

УДК 621.352+544.6

**Разработка схем базовых модулей типоразмерных рядов
энергоустановок на основе воздушно-алюминиевых химических
источников тока**

Окорокова Н.С.,* Пушкин К.В.,Севрук С.Д.,*** Фармаковская А.А.******

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

*e-mail: ok.nadezhda@mail.ru

**e-mail: konstantin-val@yandex.ru

***e-mail: sds46@yandex.ru

****e-mail: a.a.farmakovskay@gmail.com

Аннотация

Приведены результаты исследований по разработке энергоустановок на основе механически перезаряжаемых воздушно-алюминиевых (ВА) химических источников тока (ХИТ), для которых, учитывая их высокие энергомассовые, экономические и эксплуатационные характеристики, целесообразно создание функционального типоразмерного ряда ЭУ. Для варианта модульного типоразмерного ряда рассмотрены схемы базовых модулей и дана оценка энергомассообмена и потерь энергии в энергоустановках различных схем. Рассчитаны основные характеристики базовых модулей энергоустановок на основе ВА ХИТ.

Ключевые слова: химический источник тока, типоразмерный ряд, энергоустановка, базовый модуль

ВВЕДЕНИЕ

Задача создания типоразмерного ряда экологически чистых, высокоэффективных, автономных ЭУ на основе воздушно-алюминиевых (ВА) химических источников тока (ХИТ), обладающих существенно более высокими энергомассовыми, экономическими и эксплуатационными характеристиками, чем существующие энергосистемы аналогичного назначения очень актуальна при создании аварийных и основных источников питания для авиационной и космической техники (электролётов, средств автономного перемещения космонавтов в открытом космосе и других).

Анализ имеющихся данных по возможным потребителям автономных ЭУ на базе ВА ХИТ и предъявляемым к источникам энергии требованиям по уровню мощности и эксплуатационным характеристикам позволил нам выявить диапазон желательных мощностей ЭУ и требуемого энергозапаса. Проведенные нами ранее оценки и разработки, а также данные по другим типам ХИТ, позволяют считать возможным удовлетворение большинства требований с помощью 4...6 базовых модулей ЭУ, различающихся схемой организации рабочего процесса, уровнем мощности и видом электролита.

При разработке схем базовых модулей ЭУ и систем их обслуживания кроме общих подходов, необходимо учитывать особенности рабочих процессов, протекающих в ВА ХИТ и свойства продуктов реакции.

1. Рабочий процесс воздушно - алюминиевого химического источника тока и возможные схемы энергоустановок на его основе

В ВА ХИТ в качестве электролитов используются водные растворы щелочей и солей.

В щелочных растворах протекают следующие электрохимические реакции:

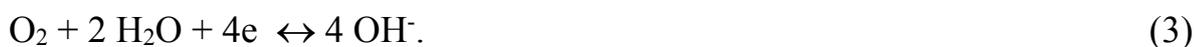
– анодное растворение алюминия на отрицательном электроде (аноде):



или



– катодное восстановление кислорода на положительном электроде (газодиффузионном катоде):



Кроме токообразующей реакции на алюминиевом аноде протекает электрохимическая коррозия, причем её анодный процесс описывается теми же уравнениями (1) или (2), а сопряженным катодным процессом является катодное восстановление водорода из воды:



Суммарно токообразующий процесс и реакция коррозии описываются уравнениями соответственно:



Растворимость продукта реакции ограничена, поэтому после достижения предела растворимости начинается процесс разложения (декомпозиции) раствора, в результате которого образуется конечный продукт реакции - кристаллический гидроксид алюминия



Упрощенно эту схему можно представить в виде суммарных уравнений для токообразующего процесса



и для реакции коррозии



На рисунке 1 приведенные реакции указаны по месту их протекания в ВА ХИТ.

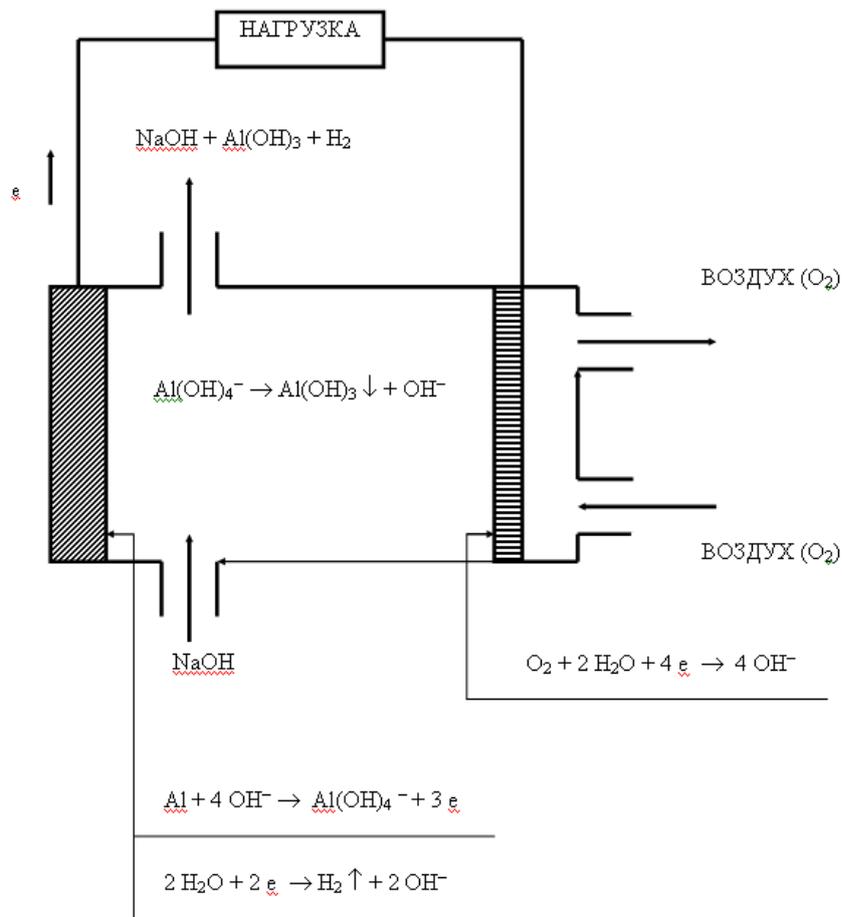
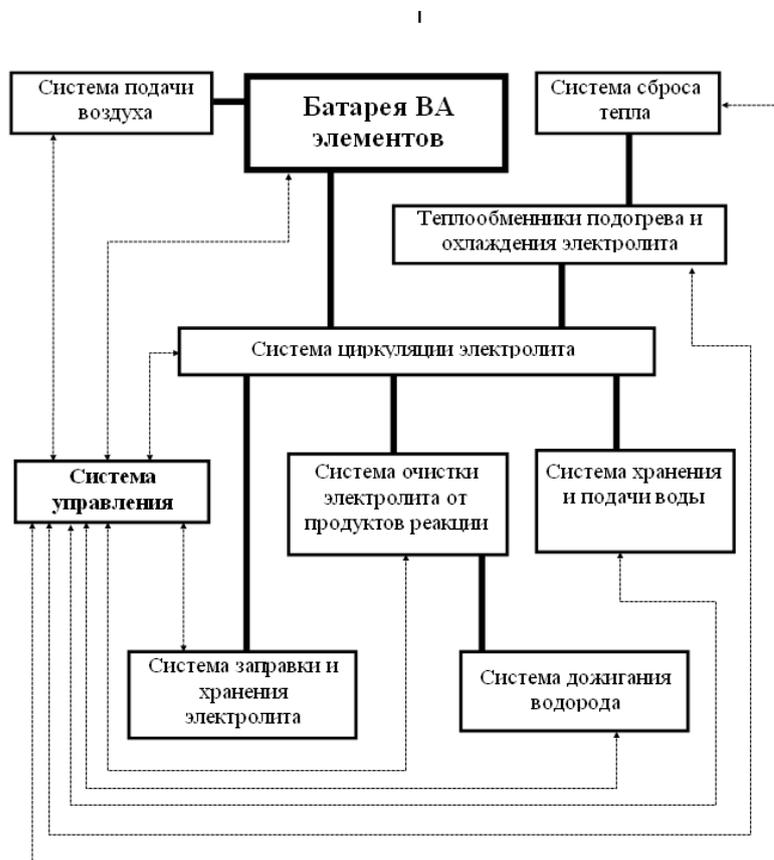


Рис. 1 Схема ВА ХИТ

В нейтральных солевых электролитах механизм реакций отличается от такового для щелочного раствора, однако суммарные процессы описываются также уравнениями (8) и (9).

Таким образом, в ВА ХИТ расходуемыми веществами являются алюминий, вода и кислород. В общем случае при длительной непрерывной работе расходуемые вещества должны непрерывно подводиться в зону реакции, а продукты реакции удаляться. В соответствии с этим обобщенная блок-схема ЭУ на основе ВА ХИТ с циркулирующим электролитом будет иметь вид, представленный на рисунке 2.

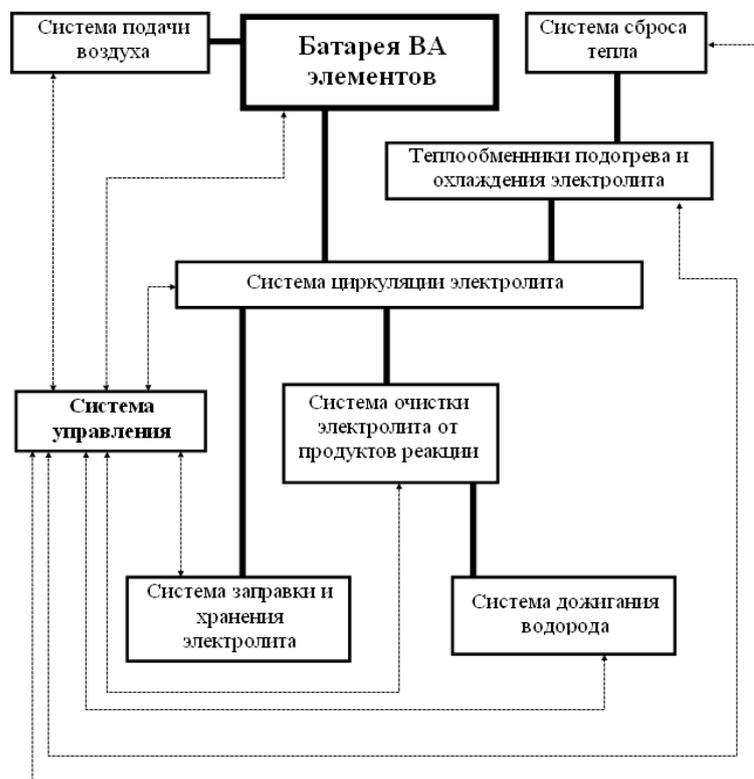
Здесь утолщенными линиями показаны связи между подсистемами установки, обеспечивающие энергомассообмен, а тонкими линиями со стрелками – информационные связи.



**Рис. 2 Обобщенная блок-схема энергоустановки на основе воздушно -
алюминиевого химического источника тока с циркулирующим щелочным
электролитом (с корректировкой состава электролита)**

Фундаментальной особенностью ВА системы является высокая буферность электролита, то есть, возможность расходовать значительную часть воды (не восполняя ее расход) при незначительном изменении электрических характеристик источника тока. Количественно это свойство характеризуется удельной емкостью электролита. Она физически представляет собой количество электричества, которое

может быть получено с единицы массы электролита. С учетом буферности электролита в ряде случаев система хранения и подачи воды может быть исключена из состава установки и ее схема приобретает вид, показанный на рис. 3.

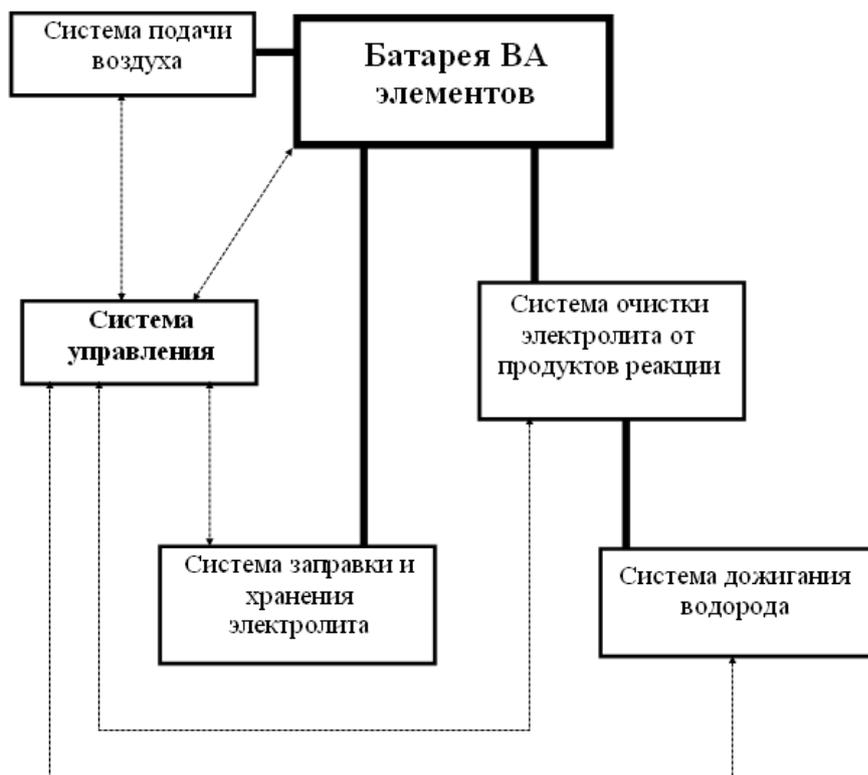


**Рис. 3 Обобщенная блок-схема энергоустановки на основе воздушно -
алюминиевого химического источника тока с циркулирующим щелочным
электролитом (без корректировки состава электролита)**

Следует иметь в виду, что подсистемы, функционально выделенные на рассмотренных схемах и на схемах, о которых пойдет речь ниже, конструктивно часто объединяются. Так, на рисунках 2 и 3 система отделения продуктов и теплообменники, очевидно, являются частью системы циркуляции электролита.

Более того, бак системы хранения обычно выполняет функции отстойника, то есть, одновременно является отделителем продуктов реакции.

В ЭУ относительно малой мощности нецелесообразно использовать циркуляцию электролита. В этом случае весь его потребный запас находится непосредственно в батареях элементов, может быть с некоторыми дополнительными емкостями (так называемая "наливная" схема). Однако в случае щелочного электролита необходимо предусматривать систему хранения электролита, в которую он сливается при отключении установки. Это связано с тем, что в щелочном электролите наблюдается положительный дифференц-эффект, то есть, скорость коррозии анода (уравнение 2) максимальна на бестоковом режиме и уменьшается по мере увеличения нагрузки, поэтому в нерабочем состоянии установки электролит и аноды должны быть разобщены во избежание ее саморазряда. На рисунке 4 представлена принципиальная схема такой ЭУ.



**Рис. 4 Обобщенная блок-схема энергоустановки на основе воздушно -
алюминиевого химического источника тока со щелочным электролитом без
циркуляции (наливная схема)**

В нейтральном солевом электролите наблюдается отрицательный дифференциальный эффект, то есть, на бестоковом режиме скорость коррозии практически равна нулю и линейно возрастает по мере увеличения нагрузки, поэтому нет необходимости в сливе электролита во время перерывов в работе ЭУ. В этом случае схема установки вырождается в простейшую, представленную на рисунке 5.

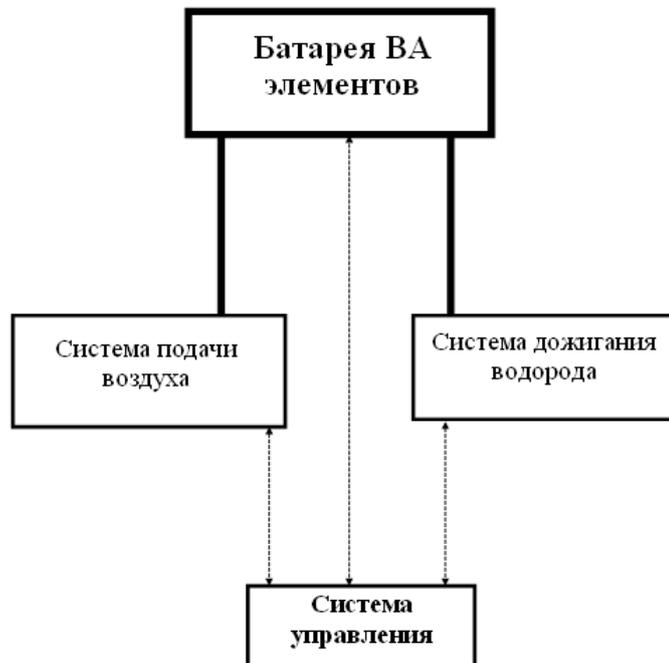


Рис. 5 Обобщенная блок-схема простейшей энергоустановки на основе ВА ХИТ наливного типа с солевым электролитом

В предельном случае особо малых мощностей (единицы Вт) ЭУ представляет из себя батарею элементов без каких-либо вспомогательных систем.

Следует отметить, что все ЭУ с циркуляцией с необходимостью имеют систему электролита, общую для всех элементов и батарей. Это неизбежно приводит к дополнительным потерям энергии, связанным с утечками тока по межэлементным электролитным каналам (шунтовые потери). В тоже время в "наливных" схемах возможно организовать отдельные (индивидуальные) электролитные системы для всех элементов, и, тем самым, избежать шунтовых потерь.

2. Оценка энергомассообмена и потерь энергии в энергоустановках различных схем

Для обоснованного выбора схем базовых модулей типоразмерных рядов ЭУ были выполнены расчетные оценки энергомассообмена в ВА ХИТ и сравнение потерь энергии в ЭУ различных схем.

Расчет электрических характеристик ЭУ проводился по разработанной нами ранее модели процессов в ВА ХИТ для различных режимов разряда при единичной площади электродов.

Для оценки потерь энергии при работе ЭУ с ВА ХИТ различных схем рассмотрены схемы с индивидуальным электролитом для каждого элемента и с электролитом общим для батареи. В первом случае потери обусловлены поляризацией электродов и омическим сопротивлением электролита. Во втором случае наблюдаются дополнительные потери энергии, связанные с утечками тока по шунтирующим батарею гидравлическим каналам.

Расчет батарей с общим электролитом осуществлялся методом эквивалентных схем по специально разработанной компьютерной ФОРТРАН-программе. Сравнение рассчитанных вольтамперных характеристик (ВАХ) батарей с экспериментально измеренными показало, что точность расчета по эквивалентным схемам достаточна для практических целей (находится в пределах экспериментальных погрешностей).

Показано, что шунтовые потери максимальны на режиме разомкнутой цепи и уменьшаются по мере увеличения токовой нагрузки. При этом ВАХ батареи с

общим электролитом асимптотически приближается к таковой для батареи без шунтовых потерь. Такой характер зависимости благотворно сказывается на внешней ВАХ батареи с общим электролитом, приближая ее к линейной. При надлежащем выборе геометрии шунтирующих гидравлических каналов дополнительные потери могут быть сведены к минимуму при сохранении в допустимых пределах гидравлического сопротивления проточной части.

Значимая зависимость характеристик электродов и удельной электропроводности электролита от концентрации растворенного продукта реакции приводит к увеличению потерь (ухудшению ВАХ) в батарее по мере ее разряда. При этом снижается относительная величина потерь за счет токов утечки по общему электролиту.

Для расчета массообмена использованы стехиометрические уравнения реакций (8) и (9), результаты расчета электрических характеристик и имеющиеся в нашем распоряжении зависимости скоростей коррозии алюминиевых анодов от разрядной плотности тока. Расчет массообмена проведен для тех же условий, что и расчет электрических характеристик. Этот расчет позволил определить необходимые запасы компонентов и оценить коэффициент их полезного использования (фарадеевский к.п.д.), в том числе, с учетом необходимых конструктивных запасов.

Кроме того, выполнена расчетная оценка скорости испарения воды из электролита в поток воздуха сквозь газодиффузионный катод. Показано, что с потоком испаряющейся воды уносится значительное количество тепла (в некоторых случаях до 30...40 %), что снижает требования к системе его отвода.

Полученные результаты явились основой для выбора целесообразных схем базовых модулей типоразмерных рядов ЭУ на основе ВА ХИТ.

3. Выбор схем базовых модулей типоразмерных рядов энергоустановок на основе воздушно - алюминиевых химических источников тока

В разделе 1 рассмотрено практически все многообразие принципиально возможных схем ЭУ на базе ВА ХИТ. Для того, чтобы выбрать из них оптимальный вариант для каждого из базовых модулей, необходимо учесть ряд дополнительных условий или факторов. Важнейшими из них являются уровень номинальной мощности и напряжения и общий энергозапас или, что тоже самое, время разряда на номинальном режиме.

Анализ выполненных нами ранее расчетных и проектных работ показывает, что применение наиболее сложной схемы ЭУ, представленной на рис. 2, оправдано только для необслуживаемых систем специального назначения при времени непрерывной работы более нескольких суток и уровне мощности не менее нескольких кВт. Во всех остальных случаях целесообразно использовать буферность электролита и строить ЭУ по схемам на рисунках 3...5, то есть, по так называемой "буферной" схеме или, правильнее, по схеме без корректировки состава электролита. Именно о таких установках и пойдет речь в дальнейшем, причем будем полагать, что время между операциями перезарядки находится в диапазоне от 6...8 до 24...48 часов непрерывной работы на номинальной мощности. Такая

периодичность обслуживания может быть обеспечена для одной конструкции за счет использования анодов различной толщины.

Максимальный уровень мощности одного модуля ограничивается технологически выполнимыми размерами газодиффузионного катода (ГДК). В настоящее время воздушные электроды могут быть изготовлены с рабочей площадью 250...300 см², что позволяет получить мощность до 1,5...2,5 кВт с одной батареи из 30 элементов (большее число элементов в батарее усложняет ее перезарядку). Таким образом, если в состав модуля может входить от 4-х до 8-ми батарей (из соображений компоновки), то его номинальная мощность может составлять 10...20 кВт. Модули меньших мощностей создаются на базе батарей с электродами меньшей площади, составляющей доли от максимально возможной.

Количество модулей промежуточной мощности можно определить из следующих соображений. Разность между мощностью каждых двух соседних модулей в ряду должна перекрываться при объединении в одну ЭУ 4-х, 6-и и 8-и модулей меньшей мощности. Однако крайне желательно, чтобы каждый из модулей мог обеспечить потребности возможно более широкого круга потребителей при использовании его в качестве самостоятельного автономного источника энергии. Последнее требование может изменить шаг по мощности в разрабатываемом ряду. Основные характеристики базовых модулей, полученные с учетом изложенных соображений, представлены в таблице 1.

Как уже отмечалось выше, все указанные в таблице модули представляют собой системы без корректировки состава электролита. Однако их конкретные

схемы определяются возможностью организации эффективного внутреннего энергообмена, возможностью теплосъема и, наконец, тем, что потребление энергии на собственные нужды модуля не может превышать 10 % номинальной мощности.

Исходя из этого, модули с мощностью более 1 кВт должны строиться по схеме на рисунке 3, то есть, с циркулирующим щелочным электролитом и жидкостной системой охлаждения. Модуль мощностью 250 Вт должен строиться по схеме на рисунке 4. Конструкция элемента и вспомогательных систем должна допускать применение как щелочного, так и солевого электролитов. Охлаждение модуля - воздушное. Остальные модули строятся по схеме на рисунке 5.

Таблица 1

Основные характеристики базовых модулей энергоустановок на основе воздушно-алюминиевых химических источников тока

Номинальная мощность	Номинальное напряжение	Электролит, наличие циркуляции	Число батарей	Назначение
Вт	В	-	шт.	-
5	12 (6; 3)	Солевой (щелочной) без циркуляции	1	Переносная аппаратура
25	12 (6; 3)	"-"	1	Переносная аппаратура, бытовая техника
50	12	"-"	1	Переносная аппаратура, бытовая техника
250	24 (12)	"-"	1	Бытовая техника, минитранспорт
1,5...2,5·10 ³	не менее 30	Щелочной с циркуляцией	1...4	Бытовая техника, малый транспорт
1...2·10 ⁴	110 и более	"-"	4...8	Транспорт, стационарные установки

В скобках указаны значения напряжения, которые должны получаться перекоммутацией батарей при сохранении номинальной мощности

Как показывают расчетные оценки, ВА ХИТ с соевым электролитом при плотности тока разряда $200...400 \text{ А/м}^2$ (номинальные значения) требуют принудительного охлаждения начиная с мощности одного агрегата порядка 100 Вт. Таким образом, модули ЭУ мощностью 5, 25 и 50 Вт представляют собой просто батареи элементов. Однако при создании на их основе более мощных ЭУ уже необходимо вводить систему охлаждения. В этом плане исключением является только модуль мощностью 5 Вт.

В случаях сложного графика энергопотребления, характеризующегося циклически повторяющимися значительными пиками мощности, может оказаться эффективной гибридная схема ЭУ. В ее состав входит собственно ЭУ, в нашем случае с ВА ХИТ, и буферная АБ. Первая обеспечивает среднюю мощность и подзаряд аккумуляторов в паузах или при минимальной отдаваемой потребителю мощности, а АБ снимает пики мощности. Известно, что при некоторых циклограммах работы, переход от обычной схемы к гибридной дает выигрыш в массе и повышение надежности ЭУ [1]. Здесь следует отметить, что весьма эффективным было бы применение новых никель – металл-гидридных и литий-ионных аккумуляторов. Однако выпускаемые в настоящее время АБ этих типов предназначены для питания маломощной радиоэлектронной аппаратуры и не могут быть применены в гибридных ЭУ мощностью хотя бы в сотни Вт.

Включение буферной АБ существенно улучшает функциональные и эксплуатационные возможности ЭУ на основе ВА ХИТ, но тогда неизбежно наличие в системе и специальной системы ее заряда. Кроме того, в большинстве

случаев ЭУ должна иметь систему кондиционирования энергии, обеспечивающую стабилизацию выходного напряжения в заданных пределах и/или преобразование постоянного тока в переменный одно- или трехфазный промышленной частоты. Тогда в общем виде схема модульной ЭУ на основе ВА ХИТ приобретает вид представленный на рисунке 6.

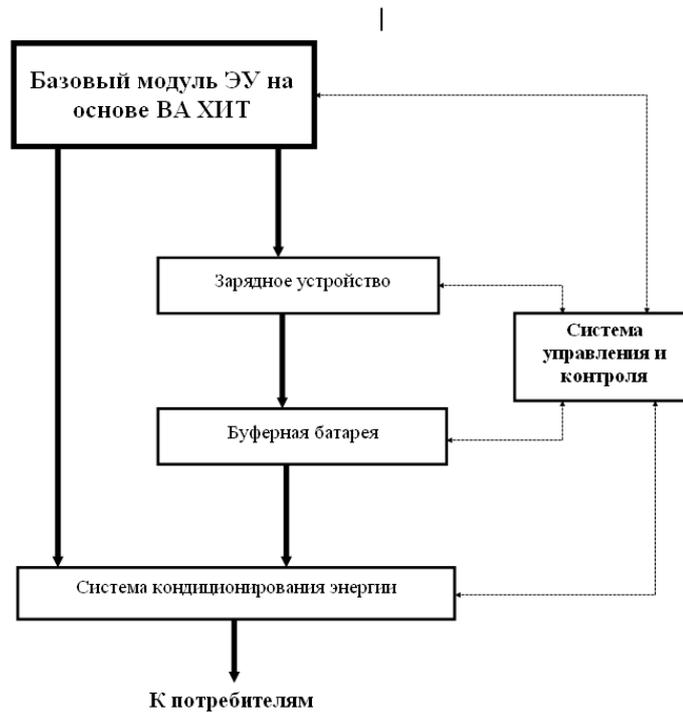


Рис. 6 Обобщенная электрическая схема энергоустановки на основе базового модуля воздушно-алюминиевого химического источника тока

Выводы

В результате проделанной работы для разработки модульных типоразмерных рядов ЭУ на основе ВА ХИТ:

- сформированы необходимые исходные данные по энергетическим и эксплуатационным характеристикам и свойствам рабочих тел;

- показано, что фактором, ограничивающим мощность базовых модулей, является максимально достижимая мощность единичной батареи элементов, которая, в свою очередь, для выбранной композиции рабочих тел определяется технологическими возможностями изготовления ГДК большой площади и возможностью обеспечения необходимых условий тепло-массообмена;
- показано, что по определяющим признакам могут быть построены 2...3 модульных типоразмерных ряда, состоящих из 3...5 базовых модулей каждый. При этом в составе модуля может быть от одной до 6 (8) батарей элементов, в зависимости от мощности базового модуля;
- выбраны рациональные схемы базовых модулей ЭУ.

Библиографический список

1. Клочкова Л.Л., Севрук С.Д. Электрохимические генераторы для энергоустановок со сложным графиком энергопотребления // Рабочие процессы в энергетических и двигательных установках. Тематический сборник научных трудов института. Вып. 320. М.: МАИ, 1975. С. 17 – 22.