

# КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

УДК 629.7

## МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА, ВКЛЮЧАЮЩАЯ УСТРОЙСТВО ЗАПУСКА И ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ, СОЛНЕЧНУЮ БАТАРЕЮ И ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ ИМИТАТОР ТЯГОВОГО МОДУЛЯ

В.П. Ходненко, А.В. Хромов  
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)  
М.В. Михайлов  
(ОАО «НПЦ «ПОЛЮС»)  
В.А. Лесневский  
(ФГУП «ОКБ «ФАКЕЛ»)  
А.В. Румянцев  
(РГУ им. И. Канта)

*Рассматривается модель системы электроснабжения космического аппарата (КА), включающая электродинамический имитатор тягового модуля (ЭДИТМ) с участком отрицательного динамического сопротивления вольт-амперной характеристикой (ВАХ) канала анод – катод, солнечные батареи с нелинейной ВАХ и систему электропитания. Реализован алгоритм функционирования электродинамического имитатора в различных режимах работы тягового модуля. С помощью полученных диаграмм определено наибольшее перерегулирование в системе с четырьмя замкнутыми обратными связями, и на основании гипотезы фильтра сделан вывод о ее устойчивости. Предложенная модель позволяет имитировать все режимы работы системы электропитания, а также моделировать с помощью ЭДИТМ различные варианты запуска тягового модуля и работу различных типов термодросселей.*

**Ключевые слова:** система электроснабжения, устройство запуска и электропитания, солнечная батарея, электродинамический имитатор тягового модуля, стационарный плазменный двигатель.

В ФГУП «НПП ВНИИЭМ» разработан малый КА дистанционного зондирования земли «Канопус-В». Структурная схема его системы энергоснабжения (СЭС) приведена на рис. 1. В СЭС широко применено горячее резервирование. Первичным источником энергии является солнечная батарея (СБ), которая разделена на 18 секций. Каждая секция СБ связана с модулем зарядки аккумуляторной батареи (АБ), обеспечивающим распределение электрической мощности, вырабатываемой СБ на освещенном участке витка. Модули зарядки батареи объединены в блоки и соединены с АБ через диоды. Аккумуляторная батарея представляет собой 52 сборки по 8 аккумуляторов в каждой. Модуль коммутации обеспечивает включение СЭС при отделении КА от ракеты-носителя. Распределением электрической мощности управляет блок распределения питания (БРП) посредством коммутации ключей питания бортовой аппаратуры. Телекомандная система (с блоком разовых команд) и корректирующая двигательная установка (КДУ) на основе стационарных плазменных двигателей подключены непосредственно к выходу системы энергоснабжения. Тяговый модуль (ТМ) на базе стационарного плазменного двигателя (СПД) относится к одному из наиболее распространенных типов тяговых устройств, которые применяются уже более 20 лет, и состоит из СПД и модуля газорас-

пределения (МГР). Основная характеристика подобного рода двигателей – тяга, принцип создания которой базируется на взаимодействии заряженных частиц плазмы с взаимно перпендикулярными продольным электрическим и поперечным магнитным полями, которые формируются напряжением разряда анод – катод (А – К) и током через магнитную катушку. Особенности тягового модуля как объекта электропитания являются значительная мощность потребления от первичного источника (солнечной батареи) и многоканальность потребителей энергии. Основные элементы электропитания СПД – это канал разряда А – К, нагреватель катода (НК), электрод поджига (ЭП), магнитная катушка (МК) и термодроссель (ТД) (рис. 2). Блок хранения (БХК) и блок подачи ксенона (БПК) предназначены для подачи в тяговый модуль рабочего тела.

В силу большой мощности потребления электрической энергии предполагается включать КДУ только на освещенных участках витка – во время максимального энергоприхода. При этом электрическая энергия от СБ непосредственно поступает на вход системы преобразования и управления КДУ. Следовательно, модель системы электроснабжения КА должна включать модели СБ, электродинамического имитатора тягового модуля (ЭДИТМ) и устройства запуска и электропитания (УЗЭП).

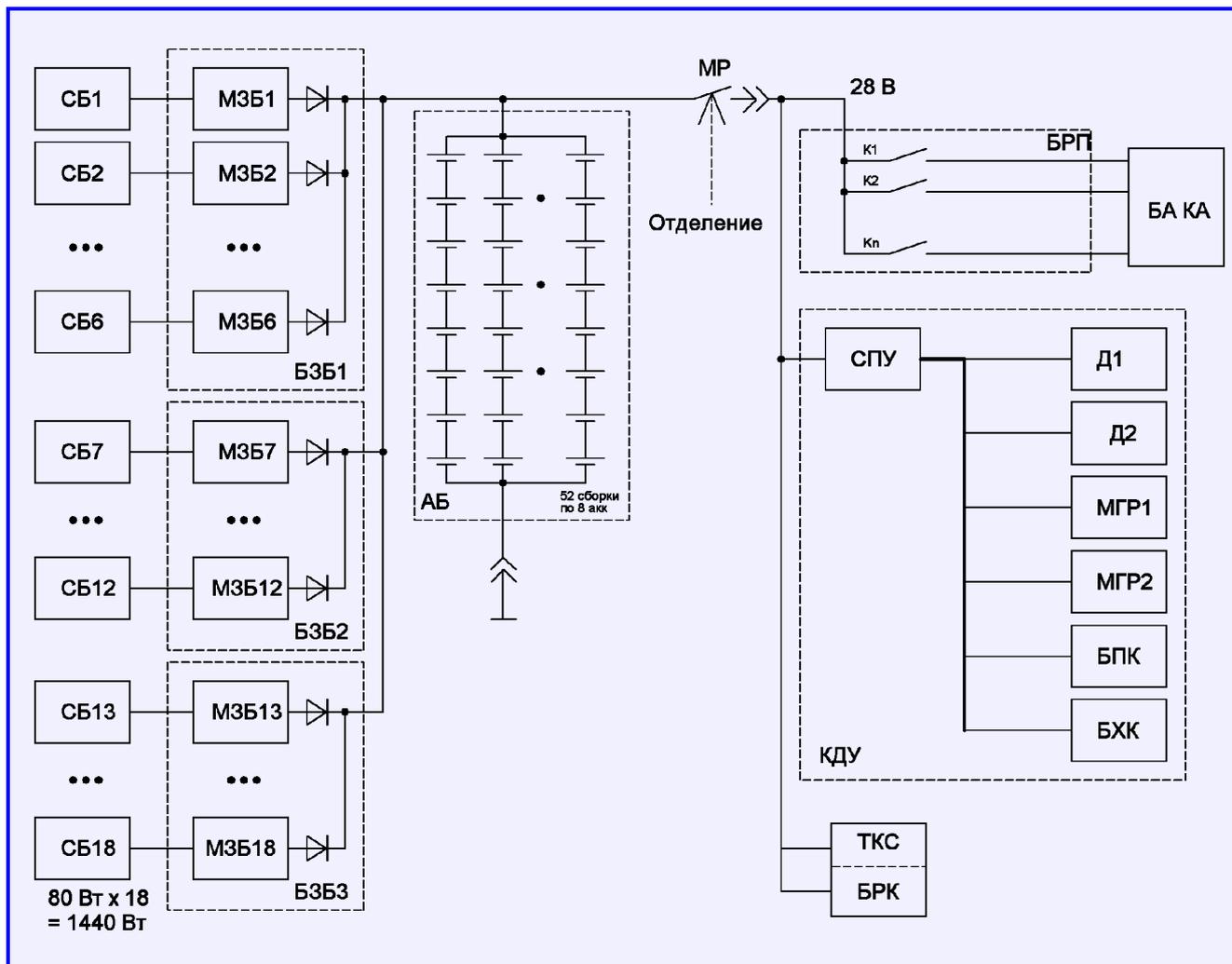


Рис. 1. Структурная схема СЭС КА «Канопус-В»: БЗБ – блок зарядки батарей; МЗБ – модуль зарядки батарей; МР – реле включения СЭС; БА КА – бортовая аппаратура КА; К1...К<sub>n</sub> – электронные ключи; ТКС – телекомандная система; БРК – блок разовых команд; СПУ – система преобразования и управления; Д1, Д2 – стационарные плазменные двигатели; МГР1, МГР2 – модули газораспределения

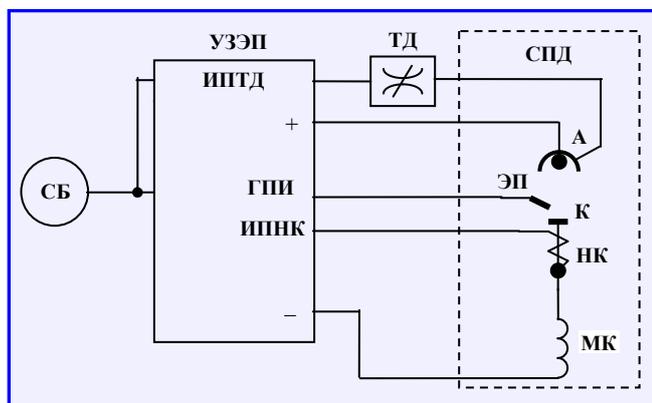


Рис. 2. Структурная схема электропитания основных элементов СПД: ИПТД – источник питания термодресселя; ИПР – источник питания разряда; ГПИ – генератор поджигающих импульсов; ИПНК – источник питания нагревателя катода

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) СБ описывается выражением [1]

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

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

Канал разряда А – К 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]:

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

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 8500 – 9000 м/с);  $\wedge U_3$  – 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. 3.

ЭДИТМ (рис. 4) используется в качестве нагрузки, имитирующей работу СПД и МГР. Работа ЭДИТМ в достаточной мере приближается к работе СПД [3].

Электродинамический имитатор состоит из источника питания (ИП), блока имитатора нагревате-

лей катодов-компенсаторов (БИНК), блока имитатора поджигного разряда (БИПЭ), блока имитации разрядного промежутка (БИРП), блока имитатора магнитной системы (БИМС) и блока имитатора модуля газораспределения (БИМГР).

Электропитание блоков ЭДИТМ осуществляется от модели устройства запуска и электропитания ТМ через встроенный источник питания.

В состав СПД входят два плазменных катода-компенсатора, содержащих нагреватели, предназначенные для стартового разогрева. БИНК моделирует их сопротивление, которое увеличивается в несколько раз по мере разогрева. Предусмотрена возможность ручной подстройки сопротивления нагревателей.

БИПЭ воспроизводит поджигной промежуток плазменного катода-компенсатора. Он имитирует как предпробойное состояние, так и последующее развитие рабочего процесса. Для работы БИПЭ необходимо наличие: тока БИНК; напряжения на имитаторе клапанов МГР; наличие импульсов поджигного напряжения на БИПЭ. При невыполнении любого из этих условий имитация включения СПД не реализуется.

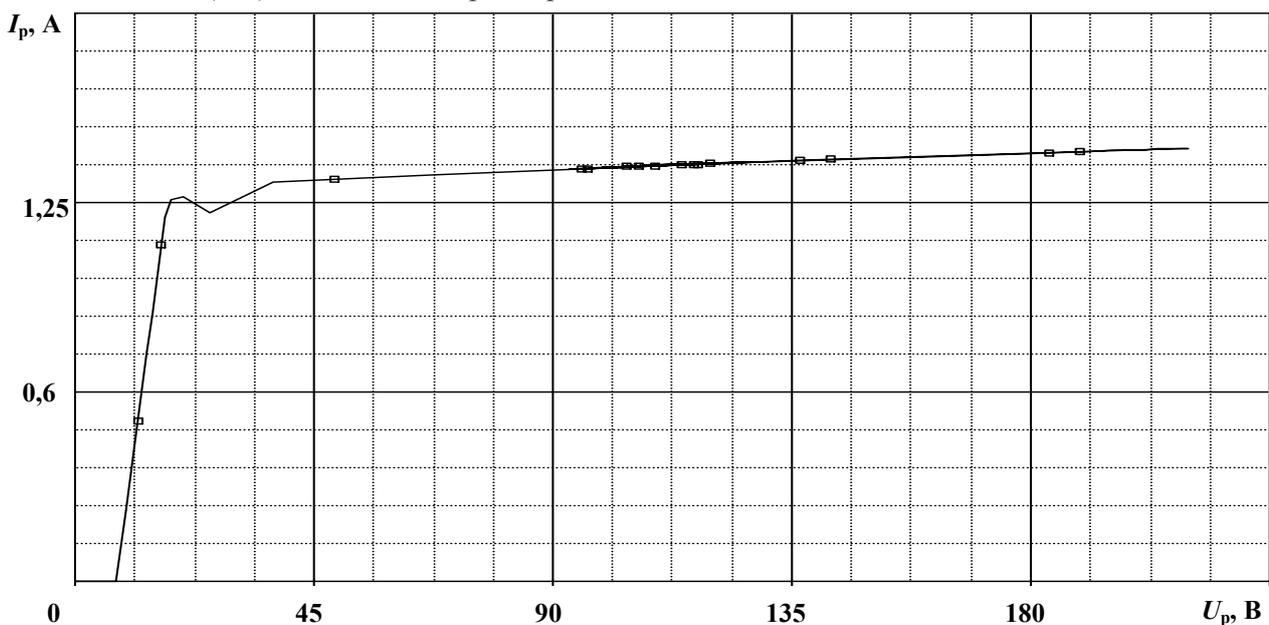


Рис. 3. ВАХ канала разряда анод – катод

Блок имитации разрядного промежутка воспроизводит колебания разрядного тока СПД. Шумовой характер и частотный спектр колебаний разрядного тока воспроизводятся с помощью генератора шума (ГШ) и соответствуют значениям, характерным при реальной работе двигателя. Амплитуда колебаний тока в широком диапазоне может изменяться ступенчато. Если амплитуда токовых колебаний будет превышать величину постоянной составляющей тока, то возможно самопроизвольное выключение БИРП, что соответствует имитации самопогасания разряда в СПД. В блоке для измерения фактического значения тока предусмотрен гальванически изолированный датчик.

Спецификой запуска двигателя являются кратковременные униполярные затухающие броски разрядного тока, амплитуда которых может в несколько раз превышать его номинальный уровень. Кроме того, запуск сопровождается скачкообразными изменениями потенциалов катод – корпус. Часто в СПД для электропитания катушек намагничивания не используют специальный источник тока, а магнитное поле создается за счет пропускания по ним разрядного тока. Импеданс магнитной системы, включенной в разрядную цепь, оказывает существенное влияние на динамические характеристики двигателя. Блок имитатора магнитной системы имитирует импеданс штатной магнитной системы СПД.

МГР включает в себя электроклапаны и ТД, обеспечивающий регулирование расхода в магистрали подачи рабочего тела, за счет изменения протекающего по нему тока. Блок имитатора модуля газораспределения имитирует работу МГР, а именно:

- импеданса обмоток электроклапанов;
- функциональную зависимость между током ТД и величиной разрядного тока.

Поскольку рассмотренный ЭДИТМ достаточно сложен для реализации в среде Orcad 9.2, целесообразно использовать модель, имитирующую только ВАХ СПД.

Модель устройства запуска и электропитания ТМ, с одной стороны, должна быть связующим звеном между моделями СБ и ЭДИТМ, а с другой – адекватно отражать реакцию схемы при воздействии на ее входы изменяющихся во времени сигналов. С учетом этого была разработана интегрированная модель каналов электропитания ЭДИТМ (А – К, НК, ЭП и ТД) с замкнутыми обратными связями, которая показана на рис. 5. Она реализована тремя парами функциональных блоков: G1 и E1, G3 и E2, G4 и E3. Источники тока G1, G3 и G4, управляемые напряжением, являются нагрузкой для модели СБ (G2), которая реализует выражение (1), и поэтому их задача – трансформи-

ровать ток нагрузки А – К в ток нагрузки СБ. Отсюда их ВАХ определяется как

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

где  $I_{х.х} = I_{R3} = I_{R26}$ ;  $U_{СБ.х.х}$  – напряжение СБ на холостом ходу;  $\eta$  – КПД устройства запуска и электропитания (0,85...0,92);  $U_{IOS}$  – сигнал датчика тока разряда;  $U_{OS}$  – сигнал датчика напряжения А – К.

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

$$U_{E1} = (U_{р.ном} / 3U_{вх.мин}) U_{СБ}$$

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

Таким образом, напряжение разряда определяется выражением:

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

где  $\gamma_{S1}, \gamma_{S2}, \gamma_{S3}$  – регулировочные характеристики (0...1) ключей S1 – S3.

Полученное значение напряжения разряда поступает на вход модели канала А – К ЭДИТМ (G5), где с учетом ВАХ (см. рис. 3) определяется соответствующее значение тока, а затем, с учетом значения тока термодросселя R12, на выходе G6 находится итоговый ток разряда.

Канал стабилизации напряжения разряда выполнен как односторонний ШИМ-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 ( $L_{ТХ1}, R_{27}$ ), то его система управления выполнена на базе релейного регулятора (U4). Формирование поджигающих импульсов происходит путем кратковременного размыкания ключа S6 за счет энергии, накопленной в дросселе  $L_{ТХ1}$  [4] в момент протекания через него тока НК. Замкнутая обратная связь по сопротивлению нагрузки (току ТД) – важное достоинство предложенной модели по сравнению с имеющимися имитаторами ТМ.

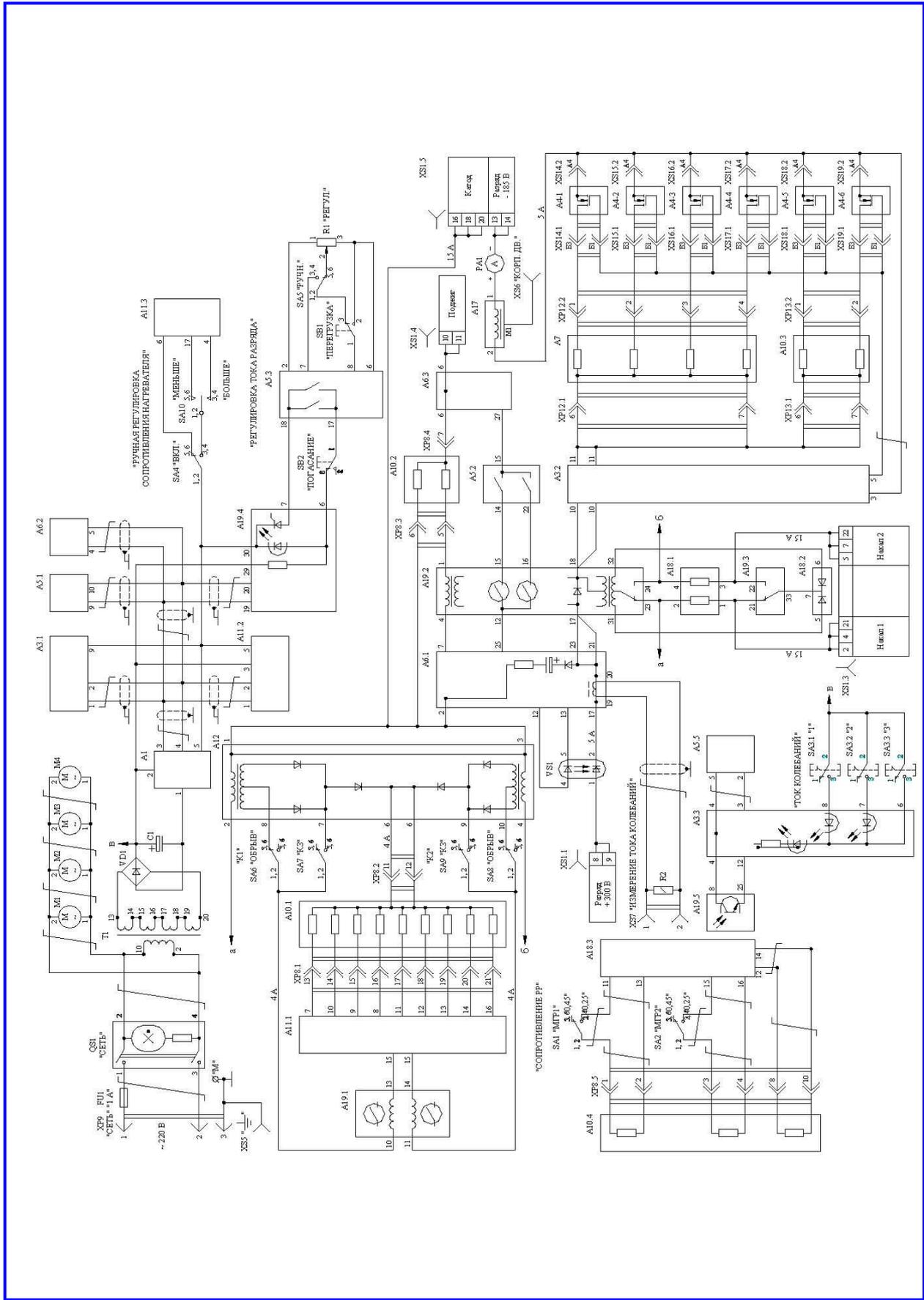


Рис. 4. Структурная схема электродинамического имитатора тягового модуля

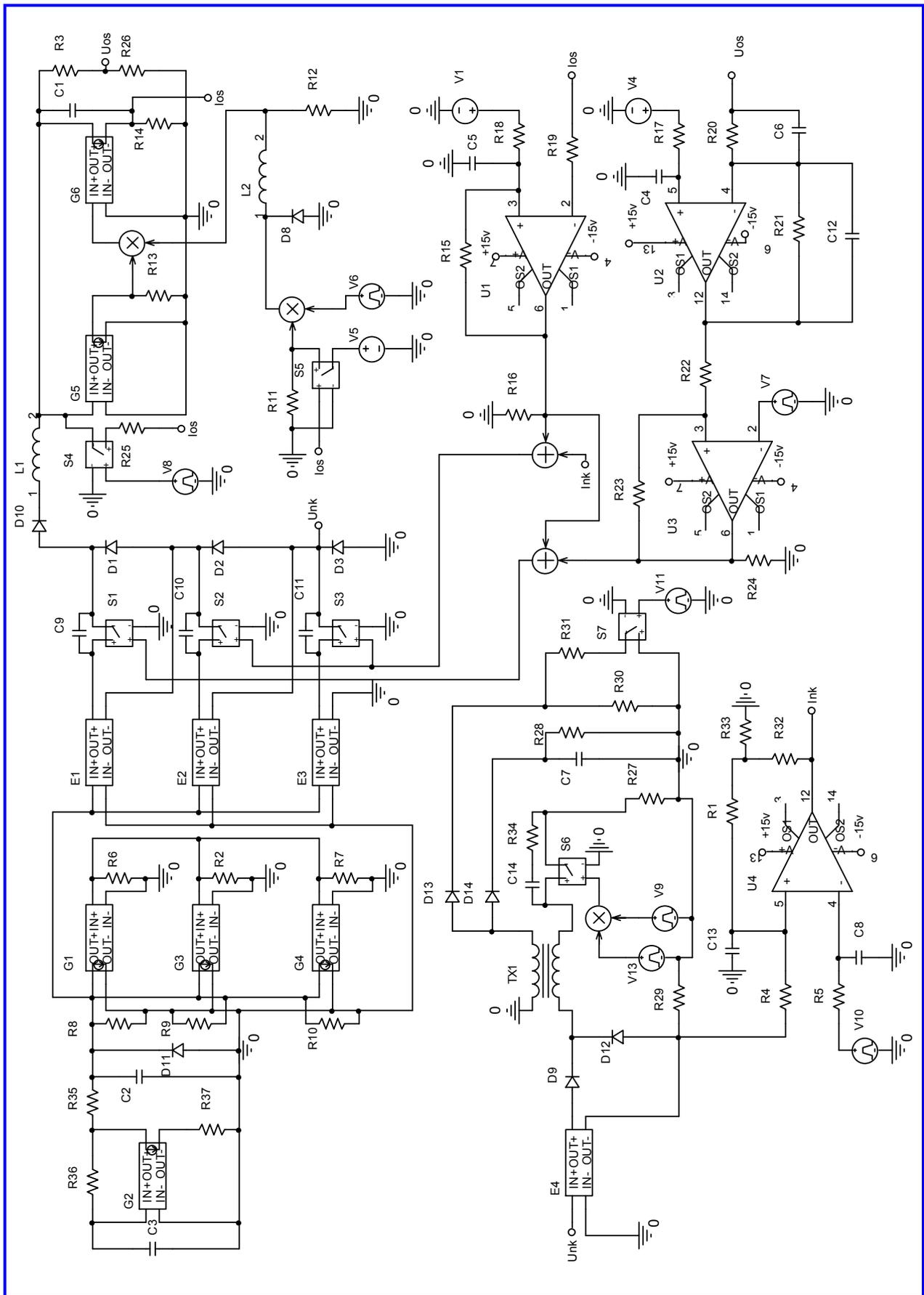


Рис. 5. Интегрированная модель каналов электропитания СПД

Режимы работы УЗЭП обусловлены принципом действия СПД, исходя из чего составлен план исследования, который в модели реализован алгоритмом работы источников напряжения (рис. 6). Функции этих источников следующие: V9 замыкает (разрывает) цепь тока НК; V13 задает частоту и длительность поджигающих импульсов; V11 задает низкое сопротивление в режиме поддержания запуска; V6 задает частоту работы ТД; V1 и V4 включают (выключают) каналы ограничения тока разряда и стабилизации напряжения А – К соответственно; V10 включает стабилизатор тока НК; V8 – задает перегрузку КЗ канала А – К.

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. 7 показаны диаграммы работы каналов электропитания ЭДИТМ в различных режимах.

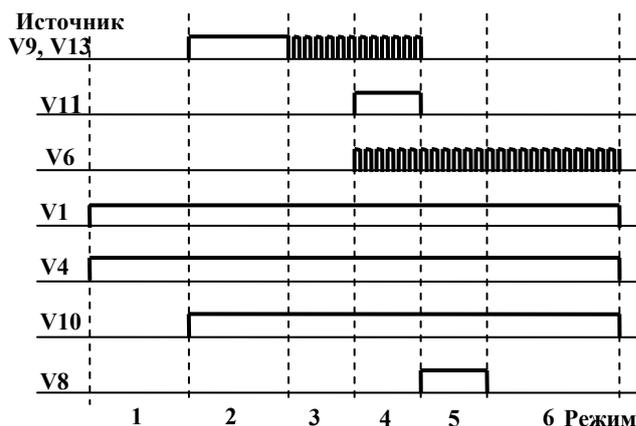


Рис. 6. Алгоритм работы модели при исследовании режимов работы СПД: 1 – холостой ход; 2 – накал катода; 3 – запуск; 4 – поддержание запуска; 5 – короткое замыкание (КЗ); 6 – номинальный режим

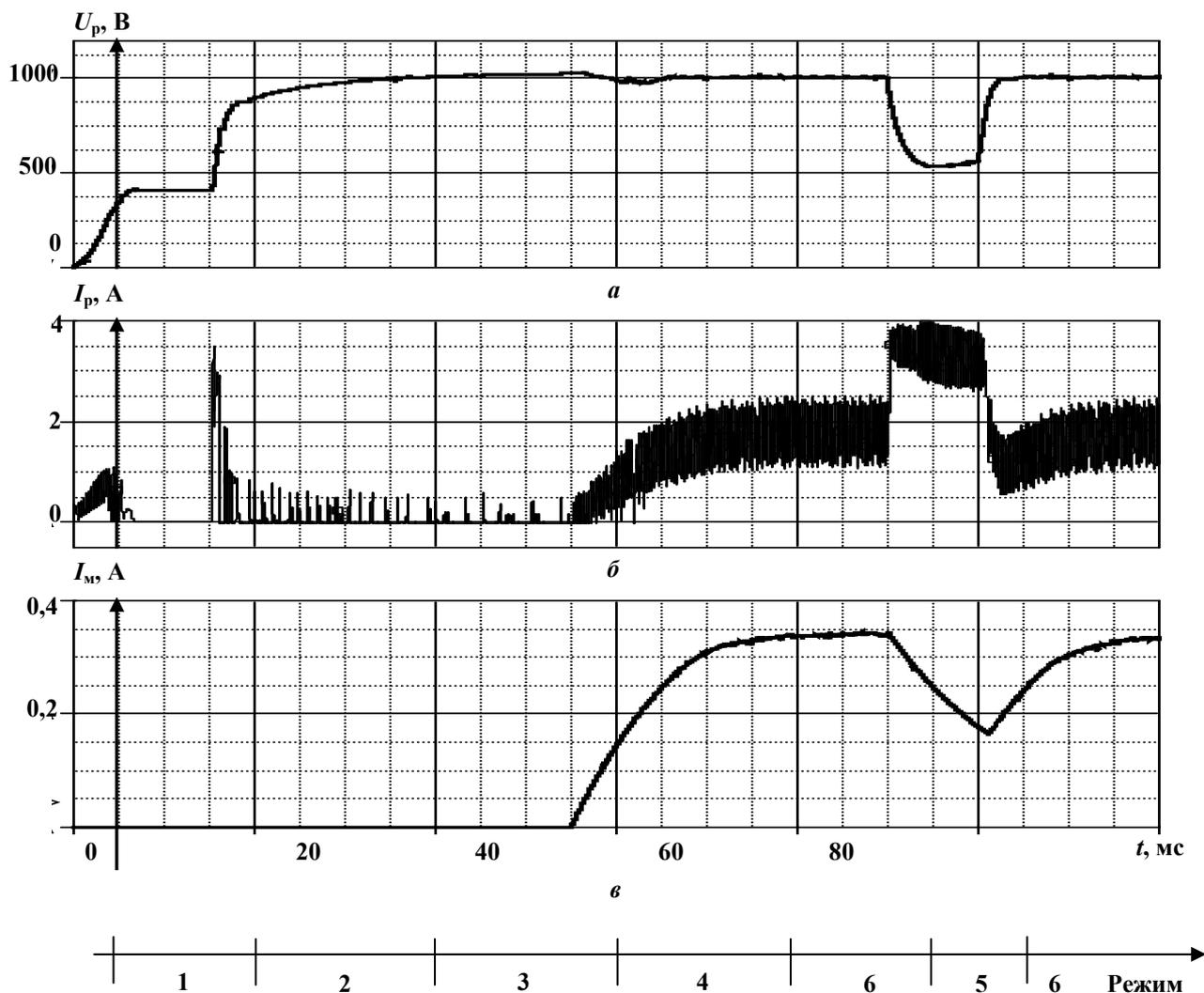


Рис. 7. Диаграммы работы модели: а – напряжение А – К; б – ток канала А – К; в – расход рабочего вещества, пересчитанный в токовые единицы

По полученным диаграммам проведен анализ устойчивости схемы по переходной характеристике. Для этого определено наибольшее значение перерегулирования в системе. Наибольшие перерегулирование напряжения разряда А – К и колебательный процесс (рис. 7, а) возникают в момент появления тока разряда (рис. 7, б) при подаче рабочего вещества в разрядную камеру (рис. 7, в). Значение перерегулирования  $\Delta h$  для этого случая

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

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

### Заключение

Разработана интегрированная модель системы электроснабжения КА, позволяющая имитировать все режимы работы устройства запуска и электропитания ЭДИТМ, а также моделировать

различные варианты запуска ТМ и работу различных типов ТД.

Модель разработана с учетом нелинейности ВАХ источника питания (СБ) и участка отрицательного динамического сопротивления нагрузки (канал разряда А – К СПД).

### Литература

1. Способ стабилизации выходного напряжения системы электропитания КА / А.И. Чернышев, Ю.М. Казанцев, С.А. Поляков [и др.] // 3-й Сибирский междунар. авиакосмический салон САКС 2004: Сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. – Красноярск, 2004. – С. 43–48.
2. Морозов А.И. Физические основы космических электроактивных двигателей. Т. 1. Элементы динамики потоков ЭРД / А.И. Морозов. – М.: Атомиздат, 1978. – 327 с.
3. Об оценке динамической точности имитаторов источников электроэнергии космических аппаратов / Р.В. Балакирев, А.С. Сидоров // Решетневские чтения: сб. научн. трудов. СибГАУ им. М.Ф. Решетнева. – Красноярск, 2005.
4. Пат. 2265135 РФ. МПК<sup>7</sup> F 03 H 1/00. Устройство запуска и электропитания электрореактивного плазменного двигателя / М.В. Михайлов, Н.М. Катасонов. Изобретения. Полезные модели. – 2005. – № 33.

Поступила в редакцию 26.05.2010

*Владимир Павлович Ходненко, д-р техн. наук, начальник лаборатории, т. 8 (495) 624-94-98.*

*Александр Викторович Хромов, аспирант, инженер, т. 8 (495) 607-25-35.*

*E-mail: vniiem@orc.ru.*

*Максим Валентинович Михайлов, канд. техн. наук, научный сотрудник, т. 8 (382) 256-05-55, e-mail: polus@online.tomsk.net.*

*Владимир Александрович Лесневский, аспирант, инженер-конструктор, т. 8 (4012) 55-69-60, e-mail: fakel@gazinter.net.*

*Альберт Владимирович Румянцев, канд. физ-мат. наук, доцент, т. 8 (4012) 53-37-88, e-mail: albert37@list.ru.*