

ИНТЕГРИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ КАНАЛОВ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ СТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ

М.В. Михайлов, Ю.М. Казанцев

ФГУП «Научно-производственный центр «Полус», г. Томск

E-mail: polus@online.tomsk.net

Исследуется интегрированная модель каналов электропитания стационарного плазменного двигателя, включающая модели солнечной батареи, канала разряда анод – катод и системы электропитания. Показан алгоритм функционирования модели и диаграммы тока и напряжения разряда для различных режимов работы двигателя. С помощью полученных диаграмм определено наибольшее перерегулирование в системе с четырьмя замкнутыми обратными связями и на основании «гипотезы фильтра» сделан вывод об ее устойчивости. Предложенная модель позволяет имитировать все режимы работы системы электропитания, а также моделировать различные варианты запуска двигателя и работу различных типов термодросселей.

В последние годы компьютерное моделирование различных устройств привлекает значительное внимание, поскольку позволяет сократить время и существенно снизить затраты на разработку приборов. Это особенно важно для систем, комплексное исследование которых затруднительно, или требует больших материальных издержек. К такого рода системам относится устройство запуска и электропитания стационарного плазменного двигателя (СПД), первичным источником которого является солнечная батарея (СБ), а нагрузкой – СПД, способный работать только в условиях глубокого вакуума.

Цель моделирования – получить точное представление о процессах, происходящих в схеме устройства запуска и электропитания СПД во всех режимах его работы, определить принципиальные особенности управления и провести анализ устойчивости схемы. Следовательно, интегрированная модель каналов электропитания СПД должна включать модели СБ, СПД, устройства запуска и электропитания СПД.

Вольтамперная характеристика (ВАХ) СБ описывается выражением [1]

$$I_{сб} = I_{к.з} \left(1 - \exp \left(\left(\frac{U_{сб}}{U_{х.х}} - 1 \right) \times \ln \left(1 - \frac{I_{опт}}{I_{к.з}} \right) / \left(\frac{U_{опт}}{U_{х.х}} - 1 \right) \right) \right), \quad (1)$$

где $I_{к.з}$ – ток короткого замыкания СБ (при $U_{сб}=0$); $U_{сб}$ – мгновенное значение выходного напряжения; $U_{х.х}$ – максимальное выходное напряжение (при $I_{сб}=0$); $I_{опт}$ и $U_{опт}$ – оптимальные ток и напряжение, соответствующие максимальной мощности.

Канал разряда анод – катод СПД имеет сложную нелинейную ВАХ с участком отрицательного динамического сопротивления, что не позволяет описать ее одним математическим выражением. В общем виде ВАХ канала разряда СПД можно представить следующим образом [2]:

$$I_p = \begin{cases} 0, & \text{при } U_p < 70 \text{ В,} \\ \frac{eI_{тд}}{\dot{m}} \sqrt[4]{\frac{U_p - U_3}{U_{pi} - U_3}} \left(1 + V_{ex} \sqrt{\frac{M}{2e(U_p - U_3)}} \right), & \text{при } 70 \text{ В} < U_p < U_{pi}, \\ \frac{eI_{тд}}{\dot{m}} (1 + 0,00065 \cdot (U_p - U_{pi})) \times \\ \times \left(1 + V_{ex} \sqrt{\frac{M}{2e(U_p - U_3)}} \right), & \text{при } U_p > U_{pi}, \end{cases} \quad (2)$$

где e – заряд электрона ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл); $I_{тд}$ – ток термодросселя; $\dot{m}$ – секундный расход рабочего вещества; U_p – напряжение разряда; U_3 – напряжение, при котором появляется ток разряда; U_{pi} – напряжение разряда, соответствующее началу участка отрицательного сопротивления; V_{ex} – скорость плазменной струи на выходе сопла двигателя (около 6000 м/с); U_3 – переменная составляющая (пульсации) напряжения разряда.

Реализовать выражения (2) в модели аналитическим путем достаточно сложно, поэтому использован способ табличного описания функций, который в системе сквозного проектирования электронных устройств Orcad 9.2 реализован на базе блока G_table, представляющего собой модель источника тока, управляемого напряжением. Полученная ВАХ показана на рис. 1.

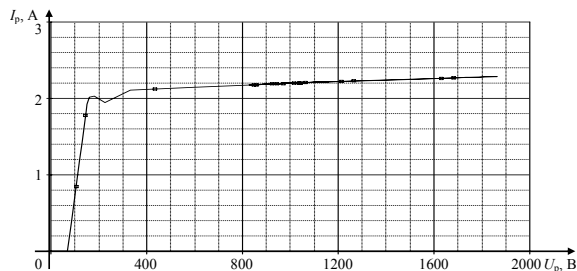


Рис. 1. ВАХ канала анод – катод

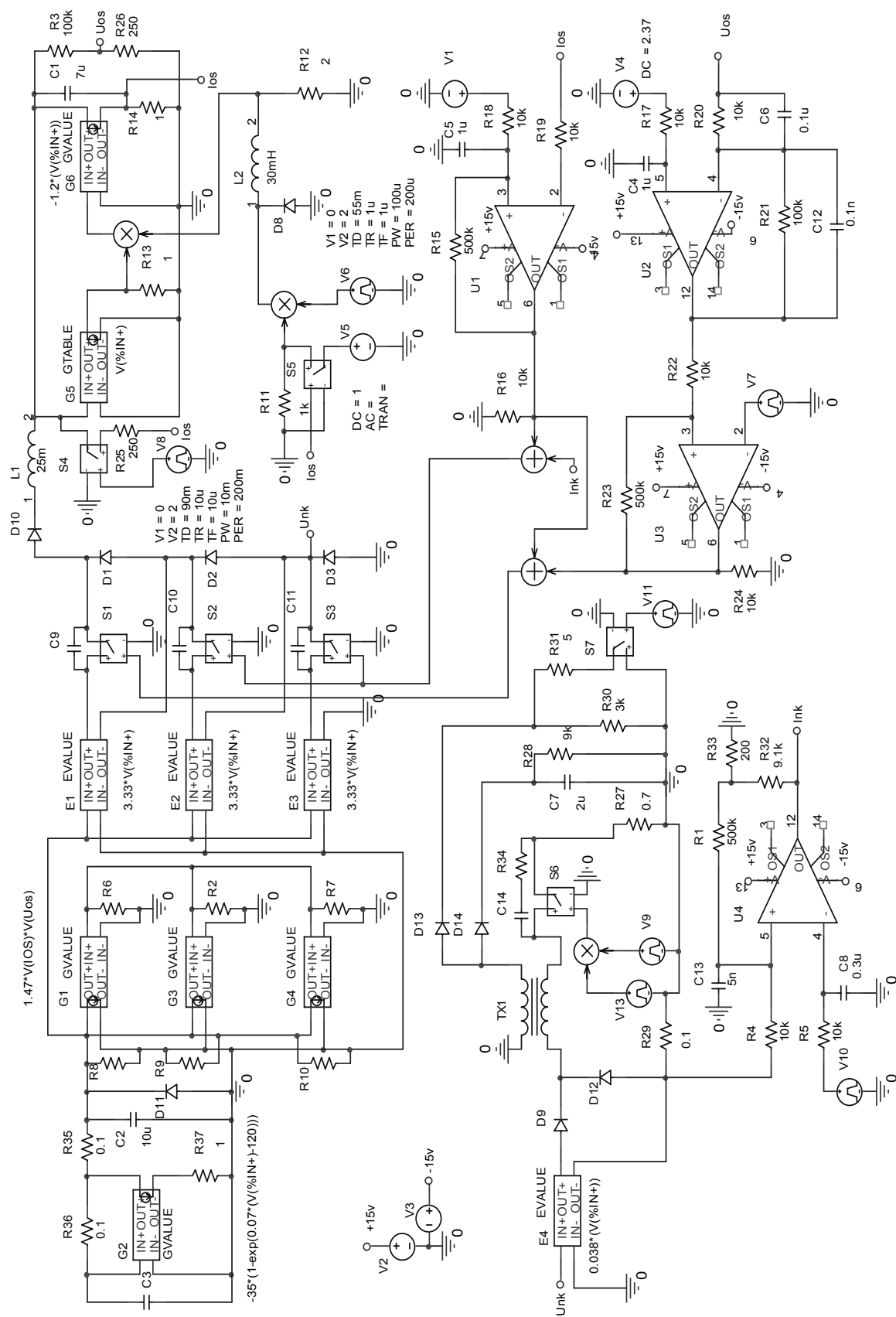


Рис. 2. Интегрированная модель каналов электропитания СПД

Модель устройства запуска и электропитания СПД с одной стороны должна быть связующим звеном между моделями СБ и СПД, а с другой — адекватно отражать реакцию схемы при воздействии на ее входы изменяющихся во времени сигналов. С учетом этого разработана интегрированная модель каналов электропитания анод — катод, нагревателя катода (НК), электрода поджига (ЭП) и термодросселя с замкнутыми обратными связями, рис. 2. Она выполнена на базе совмещенного устройства запуска и электропитания СПД [3]. Это реализовано тремя парами функциональных блоков: G1-E1, G3-E2 и G4-E3. Источники тока, управляемые напряжением G1, G3 и G4, являются нагрузкой для модели СБ (G2), а потому их задача — трансформировать ток нагрузки анод — катод в ток нагрузки СБ, откуда их ВАХ определяется как

$$I_{G1} = \frac{U_{E1} + U_{E2} + U_{E3}}{3U_{сб.хх}} (I_{G6} + I_{хх}) \approx \frac{U_{E1} + U_{E2} + U_{E3}}{3U_{сб.хх}} \cdot \eta \cdot \frac{U_{IOS}}{R_{14}} \cdot \frac{U_{OS} (R_3 + R_{26})}{R_{26} (U_{E1} + U_{E2} + U_{E3})},$$

где $I_{хх} = I_{R3} = I_{R26}$; $U_{сб.хх}$ — напряжение СБ на холостом ходу; η — КПД устройства запуска и электропитания (0,85...0,92); U_{IOS} — сигнал датчика тока разряда; U_{OS} — сигнал датчика напряжения анод — катод.

Зависимые источники E1–E3 выполняют роль трансформаторов постоянного напряжения с таким коэффициентом передачи, чтобы суммарное выходное напряжение было не менее номинального значения $U_{р.ном}$, тогда

$$U_{E1} = \frac{U_{р.ном}}{3U_{вх.мин}} U_{сб},$$

где $U_{р.ном}$ — номинальное напряжение разряда анод — катод; $U_{вх.мин}$ — минимальное входное напряжение.

Т.е. напряжение разряда есть сумма

$$U_p = U_{E1}\gamma_{S1} + U_{E2}\gamma_{S2} + U_{E3}\gamma_{S3},$$

где γ_{S1} , γ_{S2} , γ_{S3} — регулировочные характеристики ключей S1–S3 (0...1).

Канал стабилизации напряжения разряда выполнен как односторонний широтно-импульсно-модулируемый регулятор (U2, U3) с модуляцией переднего фронта и инерционным звеном (R20, C6) на основе динамических моделей операционных усилителей. Канал ограничения тока разряда выполнен в виде релейного регулятора на базе динамической модели быстродействующего операционного усилителя LT1037CS (U1). Поскольку изменение сопротивления НК имеет инерционный характер, а канал тока НК представляет собой электрическую цепь первого порядка (L_{TX1} , R_{27}), его система управления выполнена на базе релейного регулятора (U4). Замкнутая обратная связь (S5) по сопротивлению нагрузки (расходу рабочего вещества) позволяет получить более точное представление о режимах работы элементов схемы по сравнению с лабораторными исследованиями физических макетов на активной нагрузке.

Режимы работы устройства запуска и электропитания обусловлены принципом действия СПД, на основании чего составлен план исследования, который в модели реализован алгоритмом работы независимых источников (рис. 3).

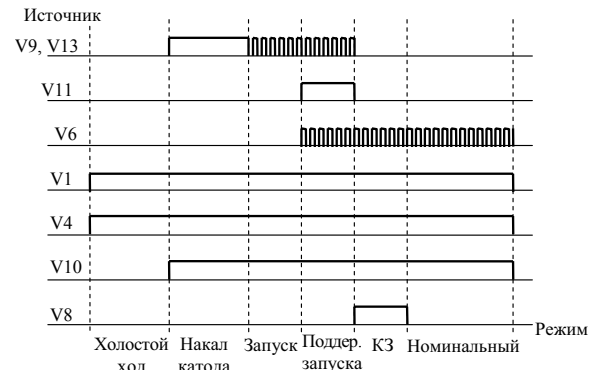


Рис. 3. Алгоритм работы модели при исследовании режимов работы СПД

В результате моделирования получены диаграммы токов и напряжений на всех элементах схемы, на основании которых сделан вывод о работоспособности схемы и происходящих процессах. На рис. 4 показаны диаграммы работы каналов электропитания СПД в различных режимах.

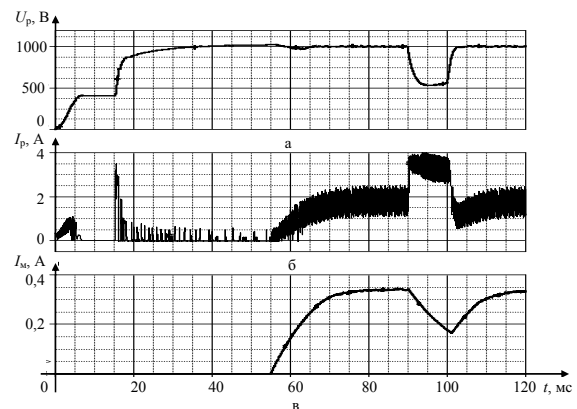


Рис. 4. Диаграммы работы модели: а) напряжение и б) ток канала анод — катод; в) расход рабочего вещества, пересчитанный в токовые единицы

На основании полученных диаграмм можно провести анализ устойчивости схемы по переходной характеристике. Для этого необходимо определить наибольшее перерегулирование в системе. Наибольшее перерегулирование напряжения разряда анод — катод и колебательный процесс (рис. 4, а) возникают в момент появления тока разряда (рис. 4, б) при подаче рабочего вещества в разрядную камеру (рис. 4, в). Величина перерегулирования Δh для этого случая

$$\Delta h = \frac{U_{\max} - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\% = \frac{1035 - 1000}{1000} \cdot 100\% = 3,5\%.$$

В соответствии с “гипотезой фильтра” система считается устойчивой (с запасом по фазе $\gamma_c > 30^\circ$), если перерегулирование в затухающем переходном процессе $\Delta h < 30\%$.

Разработанная модель позволяет имитировать все режимы работы устройства запуска и электропитания СПД на базе совмещенного преобразователя, а также моделировать различные варианты запуска двигателя и работу различных типов термодросселей. Модель разработана с учетом нелинейности ВАХ источника питания (СБ) и участка отрицатель-

ного динамического сопротивления нагрузки (канал разряда анод — катод СПД). Замкнутая обратная связь по сопротивлению нагрузки (расходу рабочего вещества) позволяет получить более точное представление о режимах работы элементов схемы по сравнению с лабораторными исследованиями физических макетов при работе на активную нагрузку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернышев А.И., Казанцев Ю.М., Поляков С.А., Лекарев А.Ф. Способ стабилизации выходного напряжения системы электропитания КА // Третий Сибирский Междунар. авиа-космический салон САКС 2004: Сб. докл. Междунар. научно-практ. конф. — Красноярск, 2004. — С. 43–48.
2. Морозов А.И. Физические основы космических электрореактивных двигателей. Т. 1. Элементы динамики потоков ЭРД. — М.: Атомиздат, 1978. — 328 с.
3. Пат. 2265135 РФ. МПК⁷ F03N 1/00. Устройство запуска и электропитания электрореактивного плазменного двигателя / М.В. Михайлов, Н.М. Катаонов. Заявлено 14.04.2003; Опубл. 27.11.2005, Бюл. № 33.

УДК 629.783:5233+519.7+62-69

БАЗОВЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ Е-СЕТЕВОЙ МОДЕЛИ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Г.П. Цапко, С.Г. Цапко, Д.В.Тараканов*

Томский политехнический университет
*Сургутский государственный университет
E-mail: serg@aic.ru

Раскрыты методологические основы построения динамических моделей гибридных систем с использованием принципов «блочного» моделирования на базе Е-сетевого формализма. Представленная методика основана на использовании механизмов иерархического взаимодействия элементов динамической модели. Показаны принципы организации Е-сетевых иерархических схем с использованием жестких и гибких структур. Указан механизм взаимодействия статических и динамических компонентов.

В настоящее время происходит существенное усложнение автоматизированных систем управления различными технологическими процессами. Это предъявляет новые, более жесткие требования к подготовке обслуживающего персонала данных систем. Полноценное использование многофункциональных компьютерных тренажеров (МКТ) возможно только в том случае, если его программное обеспечение способно функционировать в реальном масштабе времени или ускоряя моделируемый процесс.

Для решения данной проблемы необходимо выработать общие подходы в организации Е-сетевой [1] аналитико-имитационной модели (АИМ).

Важным вопросом в построении аналитико-имитационной модели (АИМ) исследуемой системы является выработка общих подходов в организации Е-сетевой модели. Методология построения АИМ сложных систем базируется на объектном подходе к организации исследуемой модели и состоит из следующих основополагающих позиций:

- 1) любая модель представляет собой совокупность однонаправленных объектов (в дальнейшем используется термин-компонент *Comp*), взаимодействующих между собой, что позволяет реализовывать причинно-следственный подход в построении модели;

- 2) компоненты модели выбираются с учетом минимального числа взаимосвязей между компонентами модели и минимальным уровнем взаимодействия (т.е. интенсивностью обмена данными) между компонентами;
- 3) обмен данными происходит с помощью каналов связи;
- 4) компоненты модели строятся по иерархическому принципу;
- 5) в модели может выполняться несколько независимых друг от друга процессов, т.е. компоненты могут функционировать параллельно и независимо друг от друга;
- 6) с компонентами модели могут ассоциироваться как конкретные технические объекты системы и ее элементы, так и абстрактные математические объекты, например операторы преобразования.

АИМ исследуемой технической системы Σ_0 представляется как объединение компонент с определенной взаимосвязью. Количество компонент модели определяется режимом работы МКТ и степенью детализации системы. Каждая компонента модели технической системы, реализованная на Е-сетевом имитационном аппарате, может быть представлена иерархической структурой «вход — состояние — выход». Функционирова-