

УДК 629.7.036.7

Г. К. БАХМЕТ, Е. В. ГУЛЯЕВА, С. Ю. НЕСТЕРЕНКО

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КАТОДОВ-КОМПЕНСАТОРОВ ЭРД

В работе показана возможность использования элементов методологии системного анализа при исследовании вопроса повышения эффективности катода-компенсатора (КК) электрореактивных двигателей (ЭРД). Актуальность работы связана с ростом использования ЭРД, одним из главных элементов которых и является КК. В представленной работе рассматривалась задача выбора оптимального КК, работающего в диапазоне токов 10..70 А, с рабочим телом ксенон, и эмитирующей поверхностью – пленкой бария. Для решения задачи выбора эффективного КК использовался генетический алгоритм.

**Ключевые слова:** катод-компенсатор, электрореактивный двигатель, модель катода, пленка активатора, полый газоразрядный катод, генетический алгоритм.

### Введение

В настоящее время на большинстве перспективных космических аппаратах (КА) различного назначения используются электроракетные двигатели (ЭРД). Важным элементом определенных типов таких двигателей является катод-компенсатор (КК).

Рост количества задач, решаемых с помощью ЭРД, приводит и к росту затрат на исследования при проектировании КК. Поэтому актуальным является вопрос создания и исследования КК с использованием современных методологических приёмов. Одними из таких методологических направлений являются те, которые основаны на системном анализе. Для исследования выбран КК, работающий в диапазоне токов 10..70 А, использующий для образования электронов газоразрядный полый диафрагмированный катод на ксеноне с имитирующей поверхностью вольфрама покрытой пленкой бария.

С точки зрения системного анализа исследование начинается с определения проблем системы. Основная проблема при разработке КК это та, что математическая задача является некорректной, не допускающей однозначного решения. Это приводит к задаче создания конструктивных вариантов КК и выбора наилучшего из них. Для решения поставленных задач было предложено использовать генетический алгоритм.

### 1. Описание КК

Схематически выбранный КК представлен на рис. 1. КК представляет систему, состоящую из трех

подсистем:

А. Подсистема запуска. Состоит из элементов:

- Изолятор – 2,
- нагреватель - 4,
- тепловые экраны - 5,
- поджигной электрод (не указан),
- токоподвод - 11 (не указан).

Б) Подсистема подачи рабочего тела (ксенона):

- Газопроводящий тракт – 1,
- подсоединительный штуцер - 9 (не указан).

В) Подсистема эмиттера:

- Камера с активатором - 6,
- эмитирующая поверхность - 7,
- диафрагма – 8.

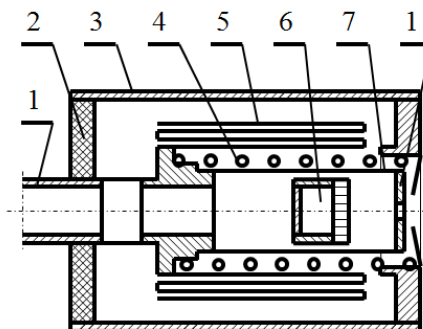


Рис. 1. Схема КК

Структурная схема КК со связями между элементами представлена на рис. 2.

Структурный, функциональный и информационный анализ позволяет выделить входные и выходные величины КК. *Входные величины – это:*

- размеры конструктивных элементов КК, к которым можно отнести: диаметр катода, длину по-

лости катода, диаметр отверстия диаграммы и другие,

- расход рабочего тела,
- разрядный ток.

*Выходные величины:*

- разрядное напряжение,
- температура эмитирующей поверхности
- давление в полости катода.

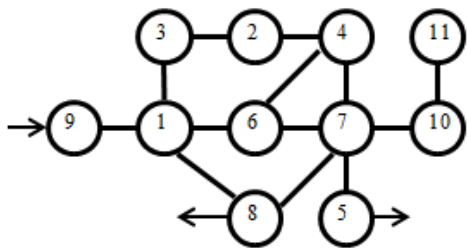


Рис. 2. Структурная схема КК

## 2. Модельное представление КК

Модель КК представляет связанные между собой модели подсистем.

Модельное представление подсистемы эмиттера составлено из:

1. Модели образования плёнки активатора в полости катода.

Модель описывает степень покрытия атомами бария эмитирующей поверхности полости катода. При этом скорости адсорбции и десорбции атомов бария на поверхностях в каждый момент времени одинаковы. Модель определяет квазиравновесную степень покрытия. Покрытие обеспечивает малую работу выхода эмитирующей поверхности. Модель представлена уравнениями для каждой поверхности катода [1, 2] в виде:

1.1. Поступление активатора через поры губки из камеры с его запасом на эмитирующую поверхность камеры

$$D_* \chi \frac{n_{a0} - n_a}{L_r} + \frac{n_a V_a}{4} (1 - \theta_\odot) - \Omega_\odot N_0 \theta_\odot = 0,$$

где  $D_*$  - приведенный коэффициент диффузии,  $\chi$  - степень пористости губки,  $n_{a0}$  - концентрация бария в камере,  $L_r$  - толщина губки,  $n_a$  - концентрация бария в полости,  $V_a$  - тепловая скорость атомов бария,  $\theta_\odot$  - степень покрытия поверхности камеры атомами бария,  $\Omega_\odot$  - скорость испарения бария с поверхности,  $N_0$  - поверхностная концентрация бария.

1.2. Поступление бария на боковую поверхность

$$\frac{n_a V_a}{4} (1 - \theta_\odot) - \Omega_\odot N_0 \theta_\odot = 0,$$

где  $\theta_\odot$  - степень покрытия барием боковой поверхности полости,  $\Omega_\odot$  - степень испарения бария с боковой поверхности.

1.3. Приход активатора через поры губки и уход из полости через отверстие диафрагмы

$$(D_* + D_V) \chi \frac{n_{a0} - n_a}{L_r} - \frac{n_a V_a}{4} \left( \frac{d_0}{d_{\Pi}} \right) = 0,$$

где  $D_V$  - объемный коэффициент диффузии,  $d_0$  - диаметр отверстия диафрагмы,  $d_{\Pi}$  - диаметр полости катода.

2. Для описания процессов в полости катода в работе используется модель, которая относится к низковольтному режиму. Физические представления, описываемые моделью, основаны на том, что ионы, ускоряемые на приповерхностном катодном падении потенциала, бомбардируют поверхность катода и разогревают его, обеспечивая уровень температур, достаточный для эмиссии электронов.

Модель, описывая основные процессы, происходящие в КК [1, 2], учитывает такие составляющие: давление в полости, поступление электронов эмиссии с поверхности и их уход, уравнение баланса ионов в полости, уравнение баланса энергии и скачок потенциала на выходном отверстии.

2.1. Давление в полости катода:

$$P_{\Pi} = n_e k T_e + P_n,$$

где  $n_e$  - плотность электронов,  $k$  - постоянная Больцмана,  $T_e$  - температура электронов,  $P_n$  - давление нейтралей.

2.2. Поступление электронов эмиссии с поверхности в единицу объёма и их уход из быстрой группы через отверстие диафрагмы:

$$n_n n_e < v \sigma_i > + \frac{1}{eV} \left( \int_{S_0} j_e dS - \int_S j_{\text{ЭМ}} dS \right) = 0,$$

где  $n_n$  - плотность нейтралей,  $< v \sigma_i >$  - сечение ионизации,  $e$  - заряд электрона,  $V$  - объём полости,  $j_e$  - плотность тока электронов,  $j_{\text{ЭМ}}$  - плотность тока эмиссии,  $S_0$  - площадь отверстия диафрагмы,  $S$  - площадь эмитирующей поверхности полости катода.

2.3. Уравнение баланса ионов в единичном объёме полости. Первое слагаемое – это количество ионов, образовавшихся в единицу времени в результате ионизации нейтралов, второе – это количество ионов, идущих на стенки катода и уходящих через отверстие диафрагмы:

$$n_n n_e < v \sigma_i > + \frac{1}{eV} \int_S j_i dS = 0,$$

где  $j_i$  - плотность тока ионов.

2.4. Уравнение баланса энергии. Учитывает подвод энергии потоком ионов и потери энергии на эмиссионное охлаждение и тепловой отвод:

$$\int_S j_i (U_k + \varphi_i - \varphi_S) dS - \int_S j_{EM} \varphi_S dS - \int_S q_S dS - Q = 0,$$

где  $U_k$  - прикатодное падение потенциала,  $\varphi_i$  - потенциал ионизации ксенона,  $\varphi_S$  - работа выхода электронов с эмиттирующей поверхности;  $q_S$  - теплопроводность материала,  $Q$  - тепловой поток учитывающий плазмы и конструкции, затраты на джоулевый нагрев.

2.5. Разность между потенциалом плазмы на выходном отверстии и прикатодным падением потенциала:

$$\varphi_{\Pi} = \int_{S_0} (j_e + j_i) \rho \frac{S_0}{S} dS,$$

где  $\rho$  - проводимость плазмы.

2.6. Скачок потенциала на выходном отверстии ( $\varphi_0$ ):

$$\frac{m}{2} \left( \frac{I_p}{en_i S_0} \right)^2 = \frac{m V_e^2}{6} + e \varphi_0,$$

где  $m$  - масса электрона,  $I_p$  - разрядный ток,  $V_e$  - скорость электронов.

### 3. Расчеты конструкции КК

Проектирование катода ЭРД является многокритериальной задачей, поэтому выбор обобщенного критерия качества катода построен на принципе рассмотрения широкого набора возможных вариантов катода для данной задачи и выбора наиболее удачного варианта. Этот процесс возможен благодаря автоматизации процессов выбора параметров.

В результате проведения системного анализа и использования априорной информации были выбра-

ны параметры, определяющие геометрию конструкции КК и его элементов, и влияющие на энергетические затраты, которые должны быть минимальными для эффективной работы катода (таблица 1). Исходя из априорной информации, определены пределы варьирования конструктивных размеров катода, чтобы избежать разрушения его конструкции.

Все константы, используемые в данной работе, были взяты из справочника [3]. Начальные значения основных параметров, влияющих на работу катода и его модель, представлены в таблице 2.

Рассмотренный КК рассчитывался в диапазоне токов от 10 до 70 А. Выбор критерия эффективности КК определяется задачей решаемой летательным аппаратом. Это могут быть энергопотребление КК, потребная масса плазмообразующего газа, запас активатора.

Таблица 1  
Конструктивные параметры КК

Наименование	Пределы варьирования
Диаметр полости катода, м	0,006..0,01
Диаметр пористой вставки элемента с активатором, м	0,004..0,008
Длина полости катода, м	0,002..0,012
Длина камеры элемента с активатором, м	0,005..0,01
Толщина боковой стенки, м	0,0005..0,001
Степень пористости	0,15..0,2
Толщина губки, м	0,0005..0,001
Диаметр пор в губке, мкм	0,8..1,2

Таблица 2  
Начальные значения основных параметров

Наименование	Значение
Массовый расход активатора, кг/с	$5 \cdot 10^{-10}$
Массовый расход ксенона, кг/с	$6 \cdot 10^{-7}$
Масса атома активатора, кг/моль	$137 \cdot 10^{-8}$
Плотность атома активатора, кг/м <sup>3</sup>	3500
Работа выхода плёнки бария с поверхности, эВ	3,2
Потенциал связи атомов активатора в жидкой фазе, эВ	2,2
Потенциал ионизации атомов ксенона, эВ	12,08
Ресурс, часы	$10^2 \cdot 10^4$
Разрядный ток, А	10..70

В данной работе рассматривались маршевые двигатели, и в качестве функции цели было выбрано энергопотребление. Основным параметром, влияющим на этот фактор, является разрядное напряжение, которое представляло собой сумму прикатодного падения потенциала, потенциала ионизации, скачка потенциала на выходном отверстии.

#### 4. Построение вариантов конструкций КК

Для выбора эффективного КК, в области варьирования конструктивными параметрами, строились возможные варианты конструкций, для которых определялось разрядное напряжение. Как результат выбиралась конструкция с наименьшим разрядным напряжением.

Для решения поставленной задачи автором предложено использовать генетический алгоритм (ГА), который позволит оптимизировать энергетические затраты, соблюдая все ограничения и возможные изменения геометрических размеров катода со временем. Также, в связи с существованием различных конструктивных схем КК, различных критериев их эффективности предлагается реализовать универсальный программный продукт, который способен использовать генетический алгоритм, не привязываясь к конкретному КК. Таким образом, для каждого вида КК алгоритмы вычисления параметра оптимальности и проверки соблюдения ограничений выводиться в отдельный класс, который содержится в отдельной библиотеке. Далее на этапе выполнения основной программы с помощью рефлексии, происходит подключение к созданным библиотекам и выполняется вычисление оптимальных параметров для различных КК с применением генетического алгоритма.

В генетическом алгоритме (рис. 3) на этапе создания *начальной популяции* для каждой особи случайным образом генерируются значения входных переменных в указанных пределах. Далее значения сформированных величин отправляются в «dll-файл», в котором производится расчёт функции цели, после чего, значение которой возвращается в основную программу.

На этапе *селекции* из всей популяции выбирается определённая её доля, которая остается для дальнейшей работы. С помощью фитнес-функции производится отбор приспособленных особей для скрещивания следующего поколения. Далее с помощью мутации доопределяется популяция до начального размера. После чего входные переменные мутированных особей отсылаются в «dll-файл» и возвращаем назад значение функции цели.

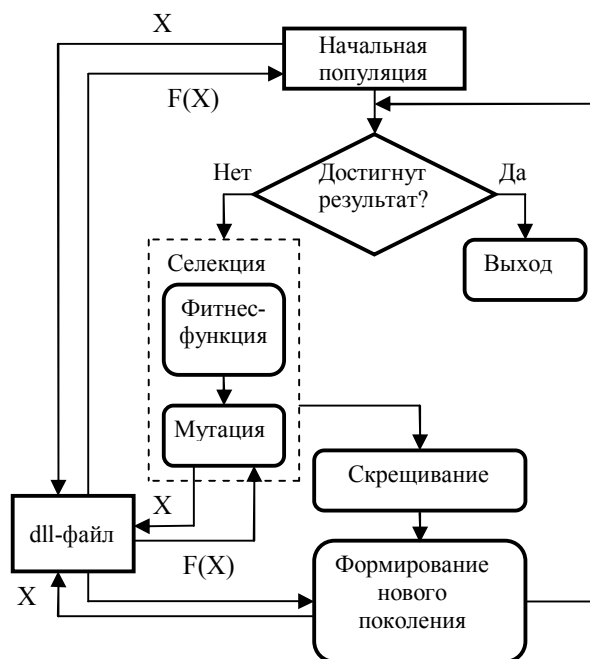


Рис. 3. Генетический алгоритм

На этапе *скрещивания* поочередно берётся каждый объект популяции, к которому применяется один из типов скрещивания со случайным объектом этой же популяции. Таким образом, формируется новое поколение того же размера, после чего мы опять переходим на этап селекции.

Данный подход позволит существенно сократить трудозатраты для создания системы проектирования КК и разработки основных рекомендаций по выбору необходимых параметров КК.

#### 5. Программная реализация математической модели КК

Разработанное программное приложение позволяет оптимизировать энергопотребления КК, с ресурсом, рассчитанным на 1 год и шагом 1 день. Это позволит существенно сократить трудозатраты для создания системы проектирования КК и разработки основных рекомендаций по выбору необходимых параметров КК. На рисунке 1 представлено главное диалоговое окно работы ГА. После заполнения необходимых полей и настройки ГА программа начинает свою работу, результаты расчётов которой приведены в диалоговом окне на рисунке 2. После завершения работы программы ГА у пользователя есть возможность: воспользоваться найденными значениями входных параметров для определения распределения температур, распределения плёнки активатора, разрядного тока, а также рассчитать разрядное напряжение, при котором энергопотребление катода является минимальным. Главное

диалоговое окно для расчётов параметров катода приведено на рисунке 4. Рабочие окна представлены на рисунках 5,6.

### Заключение

Реализовано программное приложение расчета конструктивных величин КК и предложен генетический алгоритм для выбора варианта более эффективного КК.

В работе, на основании выбранного модельного представления работы КК, разработана автоматизированная система выбора его оптимальных конструктивных параметров, позволяющая осуществлять необходимые расчёты, строить графики, с возможностью управлять режимами катода для минимизации его энергопотребления.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения полученных результатов при автоматизации проектирования КК электрореактивных двигателей для конструкторских отделов предприятия аэрокосмической техники. Результаты исследований можно использовать в учебном процессе в курсах использования системного анализа при проектировании двигательных установок летательных аппаратов.

### Литература

1. Оранский, А. И. Газоразрядные полые высокоэмиссионные катоды: Теория и расчёт. [Текст] / А. И. Оранский, С. Ю. Нестеренко. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2012. – Т. 2. – 156 с.
2. Белан, Н. В. Катоды электрореактивных двигателей (рабочие процессы, конструкции, и расчёт) [Текст] / Н. В. Белан, А. И. Оранский, Г. К. Бахмет [и др.]. – Х. : Харьк. авиац. ин-т, 1984. – 106 с.
3. Таблицы физических величин [Текст] : справочник / под ред. И. К. Кикоина. – М. : Атомиздат, 1976. – 720 с.

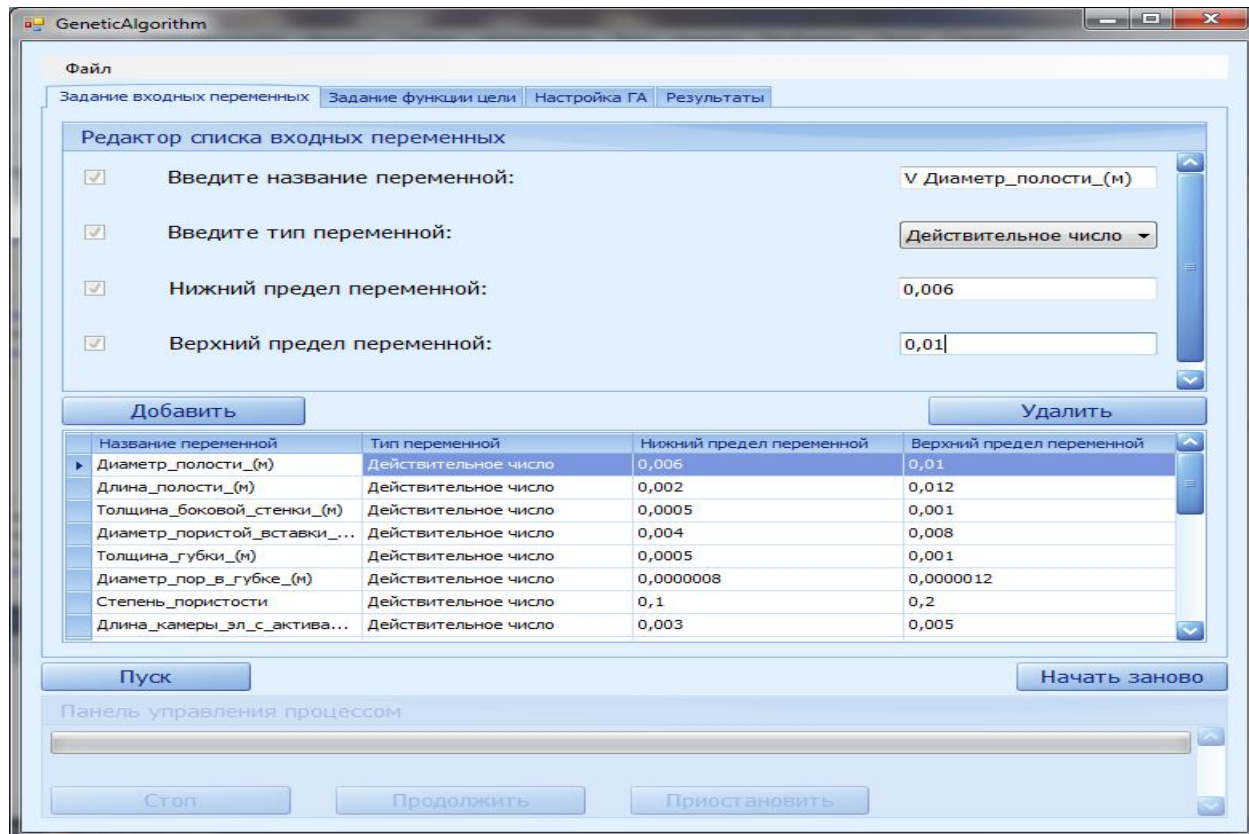


Рис. 4. Главное окно работы ГА

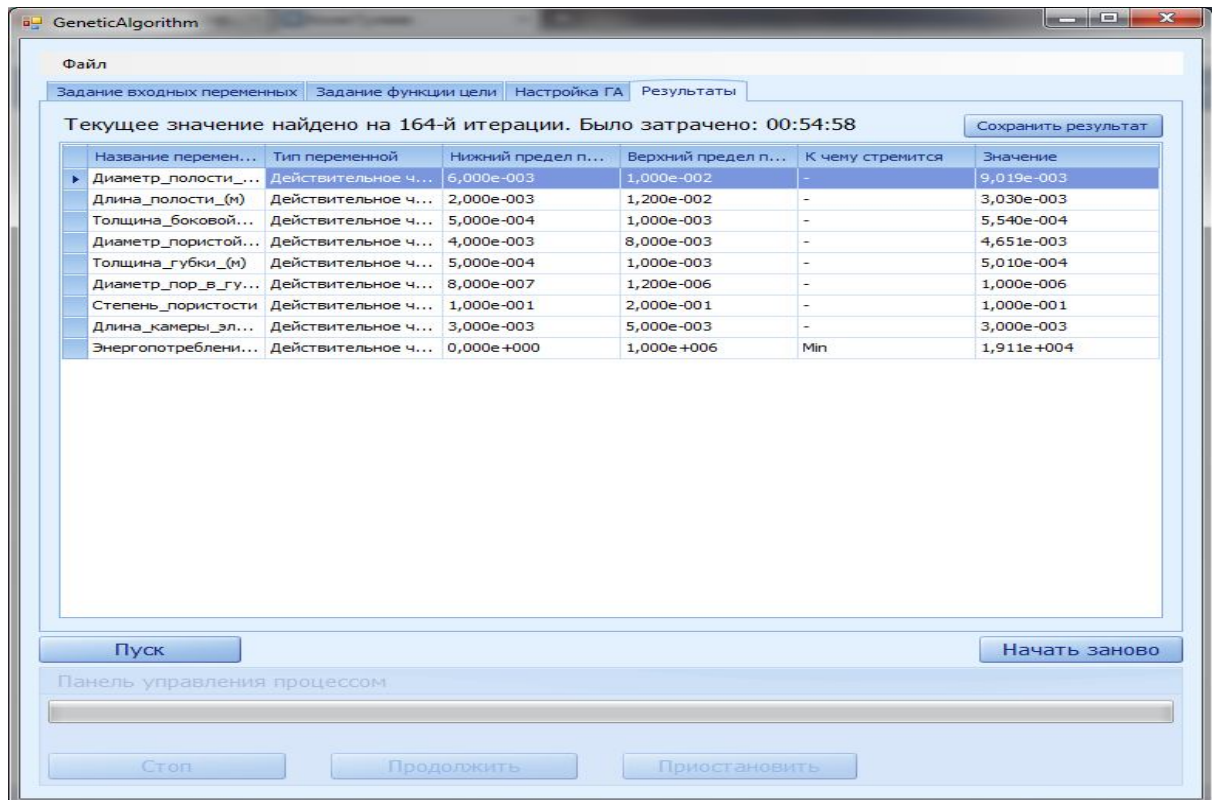


Рис. 5. Результаты работы ГА

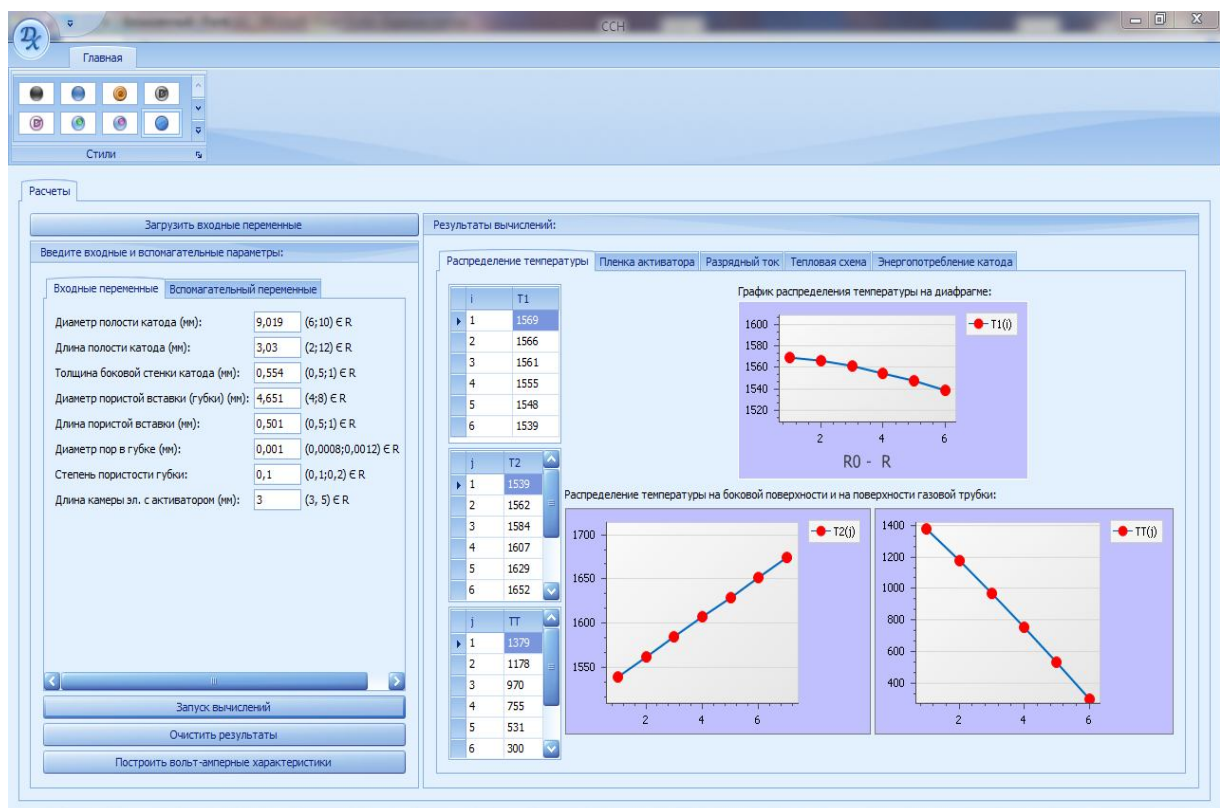


Рис. 6. Главное окно для расчёта конструкции КК

Поступила в редакцію 12.06.2015, рассмотрена на редколлегии 23.06.2015

**Рецензент:** канд. физ.-мат. наук., проф. кафедры А. В. Головченко, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

### **ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ КАТОДІВ-КОМПЕНСАТОРІВ ЕРД**

*Г. К. Бахмет, Е. В. Гуляева, С. Ю. Нестеренко*

У роботі показано можливість використання елементів методології системного аналізу при дослідженні питання підвищення ефективності катода-компенсатора (КК) електрореактивних двигунів (ЕРД). Актуальність роботи пов'язана із зростанням використання ЕРД, одним з головних елементів яких і являється КК. У роботі розглядалося завдання вибору оптимального КК, працюючого в діапазоні струмів 10..70А, на ксеноні з плівкою барія. Для розв'язку задачі вибору ефективного КК використовувався генетичний алгоритм.

**Ключові слова:** катод-компенсатор, електрореактивний двигун, модель катода, плівка активатора, порожнистий газорозрядний катод, генетичний алгоритм.

### **THE USE OF SYSTEM ANALYSIS FOR EPT COMPENSATOR-CATHODES OPERATION EFFICIENCY INCREASE**

*G. K. Bakhmet, Ye. V. Guliayeva, S. Yu. Nesterenko*

The possibility is shown in the paper to use the elements of system analysis methodology in research of the problem of increase of compensator-cathode (CC) of electric propulsion thrusters (EPT). Actuality of the work is determined by increase of EPT use, where CC is one of main elements. The task was considered of the optimal CC choice operating inside current range of 10...70 A with xenon as propellant and barium film on emitting surface. Genetic algorithm was used for solution of task of effective CC choice.

**Keywords:** compensator-cathode, electric propulsion thruster, cathode model, activator film, gas discharge hollow cathode, genetic algorithm.

**Бахмет Геннадий Константинович** – канд. техн. наук, доц., доц. каф. высшей математики и системного анализа, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: kaf405bahmet@mail.ru.

**Гуляева Елизавета Викторовна** – студент-выпускник факультета ракетно-космической техники, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

**Нестеренко Сергей Юрьевич** – канд. техн. наук, доц., доц. каф. космической техники и нетрадиционных источников энергии, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: sergiush@yahoo.com.