

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА
МЕТОДАМИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА**

Морозов Е.А.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Морозов А..Н.

Сибирский федеральный университет, г.Красноярск

1. Постановка задачи исследования.

При проектировании системы электропитания (СЭП) космического аппарата (КА) важное место занимает выбор рациональной структурной схемы. Она в значительной мере определяет энергетическую эффективность использования источников тока, режимы их работы и оказывает влияние на выбор номиналов и типоразмеров основных узлов системы.

Все разнообразие структурных схем СЭП неизбежно содержит первичный источник электроэнергии (солнечную батарею или иной тип источника электроэнергии), аккумуляторную батарею и энергопреобразовательное оборудование, которые в дальнейшем соединяются по той или иной структурной схеме и образуют систему электропитания, которую необходимо исследовать.

Основными недостатками, ограничивающими применение методов планирования эксперимента (ПЭ), является то, что коэффициенты регрессии не имеют физического смысла. Это обычно действительно так. Однако при моделировании СЭП КА надо понимать и то, что разработчики и изготовители СЭП КА обычно сами не создают ни источники электроэнергии, ни энергопреобразовательное оборудование, а используют готовые изделия или блоки, которые уже далее объединяют в ту или иную систему, сбалансированную по той или иной структурной схеме. Для исследования уже этих систем вид мат.моделей каждого блока или устройства значения не имеет, т.к. разработчики СЭП КА не могут изменять ни физические характеристики, ни конструктивные параметры, ни физико-химические процессы в них. Однако мат.модели таких элементов СЭП должны быть в распоряжении разработчиков СЭП КА для моделирования и исследования уже системы в целом.

С этой точки зрения применение методов ПЭ как для идентификации элементов и функциональных узлов СЭП КА, так и для моделирования многих характеристик СЭП в целом, является не только оправданным, но и целесообразным.

Методы планирования эксперимента позволяют не только оптимизировать соотношение максимальной точности и минимальной стоимости получаемых мат.моделей, но и получать мат. модели блоков СЭП быстро, по унифицированной единообразной методике, формализуя те или иные физические факторы.

Применительно к поставленной задаче разработки методики параметрической идентификации элементов и функциональных узлов СЭП КА разработана в качестве примера методика идентификации одного из наиболее сложных для моделирования элементов СЭП а именно – бортовой аккумуляторной батареи. Идентификация любых других элементов и функциональных узлов СЭП КА может быть проведена аналогичным образом после формализации факторов и перехода к фиктивным переменным, как этого требует метод ПЭ.

Практически все элементы и блоки СЭП КА существенно нелинейны в широкой области варьирования переменных, что характерно для практики. Традиционный для многих теоретических подходов метод линеаризации объектов и систем в точке при малых приращениях аргумента для задач параметрической идентификации элементов и функциональных узлов СЭП КА можно считать неприемлемым. Линейные планы

полного или дробного факторного эксперимента для этих задач также мало эффективны из-за невысокой точности аппроксимации нелинейных объектов.

Для повышения точности математического описания нелинейных объектов можно применить ортогональные матрицы планирования. В данном случае использованы ортогональные матрицы планирования третьего порядка.

Уравнение регрессии третьего порядка имеет вид:

$$Y = B_0 + \sum_{i=1}^n B_i X_i + \sum_{i<j}^n B_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^n B_{ii} X_i^2 + \sum_{i<j<k}^n B_{ijk} X_i X_j X_k + \sum_{i=1}^n B_{iii} X_i^3 \quad (1.)$$

где Y – функция отклика; X_i – независимые переменные; B – коэффициенты уравнения регрессии; n – число независимых переменных (первичных параметров или факторов).

Авторами разработана методики составления плана эксперимента и обработки результатов применительно к особенностям моделирования химических источников тока (ХИТ) – наиболее нелинейных элементов СЭП. Разработана и изготовлена экспериментальная установка для исследования текущей мощности тепловыделения в ХИТ.

Выходные характеристики ХИТ определяются совокупностью многих факторов. Существенными эксплуатационными параметрами, предопределяющими работу СЭС КА, являются напряжение и тепловыделение аккумуляторных батарей.

Целью проводимых экспериментов по моделированию характеристик ХИТ является получение зависимостей мощности тепловыделения на заряде N_3^T и разряда N_p^T , зарядного U_3 и разрядного U_p напряжения в зависимости от наиболее значимых факторов: температуры ХИТ T_a , токов заряда I_3 или разряда I_p и текущей зарядной Q_3 или разрядной емкости Q_p , т.е.

$$\begin{cases} N_3^T = f(T_a; I_3; Q_3) \\ U_3 = f(T_a; I_3; Q_3) \end{cases} \quad \text{и} \quad \begin{cases} N_p^T = f(T_a; I_p; Q_p) \\ U_p = f(T_a; I_p; Q_p) \end{cases} \quad (2.)$$

в виде формализованных многопараметрических уровней регрессии третьего порядка, имеющих общий вид:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot T_a + b_2 \cdot I + b_3 \cdot Q + b_4 \cdot T_a \cdot I + b_5 \cdot T_a \cdot Q + b_6 \cdot T_a \cdot Q + b_7 \cdot T_a^2 + b_8 \cdot I^2 + b_9 \cdot Q^2 + b_{10} \cdot T_a^3 + b_{11} \cdot I^3 + b_{12} \cdot Q^3 + b_{13} \cdot T_a \cdot I \cdot Q \quad (3.)$$

где b_i - коэффициенты регрессии.

Авторами на основании экспериментально полученных зависимостей (2) разработана также энергобалансная модель ХИТ, позволяющая определять его тепловой режим работы в условиях конвективного и радиационного теплообмена.

На основании экспериментальных данных о напряжении и тепловыделении на заряде-разряде ХИТ представляется возможность провести расчет соответствующих им основных энергетических характеристик. В результате таких расчетов образуется массив данных о текущем значении каждой характеристики энергетического состояния ХИТ.

Основными характеристиками текущего энергетического состояния ХИТ являются следующие зависимости:

1. Зарядная мощность $N_3 = U_3 \cdot I_3$ и разрядная мощность $N_p = U_p \cdot I_p$

2. Мощность тепловыделения на заряде N_3^T и разряде N_p^T

3. Текущее значение полезной мощности на заряде: $N_n^3 = N_3 - N_3^T$ и на разряде:

$$N_n^p = N_p + N_p^T$$

4. Зарядная W_3 и разрядная W_p энергии

$$W_3 = \int_0^{Q_3} U_3 \cdot dQ = \int_0^{\tau_3} N_3 d\tau \quad \text{и} \quad W_p = \int_0^{Q_p} U_p \cdot dQ = \int_0^{\tau_p} N_p d\tau$$

5. Энергия тепловых потерь

$$\text{на заряде: } W_3^T = \int_0^{\tau_3} N_3^T d\tau \quad \text{на разряде: } W_p^T = \int_0^{\tau_p} N_p^T d\tau$$

6. Полезная энергия на заряде $W_n^3 = W_3 - W_3^T$ и на разряде: $W_n^p = W_{n, \text{конечн}}^3 - W_p^T - W_p$

7. К.п.д. по мощности на заряде: $\eta_N^3 = \frac{N_3 - N_3^T}{N_3} \cdot 100\%$ и на разряде:

$$\eta_N^p = \frac{N_p}{N_p + N_p^T} \cdot 100\%$$

Условия и режимы работы ХИТ в составе системы электропитания космического аппарата (токи заряда-разряда, условия охлаждения, количество циклов и др.) могут быть самыми разнообразными. Наибольшее влияние на характеристики ХИТ и его ресурс оказывает температура аккумулятора. В связи с этим изучение тепловых режимов ХИТ при различных токах заряда-разряда и условиях теплообмена является важной и необходимой задачей. Условия теплообмена ХИТ могут быть самыми различными и могут быть сведены либо к конвективному теплообмену, либо к теплообмену за счет излучения. Характер теплообмена (конвективный или излучением) определяется назначением и конструкцией КА. С учетом этих возможных видов теплообмена уравнение теплового баланса ХИТ можно записать в виде

$$N_T = m \cdot c \cdot \frac{dT_a}{d\tau} + \alpha \cdot S \cdot (T_K - T_0) + \sigma \cdot S (T_K^4 - T_0^4) \quad (4.)$$

где N_T - мощность тепловыделения ХИТ на заряде или разряде; c - удельная теплоемкость аккумулятора; m - масса аккумулятора; T_a - усредненная по объему температура аккумулятора; T_K - температура корпуса аккумулятора; T_0 - температура окружающей среды; α - удельный коэффициент теплоотдачи; S - площадь теплоотдачи; σ - удельный коэффициент лучеиспускания.

Уравнение (4.) представляет собой совместную запись закона Ньютона для конвективного теплообмена и закона Стефана-Больцмана для теплообмена излучением.

Это уравнение справедливо при следующих допущениях:

1. ХИТ представляется в виде тела с равномерно-распределенным источником тепловыделения, т.к. тепловыделение в ХИТ происходит по всей поверхности электродов, собранных в пакет и пропитанных электролитом, имеющим хорошую теплопроводность.

2. Градиент температуры внутри аккумулятора не учитывается, т.к. тепловая постоянная времени ХИТ (единицы минут) много меньше продолжительности цикла (несколько часов). Таким образом, считается, что температура блока электродов и температура корпуса ХИТ одинаковы.

Эти допущения справедливы для практики.

Если в (4.) известны коэффициенты теплоотдачи в условиях конвективного теплообмена α или в условиях лучеиспускания δ и мощность тепловыделения N^T , то из (4.) можно найти температуру аккумулятора T_a для данных условий охлаждения.

Коэффициенты α и σ определяются конструкцией космического аппарата и могут быть легко измерены экспериментально с помощью теплового имитатора ХИТ, представляющего собой электронагреватель, встроенный в корпус ХИТ. Тепловой имитатор, имеющий идентичные ХИТ геометрические размеры, устанавливается на место аккумулятора и ему сообщается известная мощность электронагрева $N_U^T = U_U \cdot I_U$. После установления равновесной температуры корпуса имитатора, когда

$T_U - const, \frac{dT_U}{d\tau} = 0$, определяют коэффициенты α и σ по формулам:

$$1. \text{ Для конвективного теплообмена } \alpha = \frac{U_U \cdot I_U}{(T_U - T_O) \cdot S} = \frac{N_U^T}{(T_U - T_O) \cdot S}$$

$$2. \text{ Для теплообмена излучением } \sigma = \frac{U_U \cdot I_U}{S \cdot (T_U^4 - T_O^4)} = \frac{N_U^T}{S \cdot (T_U^4 - T_O^4)}$$

где N_U^T, U_U, I_U - мощность, напряжение и ток электронагрева имитатора; T_U - температура корпуса имитатора; S - площадь теплоотдачи.

Если α или σ определяются довольно легко экспериментально, то гораздо труднее в (4.) определить N^T - мощность тепловыделения ХИТ на заряде и разряде, представляющую собой сложную, нелинейную зависимость от многих факторов. Если такая зависимость будет известна (пусть даже в формальном виде выражений (2.) и (3.)), то тогда по уравнению (4.) можно рассчитать значение температуры аккумулятора при произвольных известных условиях теплообмена ХИТ. Получение такой математической модели тепловых режимов ХИТ позволяет не только определить текущее состояние ХИТ (его электрические и тепловые характеристики) при заданных режимах работы, но и выдавать рекомендации разработчикам систем терморегулирования космических аппаратов на обеспечение оптимальных условий охлаждения аккумуляторных батарей.