

К.Н. Земляной, В.С. Рева, канд. техн. наук В.П. Фролов, д-р техн. наук К.В. Безручко,
А.Л. Азарнов, В.И. Лазненко, А.А. Харченко

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ И ВЫБОР ХИМИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА ТОКА ИЗ СОСТАВА СИСТЕМ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ САМОХОДНОЙ ПУСКОВОЙ УСТАНОВКИ

Приведена обобщенная структура математической модели, с помощью которой можно выбрать конкретный тип химического источника тока для системы автономного электроснабжения самоходной пусковой установки.

Наведено узагальнену структуру математичної моделі, за допомогою якої можна вибрати конкретний тип хімічного джерела струму для системи автономного електропостачання самохідної пускової установки.

It also contains the description of generalized mathematical model which can be used for selection of a specific type of chemical current sources for the self-contained power supply system of self-propelled launcher.

Введение

В настоящее время активизировались работы по созданию специализированных систем автономного электроснабжения (САЭ), предназначенных для электроснабжения потребителей, и эксплуатируемых в составе самоходных пусковых установок (СПУ).

В общем случае САЭ СПУ имеют в своем составе источники электроэнергии (дизель-электростанции) и накопители электроэнергии (аккумуляторные батареи на основе химических источников тока — ХИТ), функционирующие в соответствии с различными циклограммами нагрузки в зависимости от решаемых СПУ задач.

Постановка задачи

Основными электропотребителями, получающими электроэнергию от САЭ СПУ, являются:

- наземная проверочно-пусковая аппаратура системы управления (НППА СУ), в том числе бортовая аппаратура системы управления (БАСУ) до перехода на бортовое питание;
- автоматизированная система контроля и управления (АСКУ);
- электропотребители транспортного модуля (ТМ), в том числе система управления технологическим оборудованием;
- аппаратура системы измерений (СИ) и наземной системы пристартовых измере-

ний на этапе летно-конструкторских испытаний (ЛКИ).

Учитывая, что СПУ выполняет возложенные на нее задачи из различных степеней готовности, циклограммы работы САЭ СПУ в значительной степени отличаются друг от друга.

Одним из наиболее ответственных участков этих циклограмм является время, в течение которого осуществляются высокоточные операции по прицеливанию, не допускающие возникновения шумов и вибраций, т.е. работа дизель-электростанции из состава САЭ СПУ в этот период неприемлема.

Электроснабжение электропотребителей на этом ответственном участке времени осуществляется от ХИТ.

Пример одной из циклограмм работы САЭ СПУ приведен на рис. 1, на котором видно, что обеспечение питания потребителей производится от генератора ТМ СПУ, ХИТ и автономного источника питания (АИП). Из циклограммы видно, что в начале режима электропитания САЭ СПУ осуществляется от генераторов шасси СПУ, после чего происходит переключение электропитания САЭ на ХИТ на время, необходимое для выполнения операций по прицеливанию.

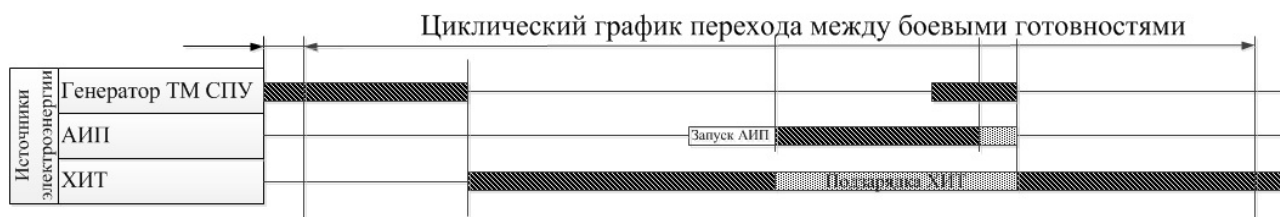


Рис. 1. Пример циклограммы работы САЭ СПУ в режиме перехода в боевую готовность

Режимы эксплуатации электрохимических аккумуляторов					
Буферный режим	Циклический режим	Дежурный режим	Стартерный режим	Режим основного источника	Режим хранения
I_z – ток заряда; I_p – ток разряда; ϕ – глубина разряда; Q – емкость; U – напряжение	I_z – ток заряда; I_p – ток разряда; Q_p – разрядная емкость; Q_z – зарядная емкость	$I_{подз}$ – ток подзаряда; $U_{нрц}$ – напряжение разомкнутой цепи; Q – емкость; C – заряженность	U_p – напряжение разряда; I_p – ток разряда; Q_p – разрядная емкость; Вольт-амперная характеристика	I_p – ток разряда; Q_p – разрядная емкость; U_p – напряжение разряда	$U_{нрц}$ – напряжение разомкнутой цепи; Q_p – разрядная емкость; C – заряженность

Рис. 2. Режимы работы ХИТ в составе САЭ СПУ

После завершения этих операций проводится запуск автономного источника питания (переход на питание потребителей от автономного источника питания) и начинается подзаряд ХИТ. Через некоторое время для включения гидравлических систем проводится запуск двигателя шасси СПУ, соответственно подключаются генераторы из состава шасси СПУ. Далее поочередно отключаются генераторы ТМ СПУ после выполнения подъемных работ, после подзарядки аккумуляторных батарей отключается АИП и электропитание потребителей осуществляется только от ХИТ. Таким образом, анализ приведенной циклограммы показывает, что в данном режиме применяется циклический режим эксплуатации ХИТ.

Проанализировав режимы эксплуатации ХИТ (рис. 2) в составе САЭ СПУ, можно классифицировать их основные режимы работы: буферный, циклический, дежурный, стартерный, режим основного источника и режим хранения.

Исходя из режимов работы ХИТ в составе САЭ СПУ, определяются условия подключения ХИТ к нагрузке (рис. 3).

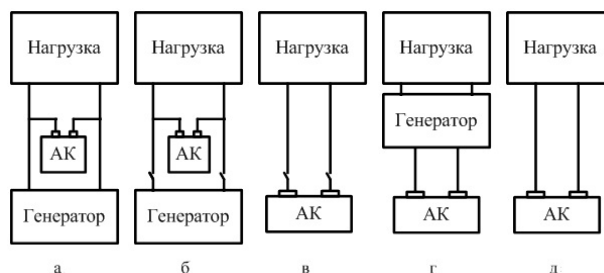


Рис. 3. Варианты подключения ХИТ при различных режимах эксплуатации:

- а – буферный режим; б – циклический режим;
- в – дежурный режим; г – стартерный режим;
- д – режим основного источника

В связи с изложенным возникает задача выбора ХИТ с характеристиками, обеспечивающими выполнение задачи подготовки пуска в различных режимах эксплуатации, т.е. обеспечение длительного разряда с последующим кратковременным зарядом.

Результаты

Решение этой задачи в настоящее время возможно путем моделирования характеристик САЭ СПУ на стадиях проектирования, испытаний и эксплуатации с использованием описания заряд-разрядной характеристики в зависимости от глубины разряда

(степени заряженности), тока и температуры ХИТ.

Проведение энергобалансных расчетов, в том числе и с целью прогноза характеристик ХИТ, требует создания более обширных моделей, формализующих параметры побочных реакций, которые оказывают непосредственное влияние на энергетические характеристики ХИТ.

Разработку математических моделей ХИТ можно проводить тремя способами: при помощи описания макрокинетики электрохимических процессов, описания данных, полученных в результате эксперимента, описания процессов, происходящих в электрохимическом аккумуляторе с помощью схем замещения.

1. Описание макрокинетики электрохимических процессов. В аккумуляторе, на отдельных электродах, происходят нестационарные процессы, описать которые достаточно сложно, потому что необходимо учитывать все факторы, влияющие на работу ХИТ, такие как: зависимость тока обмена от температуры, зависимости теплопроводности от степени заряженности и др. Без учета того или иного фактора получаемые характеристики (с помощью аналитических моделей) могут существенно отличаться от реальных характеристик.

2. Описание экспериментальных данных. Решение задачи данным методом наиболее точное, так как использование результатов реальных экспериментов дает возможность избежать некорректного аналитического отображения характеристик аккумуляторов. Недостатком данного направления является узкая область применения полученной математической модели.

3. Описание ХИТ при помощи схем замещения. Для каждого из процессов (электрохимических, физических) может быть составлена своя эквивалентная схема замещения, которую можно описать соответствующими математическими уравнениями. Эквивалентная электрическая схема замещения представляет собой определенным образом соединенные активные и реактивные элементы (сопротивления, емкости, индуктивности), каждый из которых имитирует определенный физико-химический параметр или конструктивный

элемент исследуемого ХИТ. Данное решение наиболее удобное для математического описания и упрощает решение задачи.

Анализ ХИТ, применяемых в существующих САЭ СПУ показал, что наиболее широко используются аккумуляторные батареи следующих электрохимических систем [1]:

- свинцово-кислотные (SLA);
- никель-кадмиевые (Ni-Cd);
- литий-ионные (Li-ion).

Согласно последовательности разработки математических моделей одним из начальных этапов при создании математических моделей является составление структуры математической модели. Схема обобщенной структуры математических моделей ХИТ приведена на рис. 4 [2].

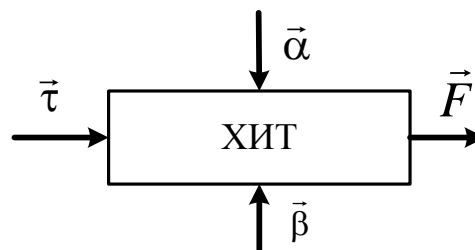


Рис. 4. Схема обобщенной структуры математической модели ХИТ:

$\vec{\alpha}$ – управляющие параметры; $\vec{\beta}$ – специфические параметры; $\vec{\tau}$ – входные параметры; \vec{F} – выходные параметры

Обобщенная структура математических моделей ХИТ имеет вид:

$$\begin{cases} \vec{F} = \vec{F}(\vec{\alpha}, \vec{\beta}, \vec{\tau}); \\ \vec{\beta} = \vec{\beta}(\vec{\tau}); \\ \vec{\alpha} \in [\vec{\alpha}_{\min}, \vec{\alpha}_{\max}]; \\ \vec{\tau} \in [\vec{\tau}_{\min}, \vec{\tau}_{\max}]; \end{cases} \quad (1)$$

где $\vec{\alpha}$ – вектор параметров, характеризующих режимы работы ХИТ; $\vec{\beta}$ – вектор параметров, характеризующих особенности конкретных ХИТ; \vec{F} – вектор параметров, содержащих характеристики ХИТ, которые изменяются с изменением входных параметров; $\vec{\tau}$ – вектор входных параметров [3].

Входных параметров $\vec{\tau}$ в общем случае может быть несколько (время, число циклов заряда-разряда и др.). Для математиче-

ской модели ХИТ входным параметром является время.

Выходным параметром математической модели \bar{F} в большинстве случаев являются емкость и напряжение, поскольку именно эти параметры определяют состояние ХИТ и качество электропитания нагрузки.

Вектор специфических параметров $\bar{\beta}$ включает параметры, характеризующие окружающую среду, управление которыми не ведется, и характеристики начального состояния ХИТ.

Вектор управляющих параметров $\bar{\alpha}$ содержит описание режимов работы ХИТ, т. е. величин зарядно-разрядных токов I , температур T , предельных значений напряжений U_{\min}, U_{\max} , максимальную продолжительность работы ХИТ τ_{\max} и др.

Одной из наиболее важных характеристик ХИТ является его зарядно-разрядная характеристика.

В результате апробации ряда зависимостей были приняты следующие наиболее приемлемые выражения [4]:

– для зарядной характеристики

$$U_z = E_z - a_{z1} \cdot e^{-\frac{3\bar{Q}_z}{a_{z3}}} - a_{z2}(1 - \bar{Q}_z) + a_{z4} \left[1 - e^{-\frac{a_{z5} \cdot I_{cz}}{C_{az} - \bar{Q}_z}} \right]; \quad (2)$$

– для разрядной характеристики

$$U_p = E_p + a_{p1} \cdot e^{-\frac{3\bar{Q}_p}{a_{p3}}} - a_{p2}(1 - \bar{Q}_p) - a_{p4} \left[1 - e^{-\frac{a_{p5} \cdot I_{cp}}{C_{ap} - \bar{Q}_p}} \right]; \quad (3)$$

где $\bar{Q}_{z,p}$ – относительная емкость ХИТ,

$$\bar{Q}_{z,p} = \frac{Q_{z,p}}{Q_{\max}};$$

$Q_{\max} = Q_{\max}^3$ – максимальная емкость заряженного ХИТ при заряде малым током ($\approx 0,1Q_n$; $T_{ak} \approx 20^\circ\text{C}$);

$I_{z,p}$ – средний зарядный (разрядный) ток

$$\text{ХИТ, } I_{z,p} = \frac{1}{Q_{\max}} \int_0^{\tau_{cz,p}} I_{z,p} d\tau;$$

$E_{z,p}$ – ЭДС заряженного (разряженного) ХИТ;

β – коэффициент, $\beta = f(I_p)$;

$a_{z1} \dots a_{z5}$, $a_{p1} \dots a_{p5}$ – коэффициенты, функционально зависящие от модификации (типо-размера) ХИТ, тока заряда (или разряда) и температуры корпуса АК.

В результате адаптации модели зарядно-разрядных характеристик (2) и (3) могут быть определены коэффициенты для конкретных модификаций ХИТ.

Для оценки адекватности математической модели были проведены контрольные независимые испытания различных электрохимических аккумуляторов путем использования критерия Фишера. Критерий Фишера F применяется для проверки принадлежности двух выборок (расчетных значений и результатов контрольных испытаний) одной и той же совокупности [5]:

$$F = \sigma_1^2 / \sigma_2^2, \quad (4)$$

где σ_1^2 , σ_2^2 – дисперсии первой и второй выборок соответственно.

Проверка адекватности сводится к проверке гипотезы об однородности оценки дисперсии воспроизводимости $\delta^2(y)$ с количеством степеней свободы $j(y)$ и оценки дисперсии адекватности. Проверка осуществляется по критерию Фишера. Вычисленное значение критерия меньше критического, что позволяет сделать вывод – математическая модель адекватно описывает процессы в ХИТ.

Математические модели ХИТ могут применяться для выбора конкретного ХИТ для САЭ любого комплекса. Они должны быть выражены в одних параметрах (мощность или ток – функция от времени), тогда в суммарной математической модели можно определить в зависимости от задачи работы тип ХИТ и все его основные параметры (максимальное напряжение разряда, максимальный ток заряда и разряда, минимальное напряжение разряда, максимальное время заряда и разряда, емкость).

Выводы

В результате проведенных работ установлен следующий порядок определения параметров ХИТ для САЭ СПУ:

1. Для предварительного выбора ХИТ необходимо определить самый напряженный режим работы ХИТ на основании циклограммы работы САЭ СПУ. Из циклограммы работы САЭ СПУ можно определить максимальный ток нагрузки (ток разряда ХИТ) и максимальное время воздействия нагрузки (время разряда ХИТ).

2. Определяется максимальная необходимая емкость ХИТ и его тип.

Построение математических моделей ХИТ и их использование с учетом указанной информации дает возможность выбора ХИТ для систем электроснабжения самоходных пусковых установок.

Результаты, подтверждающие правильность выбора ХИТ при помощи математических моделей, были экспериментально подтверждены на базе кафедры Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» в лаборатории автономной энергетики.

Список использованной литературы

1. Беляев Б.В. Работоспособность химических источников тока. – М.: Связь, 1979. – 112 с.
2. Багоцкий В.С. Химические источники тока / В.С. Багоцкий, А.М. Скундин. – М.: Энергоиздат, 1981. – 360 с.
3. Безручко К.В. Методы прогнозирования сроков эксплуатации химических батарей ракетных комплексов / К.В. Безручко, А.О. Давидов, С.В. Ширинский, В.П. Фролов, К.Н. Земляной, Р.А. Андрюков // Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр. / М-во образования и науки Украины, Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского "ХАИ". – Харьков, 2007. – № 4(40). – С. 62-65.
4. Дасоян М.А. Химические источники тока. – Л.: Энергия, 1969. – 183 с.
5. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. – М.: Физматлит, 2006. – 816 с.

Статья поступила 15.04.2016