимизации и определена на множестве $Dr^1 \times Dr^2 \times Dr^3 \times Dr^4 \subset \mathbb{R}^4$ таким образом, что

$$M^k = \left(\mu f\right)^k \in Dr^k \subset \mathbb{R}^1,\ k = \overline{1,4}, \tag{5}$$

где $Dr^k = \left[\left(\mu f\right)_{\inf}^k; \left(\mu f\right)_{\sup}^k\right]$, $\left(\mu f\right)_{\inf}^k$, $\left(\mu f\right)_{\sup}^k \in \left\{\mathbb{R} : \left(\mu f\right)_{\inf}^k, \left(\mu f\right)_{\sup}^k > 0, \left(\mu f\right)_{\inf}^k, \left(\mu f\right)_{\sup}^k < +\infty\right\}$, $\left(\mu f\right)_{\inf}^k$, $\left(\mu f\right)_{\sup}^k$ — нижняя и верхняя границы диапазонов изменения эффективной площади k-ого дросселя, установленного в гидравлической линии k-ого СЦ, t^k — время движения k-ого ИО при изменении координаты кривошипа β^k КШМ в пределах от нуля до $\beta_{\max}$, определяемое точкой $M^k \in Dr^k$, $k = \overline{1,4}$, из решения прямой задачи (1)–(3). Совокупность функции (4) и ограничений (5) на управляемые параметры $\left(\mu f\right)^1$, $\left(\mu f\right)^2$, $\left(\mu f\right)^3$, $\left(\mu f\right)^4$ представляет собой задачу минимизации времени рассогласования перемещения четырёх ИО дроссельной системы синхронизации [8].

Эвристический алгоритм глобальной оптимизации. Теория методов оптимизации в развитие задач поиска глобального оптимума предлагает новые способы декомпозиции многомерной области пространства управляемых параметров [9], эффективные современные программные системы автоматической настройки оптимизационных алгоритмов [10], стратегии на основе гибридизации глобального и локального поиска [11], улучшенные алгоритмы на основе метода Ψ — преобразования [12], различные эвристические методы, среди которых широкое распространение получили генетические алгоритмы оптимизации [13], [14], [15].

Для вычисления глобального экстремального значения функции Φ на множестве $Dr^1 \times Dr^2 \times Dr^3 \times Dr^4 \subset \mathbb{R}^4$ использован модифицированный эволюционный алгоритм, в котором реализована процедура позиционного бинарного кодирования, комбинация ранговой пропорциональной селекции и принципа рулетки, в качестве операции скрещивания особей выбран одноточечный кроссовер, вместо оператора мутации введён принцип инверсии.

Применительно к задаче (4)–(5) хромосома, которая однозначно определяет конкретную особь популяции, соответствует набору управляемых параметров $(\mu f)^1$, $(\mu f)^2$, $(\mu f)^3$, $(\mu f)^4$ или точке $\left(M^1, M^2, M^3, M^4\right) \in Dr^1 \times Dr^2 \times Dr^3 \times Dr^4$. Одна хромосома состоит из четырёх генов, т.е. точка $M^k \in Dr^k$, $k = \overline{1,4}$, хранит в себе информацию об одном гене. Количество символов двоичной последовательности, кодирующей действительные числа из диапазонов $\left[(\mu f)^k_{\inf}; (\mu f)^k_{\sup}\right] \subset \mathbb{R}^1$, $k = \overline{1,4}$, определялось из условий обеспечения точности, согласно формулам $10^q diam^k \le 2^n - 1$, где q — количество знаков после запятой действительного числа в десятичной системе счисления, $diam^k = (\mu f)^k_{\sup} - (\mu f)^k_{\inf}$, n — длина гена.

Для уточнения экстремальных значений функции Φ, определяемой формулой (4), использована модификация классического алгоритма прямого поиска Хука-Дживса с постоянным ускоряющим множителем [16], [17], смысл которой состоит в том, чтобы при выполнении алгоритмических этапов исследующего поиска и поиска по образцу базисная точка выбиралась согласно дополнительным проверочным условиям, определяющим принадлежность точек M^k соответствующим множествам Dr^k, $k = \overline{1,4}$ [8].

Программная среда эвристической оптимизации. Разработан программный комплекс dgsSynchCAD для компьютерного моделирования физических процессов функционирования дроссельной систе-

мы синхронизации. В процессе выполнения численного эксперимента (при решении прямой и оптимизационной задач) пользователю предоставляется возможность получать, визуализировать и сохранять для последующего анализа такие динамические характеристики системы как угловые перемещения и проекции векторов угловых скоростей кривошипов, шатунов, ИО, линейные перемещения и проекции векторов скоростей плунжеров, давления и плотности рабочей жидкости каждого СЦ от времени.

Вычислительное ядро программной среды, построенное методологией объектно-ориентированного подхода, содержит динамическую математическую модель функционирования указанной автоматической системы на основе уравнений Лагранжа второго рода (1) и фундаментальных балансовых уравнений механики сплошных сред (2). Для получения дискретного аналога континуальных уравнений математической модели использован классический численный конечно-разностный метод Рунге-Кутты четвёртого порядка аппроксимации и метод Рунге-Кутты-Мерсона с оценкой погрешности решения на каждом переменном шаге интегрирования. Программная среда предлагает удобный структурированный оконный пользовательский интерфейс для выполнения автоматизированных проектных расчётов физических характеристик системы синхронизации, в том числе с учётом оптимального выбора величины эффективных площадей дросселей.

Вычислительное ядро имеет гибкую архитектуру для возможности оперативного внесения модификаций в отдельные блоки кода и дальнейшего расширения его функционала. На рис. 2 изображена диаграмма классов программной среды, идентификаторы которых отражают смысл выполняемых ими алгоритмических операций.

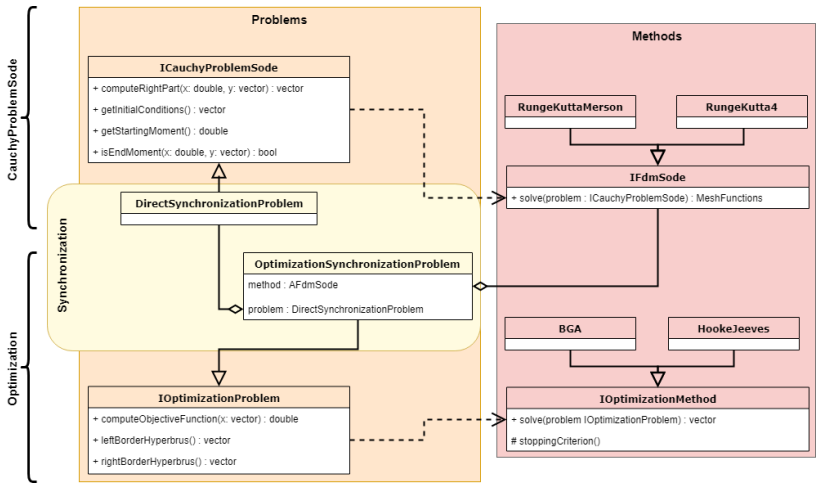


Рис. 2. Диаграмма классов программной среды dgsSynchCAD

Классы-интерфейсы ICauchyProblemSode (определяет спецификацию классов, ориентированных на решение задачи Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений) и IOptimizationProblem (определяет спецификацию классов, ориентированных на решение многомерной задачи оптимизации) являются параметрами методов IFdmSode::solve() и IOptimizationMethod:: ::solve(), принадлежащие классам-интерфейсам IFdmSode (определяет спецификацию классов, ориентированных на алгоритмизацию методов конечных разностей) и IOptimizationMethod (определяет спецификацию классов, ориентированных на алгоритмизацию методов оптимизации) соответственно. КлассыRungeKuttaMerson и RungeKutta4, в которых реализованы соответствующие численные алгоритмы решения прямой задачи, являются наследниками IFdmSode. Классы BGA и HookeJeeves, в которых реализован генетический алгоритм с бинарным кодированием и метод Хука-Дживса соответственно, являются наследниками IOptimizationMethod. Классы DirectSynchronizationProblem (реализует интерфейс ICauchyProblemSode) и OptimizationSynchronizationProblem (реализует интерфейс IOptimizationProblem) содержат программные конструкции для формализации правых частей дифференциальных уравнений и начальных условий прямой задачи (1)–(3) и целевой функции оптимизационной задачи (4)–(5) соответственно. Класс OptimizationSynchronizationProblem агрегирует класс DirectSynchronizationProblem и класс-интерфейс IFdmSode, поскольку для определения значений целевой функции (4) необходимо многократно выполнять решение прямой задачи.

Ключевые возможности разработанной иерархии классов:

- модульная отладка используемых численных методов (исключено внесение случайных ошибок в другие логические элементы кода благодаря высокой степени инкапсуляции данных);
- тестирование численных методов на широком классе прикладных задач с любым числом неизвестных функций (особенности формулировки тестовой задачи описываются в специальной сервисной области);
- преемственность отлаженных численных методов другими прикладными программами (с использованием инструментария dll-библиотек);
- добавление новых численных методов в вычислительное ядро происходит без изменения стабильно функционирующей алгоритмической структуры программной среды в силу использования концепции полиморфизма данных;
- использование комбинации различных конечно-разностных и оптимизационных вычислительных алгоритмов при решении прямой задачи и в процессе поиска глобального экстремума целевой функции.

Оконный интерфейс программной среды dgsSynchCAD содержит четыре вкладки. Вкладка «Система синхронизации» открывает доступ к полям ввода геометрических и массовых характеристик СЦ^k, $k=\overline{1,4}$, физических параметров источника энергии и рабочей жидкости, а также значений внешних силовых воздействий, приложенных к ИО^k, $k=\overline{1,4}$. С помощью инструментария вкладки «Прямая задача» пользователь имеет возможность выполнить вычислительный эксперимент по тем исходным данным, которые определены во вкладке «Система синхронизации», и получить графическую визуализацию результатов. Вкладка «Задача оптимизации» предназначена для решения сформулированной оптимизационной задачи (4)–(5). Процесс и результаты оптимизации представляются в удобном численном и графическом виде. Во вкладке «Настройки численных методов» содержатся диалоговые элементы, определяющие эффективность функционирования численных алгоритмов и параметры сохранения результатов вычислений в виде текстовых файлов. Команда меню «Язык» позволят выполнить смену языка интерфейса с русского на английский и обратно.

Результаты исследований. Решена модельная задача выбора оптимальных эффективных площадей дросселей с помощью разработанной среды автоматизированного проектирования. Для компьютерного моделирования функционирования системы синхронизации выбраны следующие исходные данные (вкладка «Система синхронизации»). Принято, что к ИО соответствующих СЦ приложены постоянные внешние силовые воздействия: $M_{ext}^1=550$ Н·м (приложено к ИО^1), $M_{ext}^2=150$ Н·м (приложено к ИО^2), $M_{ext}^3=-300$ Н·м (приложено к ИО^3), $M_{ext}^4=-750$ Н·м (приложено к ИО^4); давление газов от источника энергии также выбрано постоянным $\left(p_{ES}=const\right)$ и равным $11{,}7$ МПа; геометрические характеристики СЦ^1, СЦ^2, СЦ^3 и СЦ^4 выбраны одинаковыми; $\left(\mu f\right)_{\inf}^k=10$ мм^2, $\left(\mu f\right)_{\sup}^k=80$ мм^2, что соответствует диаметрам $d_{\inf}^k\approx 4{,}12$ мм, $d_{\sup}^k\approx 11{,}65$ мм при $\mu^k=0{,}75$, $k=\overline{1,4}$.

Установлены следующие настроечные значения генетического алгоритма (вкладка «Настройки численных методов»): размер популяции ограничен 32 особями, длина гена составляла 16 бит, количество родительских пар в популяции — 8. Это означает, что на каждой итерации оптимизационных преобразований выполнялась обработка 32-х особей, которым соответствуют определённые управляемые параметры $\left(\mu f\right)^1$, $\left(\mu f\right)^2$, $\left(\mu f\right)^3$, $\left(\mu f\right)^4$ или точки $\left(M^1,M^2,M^3,M^4\right)\in$

$\in Dr^1 \times Dr^2 \times Dr^3 \times Dr^4$. Эмпирическое значение вероятности мутации (инверсии) особей выбрано равным 0,1, количество итераций генетического алгоритма с бинарным кодированием — 25. Кроме того, для ускоряющего множителя (шага) алгоритма Хука-Дживса выбрано значение, равное единице, а для коэффициента дробления (деления) — равное двум.

После нажатия клавиши «Запустить вычислительный эксперимент» отображаются следующие результаты. На рис. 3 изображены графические зависимости углового перемещения четырёх ИО от времени (вкладка «Прямая задача», в раскрывающемся списке выбрать «Графики угловых перемещений ИО»).

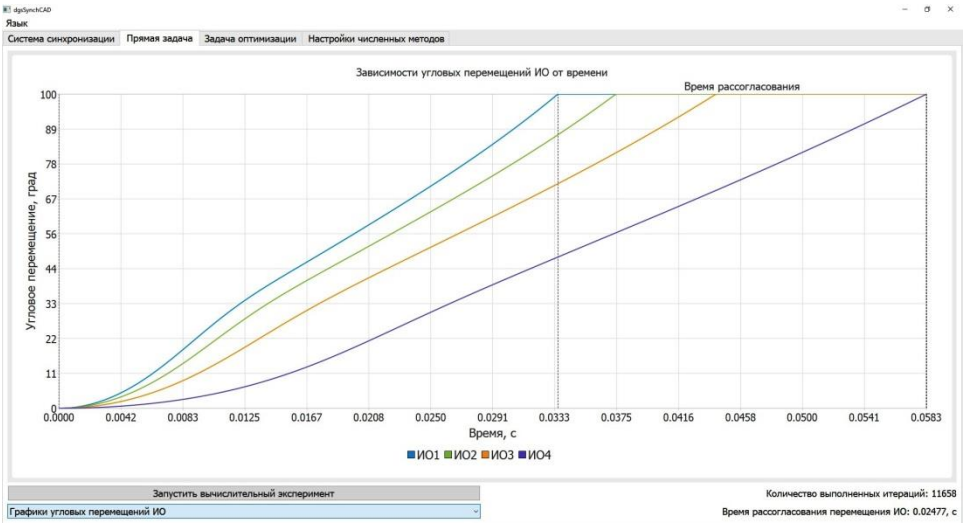


Рис. 3. Графическая иллюстрация результата решения прямой задачи (показаны графики углового перемещения $ИО^1$, $ИО^2$, $ИО^3$ и $ИО^4$)

На рис. 4 приведены динамические кривые, отображающие колебательный характер изменения проекции вектора угловой скорости каждого ИО во времени (вкладка «Прямая задача», в раскрывающемся списке выбрать «Графики проекций векторов угловых скоростей ИО»). Показан случай несинхронного перемещения четырёх ИО для значений эффективных диаметров дросселей равных $(\mu f)_0^k = 40$ мм^2 при $\mu^k = 0,75$, $k = \overline{1,4}$. Разница во времени достижения угловыми координатами β^k, $k = \overline{1,4}$, предельных величин $\beta_{\max}^k = 100^{\circ}$ (значение функции Φ) составило $\Phi_0 = 26,49 \cdot 10^{-3}$ с при 12642 выполненных итерациях конечно-разностного метода (величина шага интегрирования — $0,5 \cdot 10^{-5}$ с). Поскольку на $ИО^1$ и $ИО^2$ заданы знакоположи-

тельные внешние моменты M_{ext}^{1} и M_{ext}^{2}, способствующие более быстрому изменению их угловых координат β^{1} и β^{2}, а на ИО^{3} и ИО^{4} — знакоотрицательные внешние моменты M_{ext}^{3} и M_{ext}^{4}, замедляющие их динамику, то ИО^{1} достигает конечной точки своего вращательного движения раньше ИО^{4}, разница во времени при этом есть Φ_0.

На рис. 5 приведены динамические кривые, отображающие изменение угловой координаты каждого ИО во времени после выполнения оптимизационной процедуры минимизации времени рассогласования перемещения четырёх ИО рассматриваемой пневмогидравлической системы синхронизации (вкладка «Задача оптимизации», в раскрывающемся списке выбрать «Графики угловых перемещений ИО (после оптимизации)»).

В результате последовательного применения генетического алгоритма и метода на основе Хука-Дживса (вкладка «Задача оптимизации», последовательное нажатие клавиш «Начать решение оптимизационной задачи БГА» и «Продолжить решение оптимизационной задачи методом ХД») эту разницу во времени удаётся минимизировать: $\Phi_{\min} = 1,245 \cdot 10^{-3}$ с, экстремальные параметры дросселей получаются равными $(\mu f)_{\min}^{1} \approx 33,45$ мм^2, $(\mu f)_{\min}^{2} \approx 38,54$ мм^2, $(\mu f)_{\min}^{3} \approx 49,54$ мм^2 и $(\mu f)_{\min}^{4} = 80$ мм^2, что соответствует диаметрам $d_{\min}^{1} \approx 7,54$ мм, $d_{\min}^{2} \approx 8,09$ мм, $d_{\min}^{3} \approx 9,17$ мм и $d_{\min}^{4} \approx 11,65$ мм при $\mu^{k} = 0,75$, $k = \overline{1,4}$.

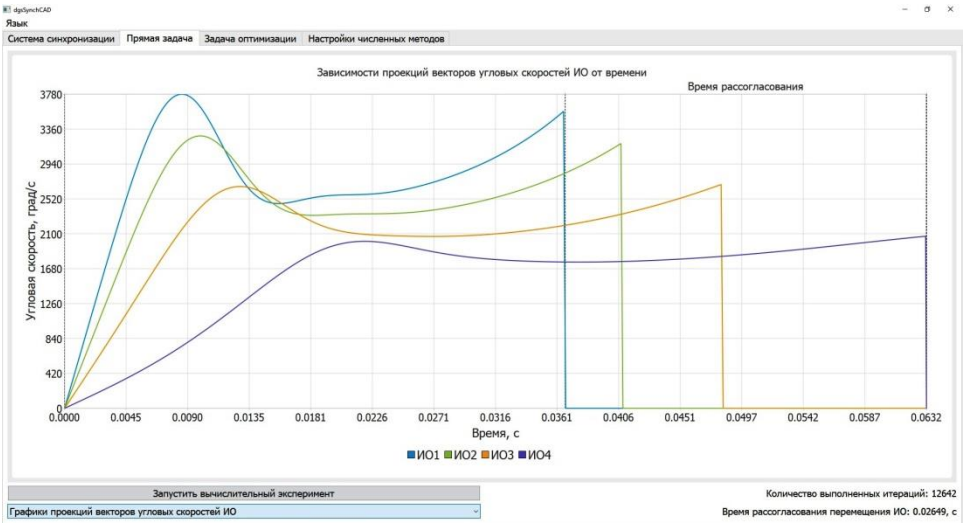


Рис. 4. Изменение проекции вектора угловой скорости каждого ИО во времени

Рис. 5. Графическая иллюстрация результата оптимизационного процесса

На рис. 6 приведена графическая зависимость значения целевой функции от номера итерационного процесса (вкладка «Задача оптимизации», в раскрывающемся списке выбрать «График целевой функции») после уточнения экстремальных значений функции Ф методом Хука-Дживса. Подтверждена эффективность совместного использования двух методов оптимизации при поиске глобального минимума функции Ф — значение целевой функции удаётся уменьшить практически в 5 раз.

Рис. 6. Зависимость значения целевой функции от номера итерации

Выводы. Разработана программная среда dgsSynchCAD для компьютерного моделирования и оптимального проектирования систем синхронизации параллельно работающих гидравлических приводов механических систем с дроссельным принципом регулирования. В основу вычислительного ядра программной среды положен эвристический алгоритм глобальной оптимизации с процедурой уточнения оптимального решения. Подтверждена эффективность данной процедуры оптимизации при поиске глобального минимума целевой функции, значение которой удалось уменьшить практически в 5 раз. Программная среда допускает расширение в направлении многокритериальной оптимизации и может быть использована при проектировании других видов гидравлических систем синхронизации.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Попов Д.Н. *Механика гидро- и пневмоприводов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002, 320 с.

[2] Casey B., Tumarkin M. How to Synchronize Hydraulic Cylinders. *Published by HydraulicSupermarket.com*, 2006, p. 8.
Available at: https://www.hydraulicsupermarket.com/synchronization.html

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

[4] 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. *Series Studies in Systems, Decision and Control*, 2017, vol. 95, pp. 231–239.

[5] 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.

[6] Мельникова В.Г., Коцур О.С., Щеглов Г.А. Особенности построения расчётной схемы для моделирования динамики стабилизатора расхода в пакете OpenFOAM. *Труды ИСП РАН*, 2017, т. 29, вып. 1, с. 53–70.

[7] Мельникова В.Г. Тестирование различных методов моделирования внутренних течений несжимаемой жидкости. *Труды ИСП РАН*, 2018, т. 30, вып. 6, с. 315–328.

[8] Bushuev A.Yu., Ivanov M.Yu., Korotaev D.V. Minimization of a mismatch time of movement of actuators of a throttle synchronization system. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1141, iss. 1.

[9] Sakharov M., Karpenko A.A. new way of decomposing search domain in a global optimization problem. *Advances in intelligent systems and computing*, 2018, vol. 679, pp. 398–402.

[10] Agasiev T., Karpenko A. The Program System for Automated Parameter Tuning of Optimization Algorithms. *Procedia computer science*, 2017, vol. 103, pp. 347–354.

[11] Бушуев А.Ю., Ряузов С.С. Оптимизация конструкции твердотопливного модельного газогенератора. *Математическое моделирование и численные методы*, 2019, № 4, с. 3–14.

[12] Бушуев А.Ю., Маремшаова А.А. Сравнение модифицированного метода Ψ−преобразования и канонического метода роя частиц. *Математическое моделирование и численные методы*, 2018, № 3, с. 22–37.
[13] Sakharov M., Karpenko A. Performance investigation of mind evolutionary computation algorithm and some of its modifications. *Advances in intelligeng systems and computing*, 2016, vol. 450, pp. 475–486.
[14] Карпенко А.П. *Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновлённые природой*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017, 446 с.
[15] Weise T. *Global Optimization Algorithms: Theory and Application*, 2009, p. 820. URL: http://www.it-weise.de/projects/book.pdf.
[16] Ивашко А.Г., Цыганова М.С., Карякин И.Ю. Модифицированный метод Хука-Дживса для нахождения параметров модели фазовых превращений. *Вестник ТюмГУ*, 2009, № 6, с. 197–202.
[17] Kelley C.T. *Iterative Methods for Optimization*. North Carolina, North Carolina State University Raleigh, 1995, 188 p.

Статья поступила в редакцию 09.02.2020

Ссылку на эту статью просим оформлять слудеющим образом:
Бушуев А.Ю., Иванов М.Ю., Коротаев Д.В., Реш Г.Ф. Программная среда dgsSynchCAD для моделирования и автоматизированной эвристической оптимизации дроссельных гидросистем синхронизации. *Математическое моделирование и численные методы*. 2020. № 1. с 103–117.

Бушуев Александр Юрьевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Вычислительная математика и математическая физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 30 научных работ. e-mail: a.ju.bushuv@yandex.ru

Иванов Михаил Юрьевич — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, АО «ВПК «НПО машиностроения». Автор более 40 научных работ.
e-mail: vpk@vpk.npomash.ru

Коротаев Дмитрий Владимирович — инженер-программист, ООО НПО «ИНКОР». Автор 5 научных работ. e-mail: korotaev_dv@inkor.pro

Реш Георгий Фридрихович — канд. техн. наук, первый заместитель начальника отделения, АО «ВПК «НПО машиностроения». Автор более 50 научных работ.
e-mail: g.f.resh@vpk.npomash.ru

Software environment dgsSynchCAD for modeling and computer-aided heuristic optimization of throttle synchronizing hydrosystems

© A.Yu. Bushuev[1], M.Yu. Ivanov[2], D.V. Korotaev[3], G.F. Resh[2]

[1]Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia
[2]MIC «NPO mashinostroyenia»,
Reutov, Moscow region, 143966, Russia
[3]LLC Scientific-production association «INKOR»,
Pravdinskiy, Pushkinskiy district, Moscow region, 141260, Russia

A software environment was developed for computer-aided design of optimal throttle hydraulic synchronization systems of actuators of various functional purposes operating under conditions of external alternating-sign force effects. The criterion of an optimization procedure was the minimization of a mismatch time of relative movement of actuators during operation. A compute core of an object-oriented code was constructed on the basis of a dynamic mathematical model of a synchronization system consisting of four power cylinders. A model problem was solved with the help of the created software environment. This model problem demonstrated the efficiency of the proposed multidimensional optimization process. The methodology was based on the use of the well-known heuristic method (binary coded genetic algorithm) and the subsequent improvement (in the sense of a given objective functional) of the obtained solution by a method on the basis of the Hooke-Jeeves algorithm. Recommendations on the practical application of the software and mathematical support for achieving the best convergence to the extreme value of a vector of controlled parameters were formulated.

Keywords: *synchronization system, hydraulic cylinder, unregulated throttle, mathematical modeling, finite difference method, Lagrange's equation of the second kind, heuristic optimization, genetic algorithm, class diagram, computational experiment*

REFERENCES

[1] Popov D.N. *Mekhanika gidro- i pnevmoprivodov* [Mechanics of Hydraulic and Pneumatic Actuators]. Moscow, BMSTU Publ., 2002, 320 p.

[2] Casey B., Tumarkin M. *How to Synchronize Hydraulic Cylinders*. Published by HydraulicSupermarket.com, 2006, p. 8.
Available at: https://www.hydraulicsupermarket.com/synchronization.html

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

[4] 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. *Series Studies in Systems, Decision and Control*, 2017, vol. 95, pp. 231–239.

[5] Ivanov M.Yu., Novikov A.E., Resh G.F. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series mechanical engineering*, 2017, no. 2, pp. 54–65.

[6] Melnikova V.G., Kotsur O.S., Shcheglov G.A. *Trudy ISP RAN — Proc. ISP RAS*, 2017, vol. 29, iss. 1, pp. 53–70.

[7] Melnikova V.G. *Trudy ISP RAN — Proc. ISP RAS*, 2018, vol. 30, iss. 6, pp. 315–328.

[8] Bushuev A.Yu., Ivanov M.Yu., Korotaev D.V. Minimization of a mismatch time of movement of actuators of a throttle synchronization system. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1141, iss. 1.

[9] Sakharov M., Karpenko A. A new way of decomposing search domain in a global optimization problem. *Advances in intelligent systems and computing*, 2018, vol. 679, pp. 398–402.

[10] Agasiev T., Karpenko A. The Program System for Automated Parameter Tuning of Optimization Algorithms. *Procedia computer science*, 2017, vol. 103, pp. 347–354.

[11] Bushuev A.Yu., Ryauzov S.S. *Matematicheskoe modelirovanie i chislennye metody — Mathematical Modeling and Computational Methods*, 2019, no. 4, pp. 3–14.

[12] Bushuev A.Yu., Maremshaova A.A. *Matematicheskoe modelirovanie i chislennye metody — Mathematical Modeling and Computational Methods*, 2018, no. 3, pp. 22–37.
[13] Sakharov M., Karpenko A. Performance investigation of mind evolutionary computation algorithm and some of its modifications. *Advances in intelligeng systems and computing*, 2016, vol. 450, pp. 475–486.
[14] Karpenko A.P. *Sovremennye algoritmy poiskovoj optimizacii. Algoritmy, vdohnovlyonnye prirodoj* [Modern Search Optimization Algorithms. Nature-Inspired Algorithms]. Moscow, BMSTU Publ., 2017, 446 p.
[15] Weise T. *Global Optimization Algorithms: Theory and Application*, 2009, p. 820. Available at: http://www.it-weise.de/projects/book.pdf.
[16] Ivashko A.G., Tsyganova M.S., Karjakin I.Yu. *Vestnik TyumGU — Herald of the Tyumen* State, 2009, vol. 6, pp. 197–202.
[17] Kelley C.T. *Iterative Methods for Optimization*. North Carolina, North Carolina State University Raleigh, 1995, 188 p.

Bushuev A.Yu., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Computational Mathematics and Mathematical Physics, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 25 scientific publications. Scientific interests: mathematical simulation in the technology, the methods of optimization and decision making, numerical methods.
e-mail: a.ju.bushuv@yandex.ru

Ivanov M.Yu., Cand. Sc. (Phys.-Math.), Senior Research Fellow, JSC Military Industrial Corporation NPO Mashinostroyenia. Author of over 40 scientific publications.
e-mail: vpk@vpk.npomash.ru

Korotaev D.V., part-programming engineer, LLC SPA «INKOR». Author of 5 scientific publications. e-mail: korotaev_dv@inkor.pro

Resh G.F., Cand. Sc. (Eng.), First Deputy Head of Department, JSC Military Industrial Corporation NPO Mashinostroyenia. Author of over 50 scientific publications.
e-mail: g.f.resh@vpk.npomash.ru