

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОРЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Для повышения эффективности работы электрореактивных двигательных установок (ЭРДУ) со стационарными плазменными двигателями (СПД) как наиболее перспективным типом двигателей для применения в системах управления КА могут быть использованы различные методы. В работе [1] были изложены способы повышения надежности ЭРДУ, которые достигаются за счет оптимизации режима работы катода-компенсатора СПД и рационального выбора структуры резервирования. В настоящей статье рассмотрены следующие методы повышения эффективности работы ЭРДУ с СПД: улучшение пусковых и динамических характеристик, управление величиной тяги и использование устройств контроля и диагностики неисправностей.

Данные методы явились результатом исследований при создании систем питания и управления (СПУ) ЭРДУ для КА “Ресурс-О”.

Подготовка к пуску

Эффективность подготовки СПД к пуску определяется, в основном, характеристиками его катода-компенсатора (КК). КК располагается у среза кольцевой диэлектрической камеры СПД и как источник электронов служит для пуска двигателя с последующей нейтрализацией выходного ионного потока [2]. Известны два типа КК: импульсные (холодные) и термоэлектронные. Импульсный КК не требует подготовки СПД к пуску и обеспечивает рабочий ток эмиссии сразу же после подачи на него высокого напряжения, а термоэлектронный – только после предварительного прогрева его до рабочей температуры.

Несмотря на очевидные преимущества, импульсные КК, в отличие от термоэлектронных, пока не нашли штатного применения.

Термоэлектронный КК включает в себя стартовый нагреватель и таблетку (трубку) из гексаборида лантана, обеспечивающую при нагреве термоэлектронную эмиссию.

Подготовка СПД к пуску может быть обеспечена различными способами: прогревом КК в течение заданного интервала времени (время прогрева выбирается экспериментально для каждого типа

КК); прогревом КК до момента достижения им заданной температуры и, наконец, прогревом КК до момента достижения током эмиссии рабочего значения.

В настоящее время общепринятым способом подготовки СПД к пуску является первый способ, хотя при его использовании достаточно трудно обеспечить высокую надежность и большое число включений ЭРДУ ($\geq 10^6$).

Требование обеспечения высоких динамических характеристик ЭРДУ вынуждает использовать форсированный режим прогрева КК, при котором возникает опасность его недогрева или перегрева.

От указанного недостатка свободны второй и третий способы. Однако при втором способе на каждом из КК необходимо размещать свой датчик температуры.

Третий способ подготовки к пуску благодаря квадратичной зависимости тока эмиссии от температуры (см. формулу Ричардсона-Дешмэна) может оказаться более эффективным при одинаковой точности измерения тока эмиссии и температуры КК. Заметим, что в случае определения момента готовности СПД к пуску непосредственно по величине тока эмиссии никаких доработок подсистем ЭРДУ не потребуется. Кроме того, отпадает необходимость во временном устройстве.

Датчиком величины тока эмиссии КК может служить диод, образованный КК и электродом поджига СПД (анод) [3]. Чтобы анодный ток такого диода был пропорционален току эмиссии КК, необходимо обеспечить его работу в режиме насыщения так как ток электрода поджига будет являться функцией двух переменных величин: напряжения на электроде поджига и тока эмиссии КК. Для исключения дополнительной коммутации цепи электрода поджига и выхода из строя компаратора напряжения при подаче импульсов поджига между измерителем напряжения и электродом поджига может быть включен развязывающий диод, который для импульсов поджига оказывается включенным в непроводящем направлении.

В таком датчике сигнал равенства тока эмиссии КК заданному значению формируется компаратором, на один вход которого поступает опорное напряжение с делителем R2, R3, а на другой - разность напряжений стабилизированного источника питания и падения на резисторе R1 за счет анодного тока диода. Гальваническая развязка цепей системы питания и управления (СПУ) и СПД достигается за счет соответствующего устройства. Диод VD служит для защиты схемы датчика от воздействия импульсов поджига при пуске СПД. Следовательно, способ определения момента готовности СПД к пуску по величине тока эмиссии обеспечивает максимальную точность, не требует каких-либо доработок подсистем

ЭРДУ и не вызывает трудностей с точки зрения аппаратной реализации.

Стабилизация тяги

Для выполнения требуемого маневра КА необходимо приложить расчетный импульс, который может быть обеспечен либо включением ЭРДУ со стабилизированной тягой на расчетное время, либо сравнением результатов текущего интегрирования измеренных значений тяги нестабилизированного по тяге двигателя с расчетным импульсом и отключением ЭРДУ в момент их равенства.

Более эффективным является первый способ, так как аппаратная реализация второго способа связана с большими трудностями, и, в первую очередь, в связи с отсутствием надежных датчиков малой тяги. Другие же способы выполнения маневра КА, как правило, требуют дополнительно расхода энергии, запаса рабочего тела (р.т.) и количества включений ЭРДУ.

Для КА "Ресурс-О" уменьшение нестабильности тяги с 25 до 10 % снижает суммарное время проведения начальной коррекции в 1,2-1,35 раза. При этом количество сеансов радиоконтроля орбиты (РКО) и их продолжительность уменьшаются в 1,4 - 1,5 раза.

Для точной доводки параметров орбиты, и, в первую очередь, периода обращения КА к ЭРДУ систем коррекции орбиты предъявляются требования получения минимального значения единичного импульса тяги. Частота проведения коррекции поддержания при среднем индексе солнечной активности 150-200 Вт/м²·Гц, по оценкам, составляет 3,5 - 4 суток для 25 % нестабильности тяги. При уменьшении нестабильности тяги до 10 % частота проведения коррекции увеличивается до 10-18 суток. Периодичность проведения коррекции поддержания в интервале 22-25 суток требует нестабильности тяги двигателя не более 5 % (при среднем уровне солнечной активности ~ 150 Вт/м²·Гц [4]).

Необходимо отметить также, что только при указанных значениях нестабильности можно сохранить приемлемую периодичность измерения параметров орбиты (примерно 7 суток). Кроме того, только в этом случае может быть сохранен технологический цикл управления КА со стороны командно-измерительного комплекса без применения баллистического спецматобеспечения.

Как показали исследования точностных характеристик ориентации и стабилизации высокоорбитальных КА типа "Электро" максимальная угловая скорость вращения аппарата вокруг центра масс в момент разгрузки двигателей-маховиков $\max(\dot{\varphi}/t)$ пропорцио-

нальна величине тяги двигателя и сумме $K_F + K_{и}$, где $K_F = \delta F/F$ - коэффициент нестабильности величины тяги, а $K_{и}$ - точность значения момента инерции маховика. Для КА "Электро" №1 сохранение точности стабилизации ($\leq 0,001$ %/с) обеспечивается при ограничении тяги величиной (0,05 - 0,07)Н и $K_F \leq 10\%$ [5].

Что касается перспективных КА гидрометеорологического назначения, то для управления ими может потребоваться еще более высокая точность стабилизации тяги (до 3%).

Нестабильность тяги СПД может достигать величины $\geq 20\%$ от номинального значения и зависит от параметров питания следующим образом:

$$F = (2U_a I_a^2 A \eta_T)^{1/2}, \quad (1)$$

где U_a и I_a - анодное напряжение и анодный ток двигателя; A - величина, обратная крутизне изменения анодного тока от секундного расхода р.т., равная dm/dI_a ; η_T - тяговый коэффициент полезного действия СПД.

Для практических целей точность определения тяги из (1) является достаточной.

Выражая нестабильность тяги СПД через нестабильность тока и напряжения источника питания анода путем нахождения полного дифференциала функции $f(U_a, I_a)$ и, приближенно считая A и η_T величинами постоянными, в рабочем диапазоне изменения U_a и I_a , получим:

$$dF = A \eta_T (I_a^2 dU_a + 2U_a I_a dI_a) (2U_a I_a^2 A \eta_T)^{1/2}. \quad (2)$$

Разделив выражение (2) на (1) и перейдя от дифференциалов к конечным приращениям при условии малости последних, можно выразить относительную нестабильность тяги СПД следующим образом:

$$\Delta F/F = 1/2 (\Delta U_a/U_a + 2\Delta I_a/I_a). \quad (3)$$

Следовательно, в соответствии с выражением (3) для стабилизации тяги СПД необходимо стабилизировать ток и напряжение источника питания анода. Поскольку ток анода СПД пропорционален секундному расходу р.т. m , то для стабилизации тяги достаточно поддерживать заданное значение анодного тока за счет изменения секундного расхода р.т.

Анализ показал, что при приемлемых энергетических и массогабаритных показателях источника питания анода можно обеспечить долговременную стабильность анодного напряжения во всех условиях эксплуатации не хуже 3%. Тогда при максимально допустимой нестабильности тяги СПД для ЭРДУ КА "Ресурс-О", равной

5%, точность стабилизации анодного тока в соответствии с (3) должна быть не хуже 2%.

Стабилизацию анодного тока СПД можно обеспечить за счет регулирования секундного расхода р.т. m по сигналам датчика анодного тока.

Для регулирования секундного расхода обычно используется термодрессель, представляющий собой металлическую трубку-капилляр, нагреваемую электрическим током. Изменяя температуру металлической трубки (мощность, подводимую к нагревателю), можно изменять секундный расход р.т.

Для ЭРДУ, предназначенной для использования в системе коррекции КА "Ресурс-О", был разработан регулятор секундного расхода р.т.

Использование импульсного регулятора секундного расхода рабочего тела позволило стабилизировать анодный ток двигателя с точностью не хуже 2%, что дало возможность обеспечить нестабильность тяги ЭРДУ на уровне 5%.

Управление величиной тяги

Как показано в [6], для систем управления КА эффективным является использование двигателей с регулируемой тягой.

Управление величиной тяги СПД, может быть обеспечено либо за счет изменения секундного расхода рабочего тела m , либо за счет изменения скорости его истечения. При управлении одним из перечисленных параметров - второй должен быть стабилизирован с достаточной точностью. Ввиду отсутствия датчиков малых расходов осуществить стабилизацию m практически невозможно, поэтому управлять величиной тяги СПД целесообразно за счет изменения расхода массы р.т., а величина анодного напряжения при этом должна быть стабилизирована.

Использование устройств контроля и диагностики

В работе СПД могут иметь место аномальные переходные режимы, вызываемые различными причинами [7]. Так, например, при увеличении расхода р.т. сверх некоторого критического значения, когда число ионов, прошедших зону ускорения, меньше количества атомов ксенона, поступивших в зону ионизации, проводимость плазмы резко возрастает и возникает сильноточный газовый разряд. Такой режим работы СПД может быть вызван повышенным

давлением в магистрали подачи р.т. или отказом термодросселя. Мощный дуговой разряд может иметь место при включении СПД до момента установления тока в катушках электромагнита, что наблюдалось при совместных испытаниях макета СПУ с ЭРДУ.

При аномальных переходных режимах СПД его анодный ток может во много раз превышать рабочее значение. Следовательно, аномальные режимы работы СПД могут приводить к недопустимым перегрузкам источника питания анода.

Наиболее простым и эффективным способом защиты источников питания является их защита по максимальному току коллектора силовых транзисторов.

Для обеспечения большого числа включений ЭРДУ СПУ должна иметь в своем составе блок автоматической диагностики, обеспечивающий в зависимости от характера неисправности, отключение и повторное включения напряжения (без режима длительного перегрева КК), переключения на резерв или отключения ЭРДУ. Из-за аномальных переходных режимов СПД и длительных переходных процессов в системе хранения и подачи р.т. простейшее устройство обнаружения отказов не обеспечит получение достоверной информации о состоянии контролируемых блоков (узлов). Поэтому в СПУ целесообразно иметь общее устройство, обеспечивающее диагностирование характера отклонения параметров блока (узла) от нормы.

Диагностирование характера отклонений (сбой, переходный процесс, отказ) осложняется недопустимой перегрузкой источников питания при аномальных режимах работы СПД и срабатыванием их внутренней защиты по току, а также значительным различием длительности переходных процессов в различных блоках ЭРДУ (от долей миллисекунд до минуты) и их зависимостью от режима работы.

Это требует дополнительного диагностирования характера отклонений методом проб (отключений и повторных включений СПД), а также по времени существования отклонения.

Обобщенная структурная схема устройства диагностики неисправностей ЭРДУ представлена на рисунке. Она включает: узел формирования сигналов датчиков контроля режимов работы и состояний системы (УФС), узел формирования сигнала отказа системы хранения и подачи рабочего тела (УФХ), счетчик числа повторных включений (СПВ), узел формирования сигнала отказа двигателей (УФД), узел выбора резерва и формирование сигналов его включения (УФР) и узел формирования команд управления включением резерва (УФК). На рисунке также показаны связи узлов устройства диагностики неисправностей системы с устройством программно-временного управления (УПВУ) подготовкой и пуском СПД.



Обобщенная структурная схема устройства диагностики неисправностей ЭРДУ

Практически все выше рассмотренные способы повышения эффективности работы ЭРДУ использованы при разработке перспективных КА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Способы увеличения надежности работы ЭРДУ / Е. В. Леферов, Л. Т. Свиридов, А. В. Семирякин, В. П. Ходненко и др. М.: Труды ВНИИЭМ. Т. 83. 1987.
2. Разработка стационарного плазменного двигателя (СПД) и его испытания на ИСЗ "Метеор" / Л. И. Морозов, Ю. В. Трифонов, Ю. П. Рылов, В. П. Ходненко и др. М.: Космические исследования. Т. XII. Вып. 3. 1974.
3. Авторское свидетельство 228618 (СССР). Способ пуска СПД /Л. Т. Свиридов, А. В. Семирякин, В. П. Ходненко. 1985.

4. Оценка возможной продолжительности начальной коррекции орбиты КА подсистемы "Ресурс-О" /Я. В. Дубровинский, К. В. Журавлев и др. М.: Научно-технический отчет. ВНИИЭМ. ОАБ.120.466. 1980.
5. Трифонов Ю. В. Методология создания космических аппаратов геофизического наблюдения: М.: Дис. докт. техн. наук. 1984.
6. Ходненко В. П. Электрореактивные двигательные установки в системах управления космических аппаратов дистанционного зондирования Земли /См. наст. том.
7. Глибицкий М. М. Системы питания и управления электрическими ракетными двигателями. М.: Машиностроение. 1981.