

УДК 621.352+544.6

Способ организации рабочего процесса при длительной эксплуатации энергоустановок с алюминиевым горючим для аэро-космической отрасли

Огорокова Н.С.*, Пушкин К.В., Севрук С.Д.***, Суворова Е.В.****,
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: lelya-suvorova@yandex.ru*

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

Аннотация

Предложены оригинальные решения по основным агрегатам электрохимических энергоустановок. Рассмотрен важнейший вопрос очистки электролита от продуктов реакции. Для увеличения непрерывной работы воздушно-алюминиевых энергоустановок мы рассмотрели несколько путей организации системы очистки электролита.

Проведена оценка оптимальных параметров электролитного контура. Показано, что в некоторых случаях для интенсификации процесса очистки электролита необходимо применение специального устройства – кристаллизатора. Показано также, что для очистки электролита от твердой фазы возможно использование трех типов агрегатов: отстойников, фильтров

и центробежных сепарирующих устройств.

Ключевые слова: алюминий, анод, воздух, коррозия, органический ингибитор, поляризация, химический источник тока, электролит, энергоустановка

Введение

В настоящее время существует острая потребность авиационно-космической техники в источниках автономного энергоснабжения. Бурное развитие этой энергоемкой отрасли определило появление целого ряда специфических эксплуатационных задач и условий, затрудняющих или исключающих применение машинных схем преобразования энергии.

Среди разрабатываемых автономных источников электроэнергии особое внимание уделяется системам непосредственного преобразования различных видов энергии в электрическую. Особый интерес проявляется к химическим источникам тока (ХИТ) ввиду того, что к.п.д. ХИТ принципиально более высок (может быть приближен к 100 %), чем в традиционных машинных схемах, при их работе отсутствуют дополнительные динамические вращающие моменты (что зачастую является серьезной проблемой для космических аппаратов) и, кроме того, обычно нет каких-либо токсичных выхлопов.

В области автономного электроснабжения авиационных и ракетно-космических систем с помощью ХИТ основными задачами являются использование источников с высокой энергоемкостью, продолжительной

сохранностью до момента запуска, и длительным временем функционирования в отсутствии электросетей, доступность и экологическая чистота компонентов, возможность регенерации продуктов реакции. Этим требованиям в полной мере отвечают механически перезаряжаемые ХИТ на основе электрохимической системы кислород-алюминий, которые называют воздушно-алюминиевыми (ВА) ХИТ.

Для выбора конструктивных характеристик и оптимальных параметров энергоустановок (ЭУ) на основе ВА ХИТ необходимо ясно представлять влияния режимов и длительности эксплуатации на рабочий процесс в ВА ХИТ. Данная статья освещает важные аспекты длительной эксплуатации подобных ЭУ.

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

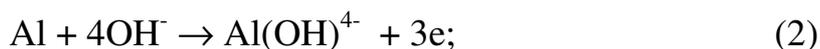
В ВА ХИТ в качестве электролитов используются водные растворы щелочей и солей, причем источники со щелочным электролитом имеют более высокие энергомассовые характеристики, чем с нейтральным солевым электролитом. Кислые электролиты в ВА ХИТ не применяются.

В щелочных растворах протекают следующие электрохимические реакции:

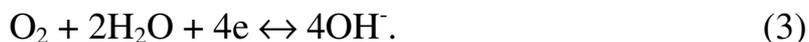
- анодное растворение алюминия на аноде (отрицательном электроде):



или



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



Алюминий в воде термодинамически неустойчив, поэтому на аноде параллельно протекает паразитная электрохимическая реакция коррозии, причем ее 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 – алюмината натрия – ограничена, поэтому после достижения предела его растворимости начинается процесс декомпозиции раствора

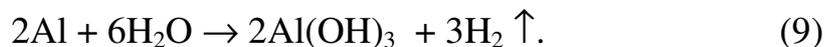


в результате которого образуется конечный продукт реакции в элементе - кристаллический гидроксид алюминия. Упрощенно эту схему можно представить в виде суммарных уравнений для токообразующего

процесса



и для реакции коррозии



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

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

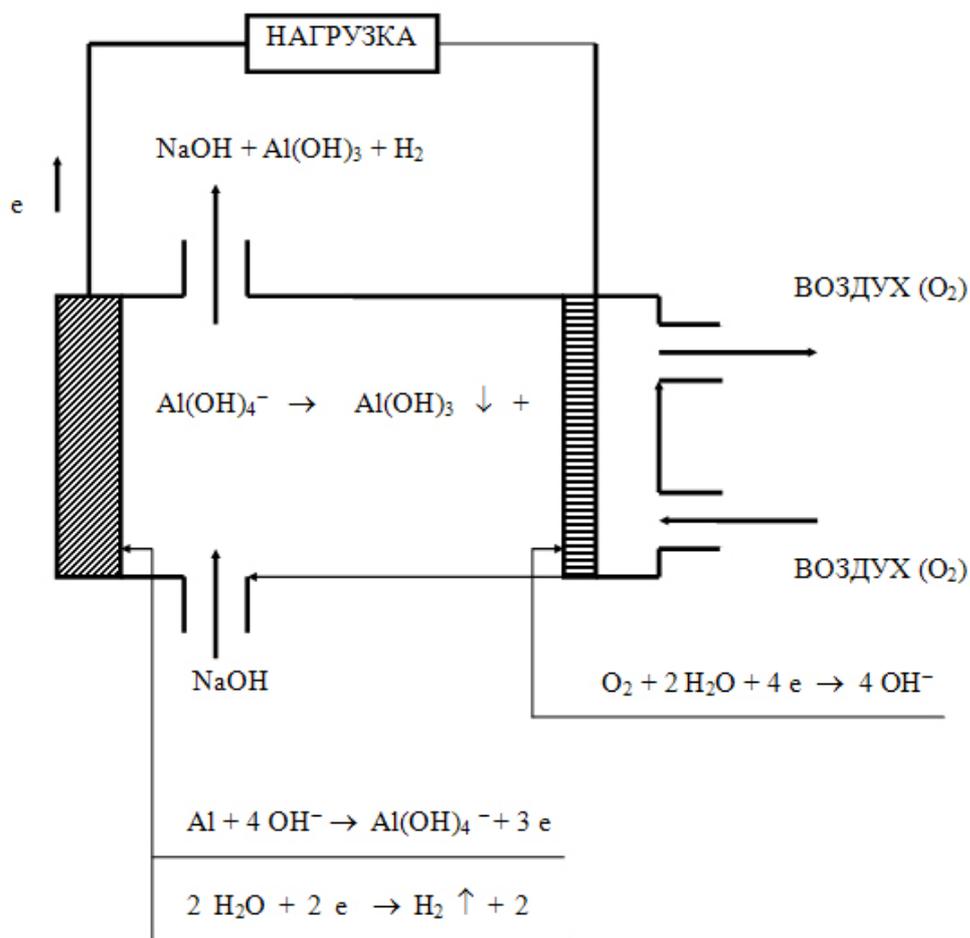


Рисунок 1 - Схема рабочего процесса в элементе со щелочным

электролитом.

В рассмотренной электрохимической системе 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. Наиболее просто эти процессы могут быть организованы в системах с циркулирующим электролитом. В соответствии с этим обобщенная блок-схема ЭУ на основе ВА ХИТ будет иметь вид, представленный на рисунке 2. Здесь утолщенными линиями показаны связи между подсистемами установки, обеспечивающие энергомассообмен, а тонкими линиями со стрелками - информационные связи.

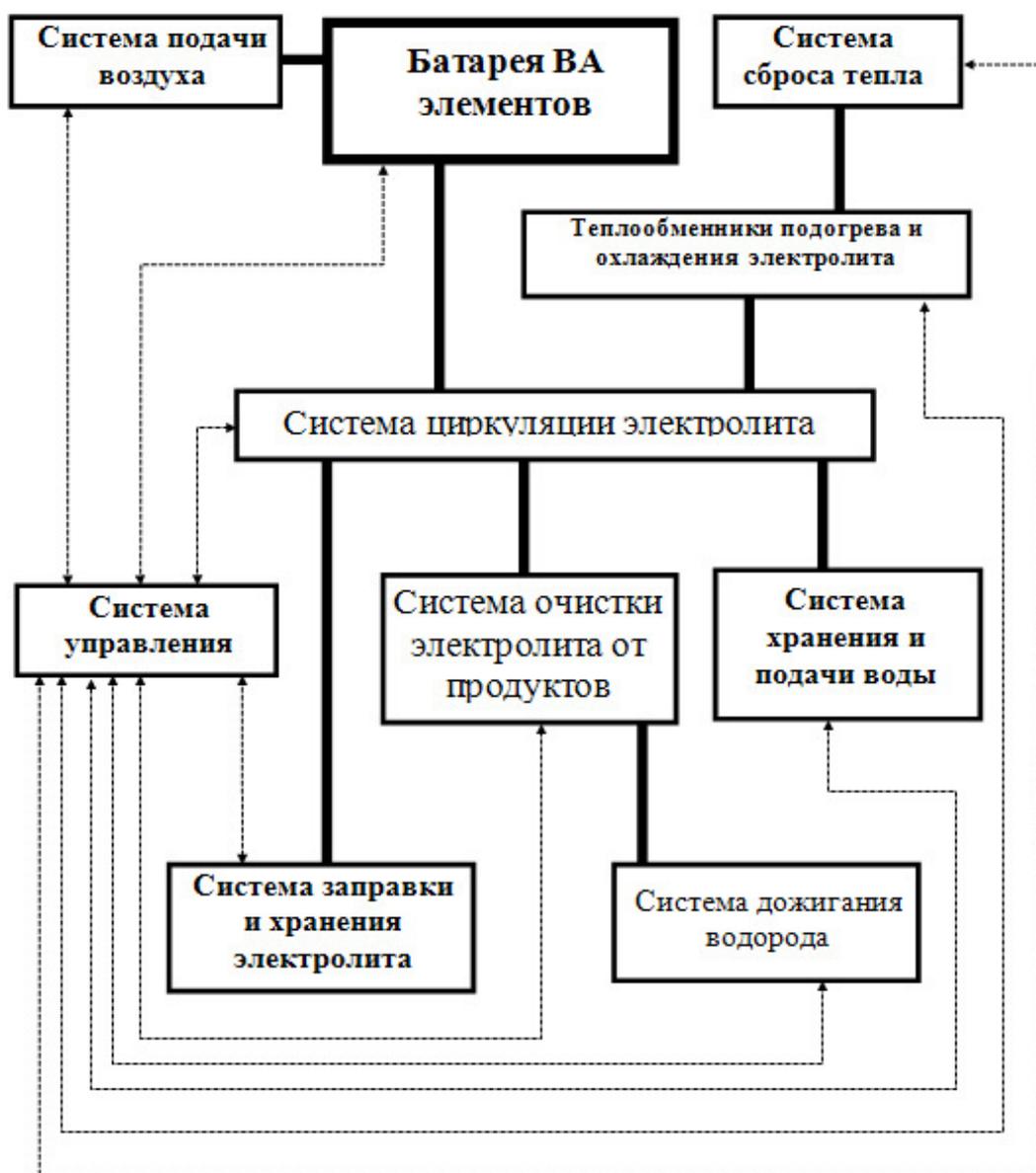


Рисунок 2 - Обобщенная блок-схема энергоустановки на основе воздушно - алюминиевого химического источника тока с циркулирующим щелочным электролитом (с корректировкой состава электролита).

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 рисунке 3.

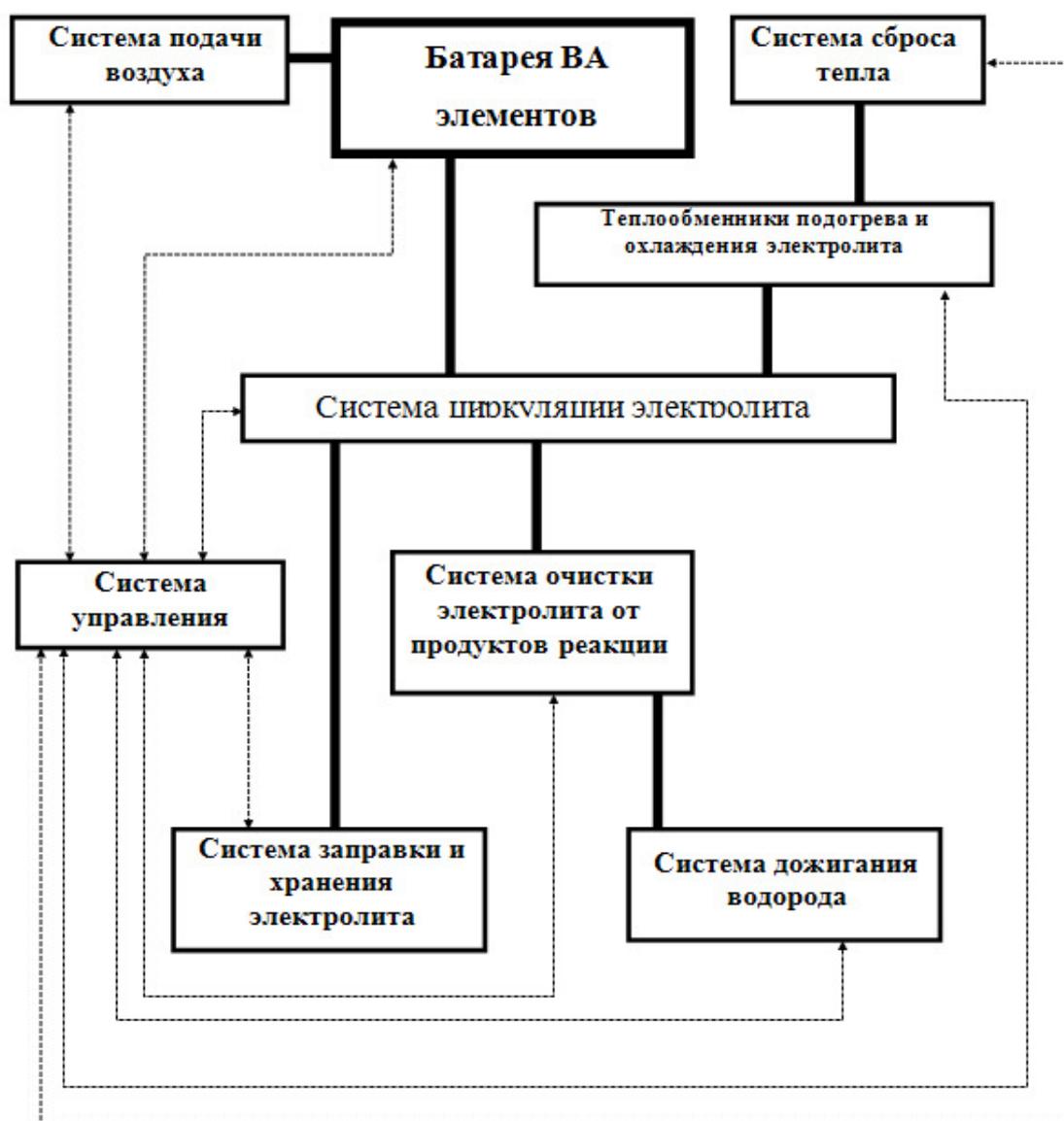


Рисунок 3 - Обобщенная блок-схема энергоустановки на основе воздушно - алюминиевого химического источника тока с циркулирующим

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 (9) 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. Принципиальная схема такой ЭУ представлена на рисунке 4.

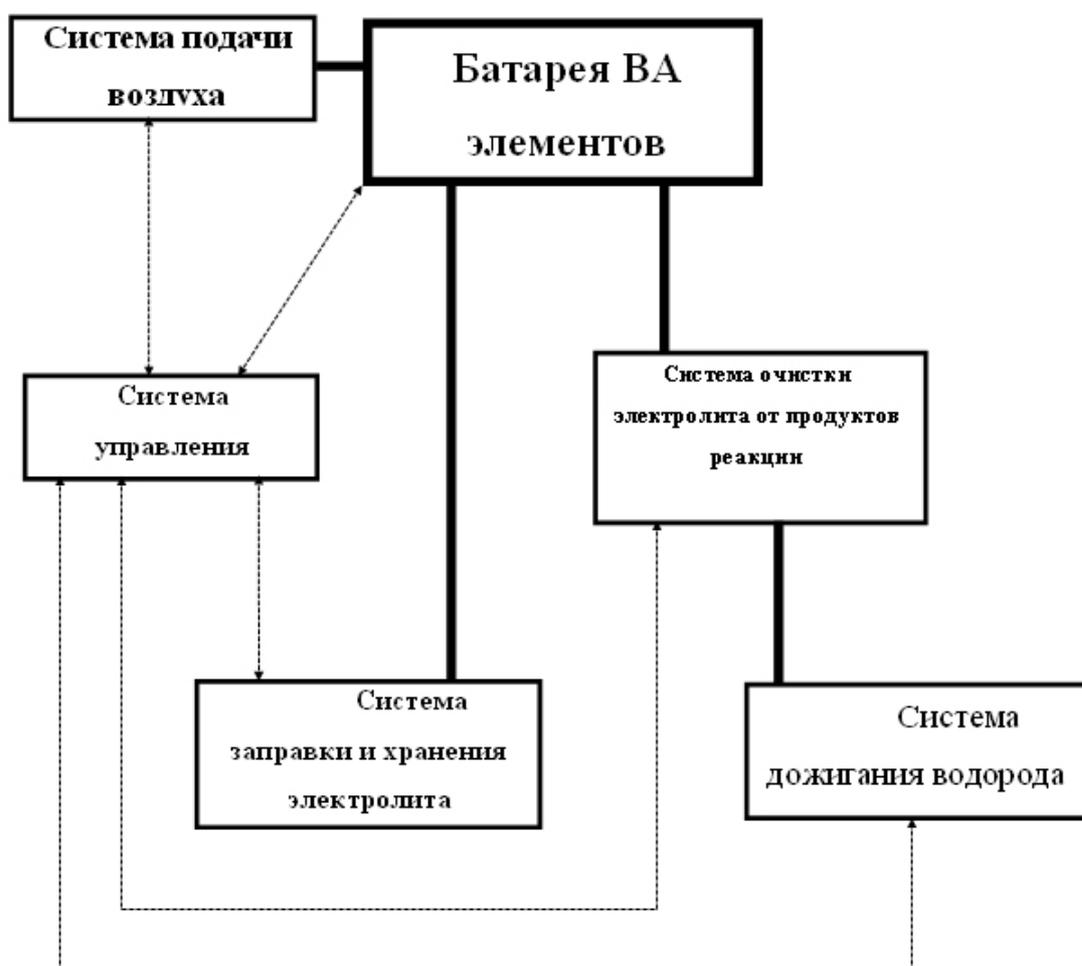


Рисунок 4. Обобщенная блок-схема энергоустановки на основе воздушно - алюминиевого химического источника тока со щелочным электролитом без циркуляции (наливная схема).

В нейтральном солевом электролите наблюдается отрицательный дифференц-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.

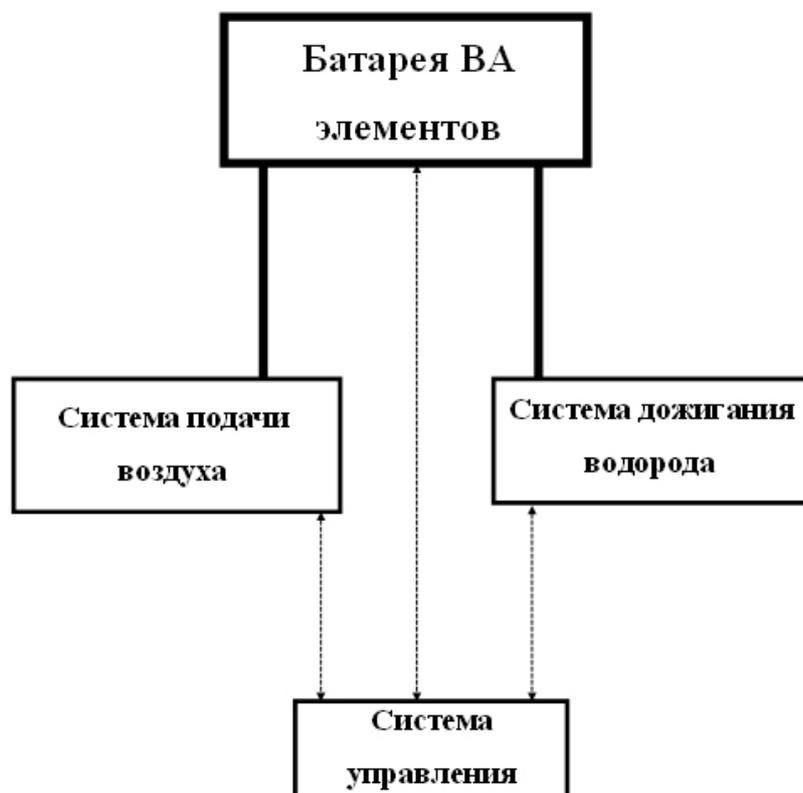


Рисунок 5. Обобщенная блок-схема простейшей энергоустановки на основе воздушно - алюминиевого химического источника тока наливного типа с солевым электролитом

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

Функциональные и эксплуатационные возможности ЭУ на основе ВА ХИТ могут быть существенно улучшены, если в ее состав включить буферную батарею (например аккумуляторную) [1-3]. Тогда неизбежно наличие в ЭУ специальной системы заряда буферной батареи. 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 ЭУ на основе ВА ХИТ приобретает вид представленный на рисунке 6.

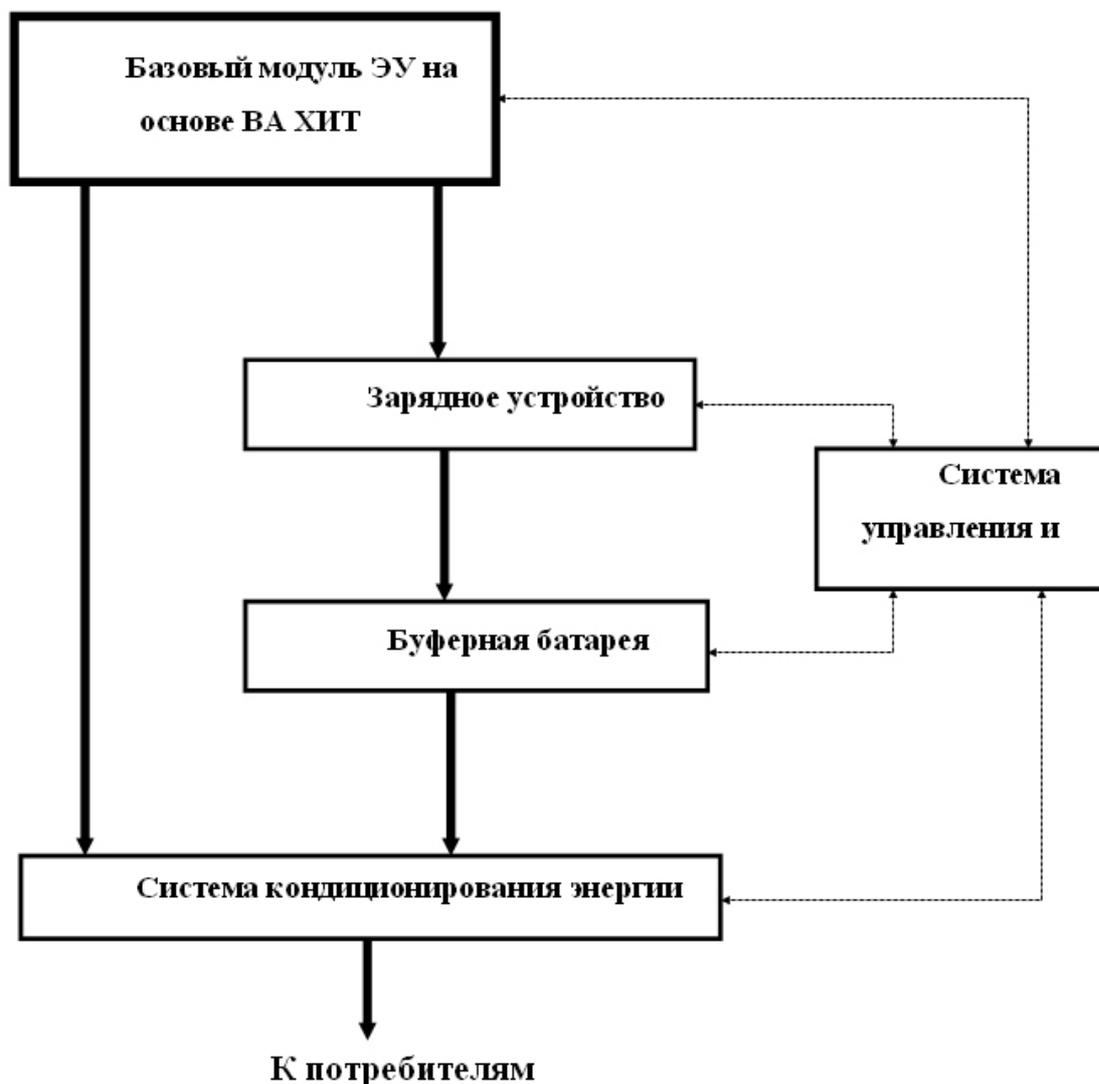


Рисунок 6. Обобщенная электрическая схема энергоустановки на основе базового модуля воздушно - алюминиевого химического источника тока

Следует отметить, что всем ЭУ с циркуляцией необходимо иметь

ёмкость для 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.

Анализ выполненных нами ранее расчетных и проектных работ показывает, что применение наиболее сложной схемы ЭУ, представленной на рисунке 2, оправдано только для необслуживаемых систем специального назначения при времени непрерывной работы больше нескольких суток и уровне мощности не менее нескольких кВт. Во всех остальных случаях целесообразно использовать буферность электролита и строить ЭУ по схемам рисунков 3-5, то есть, по так называемой "буферной" схеме или, точнее, по схеме без корректировки состава электролита.

Таким образом, нами рассмотрено практически все многообразие принципиально возможных схем ЭУ на базе ВА ХИТ. При выборе оптимального варианта схемы организации рабочего процесса для каждой проектируемой ЭУ, необходимо учитывать ряд дополнительных условий или факторов. Важнейшими из них являются уровень номинальной мощности и напряжения и общий энергозапас, то есть время разряда на номинальном режиме. Кроме того, выбор конкретной схемы ЭУ определяются возможностью организации эффективного внутреннего энергообмена, возможностью теплосъема и, наконец, тем, что потребление энергии на

собственные нужды установки не должно превышать 5-10 % от ее номинальной мощности.

Основные требования к вспомогательным и сервисным системам и возможные схемы их реализации

Как видно из вышесказанного, в состав ЭУ с необходимостью включаются некоторые дополнительные системы, без которых длительное функционирование ЭУ невозможно. Это – вспомогательные или сервисные системы. К ним относятся: система циркуляции электролита, система подачи воздуха, система удаления продуктов, система терморегулирования, система хранения (рис. 2-5) и система кондиционирования электроэнергии (рис. 6).

Последняя система является внешней с точки зрения организации рабочего процесса. Состав ее элементов определяются назначением ЭУ, и она может быть следующего вида:

- система постоянного тока с электронными устройствами стабилизации, регулирования выходного напряжения и тока, защиты от коротких замыканий (КЗ) нагрузки и встречного тока (в случае работы с электродвигателем, перешедшим в генераторный режим), устройствами, обеспечивающими параллельную работу нескольких ЭУ между собой либо с другими источниками электроэнергии, например, с аккумуляторами, электрогенераторами;

- система переменного тока с однофазным либо трехфазным

инвертором с элементами стабилизации, регулирования выходного напряжения и частоты защиты от перегрузок по току и КЗ электронных преобразователей, элементами, обеспечивающими синфазную синхронную работу отдельных ЭУ в автономной трехфазной системе либо параллельную работу с внешними источниками электроэнергии (с сетью);

– смешанная система, состоящая из системы постоянного тока с перечисленными ее элементами и системы переменного тока с соответствующими ее элементами.

Удельный вес составляющих в смешанной системе зависит от уровня потребляемой мощности по каждому каналу. Разработка принципиальных схем системы кондиционирования энергии должна осуществляться в соответствии с принципом полной автономности ЭУ. При этом, как отмечалось выше, полное потребление энергии на собственные нужды установки не должно превышать 5...10 % от ее номинальной мощности.

Среди систем, непосредственно обеспечивающих работу ЭУ, наиболее сложной с точки зрения условий функционирования и предъявляемых требований является электролитная система. Наиболее сложным и ответственным ее агрегатом является электронасосный агрегат (ЭНА), так как он должен обеспечивать циркуляцию агрессивной трехфазной системы жидкость - твердая фаза - газ. Этот агрегат должен быть герметичным, его подшипниковый узел должен быть длительно работоспособен при наличии в рабочей жидкости большого количества абразивного материала (гидроксида алюминия), а рабочий орган должен обладать высокими

антикавитационными свойствами.

Анализ возможных схем ЭНА, предъявляемых к ним требований по расходу и напору рабочих жидкостей, а также по свойствам многофазной системы, образующейся при работе ВА ХИТ (жидкость - твердая фаза - газ), показал, что оптимальным следует признать герметичный необслуживаемый ЭНА, в котором применяется асинхронный привод переменного тока при совмещении функций ротора электродвигателя и рабочего колеса насоса. Во многих случаях это может быть шнековый насос с гидродинамическими опорами.

Следует отметить, что этот же ЭНА может быть с успехом использован и для циркуляции вспомогательного теплоносителя контура системы терморегулирования.

Второй важнейшей системой обеспечения работы ЭУ является система подачи воздуха. Подача воздуха осуществляется для обеспечения рабочего процесса непосредственно в ХИТ и охлаждения ЭУ. Исходными данными для разработки схем электроагрегатов подачи воздуха (ЭПВ) являются технические требования к расходу и давлению воздуха в зависимости от типа электродов. ЭУ с гидрофобными электродами не требуют избыточного давления, и подача воздуха может осуществляться обычным осевым вентилятором; ЭУ с гидрофильными электродами требуют подачи воздуха с избыточным давлением до 0,25...0,35 ати.

Помимо известных схемных решений ЭПВ (осевых и центробежных вентиляторов) с учетом малых требуемых давлений и расходов

целесообразно рассматривать поршневой и мембранный воздушные насосы, отличающиеся от известных аналогичных прототипов конструкцией электропривода и рабочего органа насоса. Основу предлагаемого ЭПВ составляет цилиндрический линейный двигатель. В таком двигателе дисковый постоянный магнит с примыкающими к его торцам цилиндрическими полюсными наконечниками (якорь) охватывается снаружи обычной цилиндрической катушкой. Снаружи располагается С-образный шихтованный магнитопровод. При подаче на катушку однополярных или разнополярных импульсов напряжения магнит с полюсами начнет совершать колебательные движения - он является либо поршнем насоса либо деформирует мембраны, примыкающие к его торцам. Рабочая камера ЭПВ должна быть снабжена прямыми и обратными клапанами. Предлагаемый насос прост по конструкции и технологии изготовления, не требует смазки. Схема управления его работой тривиальна – либо один транзистор при однополярном питании (в этом случае обратный ход якоря совершается либо под собственным весом якоря, либо под действием пружины), либо мостовая схема с четырьмя транзисторами при разнополярном питании обмотки.

Поршневой электрокомпрессор может быть реализован на базе тихоходного электропривода с шатунно - кривошипным преобразователем движения. Такие насосы небольшой производительности используются в бытовой технике.

Все проанализированные схемы ЭПВ обладают как достоинствами, так и недостатками. Поршневые или мембранные ЭПВ могут найти применение

в ЭУ малой мощности. При больших мощностях установки (порядка 0,5 кВт и более) целесообразно использовать осевые или центробежные вентиляторы, так как с одним электродвигателем можно решить задачу подвода воздуха для рабочей реакции в электродной зоне ХИТ и задачу охлаждения ЭУ. В этом случае на одном валу электродвигателя (с двумя выходными концами вала) можно расположить два рабочих колеса воздушных насосов, обеспечивающих требуемые давления и расходы. Масса одноприводного ЭПВ будет меньше, а к.п.д. - выше по сравнению с отдельными ЭПВ для каждой из воздушных систем.

Применительно к ЭПВ на более высокие расходы представляет интерес разрабатываемая в настоящее время на предприятиях авиапрома схема воздушного электрокомпрессора с подшипниками на воздушной смазке. В этом варианте конструктивного решения ЭПВ можно использовать высокооборотный электропривод ($n = 30000 \dots 50000$ об/мин) и уменьшить массу всего агрегата. Такой компрессор целесообразно использовать для снабжения воздухом мощной (10...50 кВт) ЭУ с несколькими блоками ЭХГ

Организация очистки электролита от продуктов реакции

Анализ работоспособности ВА ХИТ показывает, что время непрерывной работы и ресурс ЭУ ограничивается пассивацией алюминиевого анода и разрушением газодиффузионного катода образующимися растворенными и твердыми продуктами реакции. Добиться улучшения характеристик элемента и увеличения ресурса ЭУ можно,

организовав очистку электролита от растворенных алюминатов и твердого гидроксида алюминия.

При длительной непрерывной работе ЭУ с ВА ХИТ возможны различные варианты организации очистки электролита от растворенных алюминатов, связанные с непрерывностью или дискретностью (периодичностью) процесса декомпозиции (разложения пересыщенных алюминатных растворов), наличием или отсутствием кристаллизатора, совмещением его конструктивно с агрегатами очистки от твердых продуктов реакции.

В электролите ЭУ постоянно содержится небольшое количество кристаллов гидроксида алюминия, обычно 1...2 %, не влияющие на параметры ВА батареи и характеристики агрегатов циркуляции, и удалить которые достаточно сложно. Поэтому одним из методов непрерывной очистки электролита является использование декомпозиции, протекающей непосредственно в контуре циркуляции электролита.

Мы провели оценку оптимальных параметров электролитного контура для такого случая. Требуемое для декомпозиции время должно быть обеспечено соответствующими длинами пути электролита в контуре циркуляции и скоростями его движения. Выполненные оценки показывают, что при больших скоростях декомпозиции, соответствующих высоким концентрациям растворенного алюминия (степень пересыщения раствора 1,5 и более), процесс кристаллизации успевает происходить в контуре циркуляции электролита [4].

Для снижения концентрации растворенного алюминия можно увеличить количество затравки - твердого гидроксида алюминия - в электролите, что, однако, неизбежно приведет к существенному увеличению энергетических затрат на прокачку электролита и снижению ресурса и надежности работы агрегатов ЭУ. Поэтому в некоторых случаях для интенсификации процесса очистки электролита необходимо применение специального устройства - кристаллизатора, в котором возможно создание требуемых концентраций затравки. Скорость декомпозиции в кристаллизаторе зависит от нескольких параметров (температуры, концентрации щелочи и алюминия, количества затравки). Выбор оптимальной конструкции и схемы работы кристаллизатора также во многом определяется характеристиками и условиями эксплуатации ЭУ, поэтому для определения минимальной массы и размеров кристаллизатора должна проводиться многопараметрическая оптимизация с учетом заданных характеристик.

Как уже было сказано, при длительной работе ЭУ с ВА ХИТ, помимо кристаллизации растворенных алюминатов, необходимо организовать очистку электролита от образующегося мелкодисперсного порошка гидроксида алюминия, так как увеличение его концентрации снижает параметры ВА элементов, ухудшает работу насосов, прокачивающих электролит, и существенно снижает ресурс их работы, а возможное высаживание порошка в трубопроводах и агрегатах приводит к снижению надежности ЭУ.

Для очистки электролита от твердой фазы возможно использование трех типов агрегатов: отстойников, фильтров и центробежных сепарирующих устройств. Наиболее простым агрегатом очистки электролита является отстойник, в котором отделение кристаллов гидроксида алюминия происходит под действием силы тяжести. Скорость осаждения частиц в зависимости от их диаметра и с учетом силы сопротивления в этом случае можно определить по формуле Стокса. При этом предполагается, что частицы осаждаются независимо друг от друга, границы осаждения нет, осаждение свободное, скорость осаждения зависит от размеров частиц [5-6].
Время осаждения частиц определенного диаметра составляет:

$$t_{oc} = h/V_{oc} \quad (10)$$

где h - высота уровня суспензии в отстойнике,

V_{oc} - скорость осаждения частиц.

С другой стороны, время нахождения суспензии в отстойнике зависит от его длины и скорости течения раствора. Для работы на заданном режиме необходимо, чтобы время осаждения частиц было больше или равно времени нахождения суспензии в отстойнике. Из этих соображений можно получить зависимость геометрических параметров отстойника от расхода суспензии и скорости осаждения частиц и, соответственно, их размеров.

Основным недостатком описанного агрегата очистки электролита является невозможность его применения в условиях сильных вибраций и ускорений.

Более универсальными эксплуатационными характеристиками

обладают системы очистки электролита с использованием механических фильтров. В настоящее время существует большое количество различных фильтров, применяемых в технике [5-7]. Для использования в ЭУ с ВА ХИТ они должны удовлетворять следующим требованиям:

- производить очистку электролита с низким гидравлическим сопротивлением потоку электролита при высоких концентрациях твердой фазы (более 10...15 мас %);
- обеспечивать длительную работоспособность системы очистки при больших массах высаживаемой твердой фазы;
- иметь возможность производить быструю регенерацию;
- обладать небольшими массой и объемом.

В то же время фильтры ВА ХИТ не должны производить полной очистки электролита от твердой фазы для того, чтобы кристаллы гидроксида алюминия проходящие через фильтры, являлись затравкой для кристаллизации в контуре растворенного алюминия. Наиболее полно этим требованиям отвечают разработанные нами патронные фильтры с тканевым покрытием, стойким в щелочи [5].

На основе большого практического опыта, накопленного при работе с фильтрами [5,6], была составлена методика расчета фильтрационного агрегата и определены площадь фильтрования и конструкция экспериментального фильтра патронного типа. В качестве фильтрующей стойки использовалась полипропиленовая холстопрошивная ткань.

Большой интерес представляет также возможность применения в

качестве агрегатов очистки электролита центробежных сепарирующих устройств. Анализ литературных данных [8-11] показывает, что наиболее оптимальными характеристиками обладают гидроциклоны, отличающиеся простотой конструкции, высокой надежностью и эффективностью.

Аппараты циклонного типа нашли широкое применение в различных областях техники, таких как газоочистка, сжигание топлива, разделение пылевидных материалов на фракции и т.п., а также при отделении твердой фазы от жидкости. В настоящее время существует большое количество работ посвященных изучению гидроциклонов, однако до сих пор не создано полной теории, описывающей процесс разделения суспензии на фракции, что объясняется влиянием на него более 30-ти конструктивных и рабочих факторов [8,10].

В результате тангенциального ввода в гидроциклон суспензия получает сильное вращательное движение, и на частицы твердой фазы начинает действовать центробежная сила. Под действием центробежной силы частицы двигаются в радиальном направлении, в результате чего на них действует сила сопротивления. Разность этих двух сил определяет, в основном, процесс разделения суспензии на фракции. Параметром, значительно влияющим на работу гидроциклона, является размер сепарируемых частиц.

Теория поверхности раздела и равновесной орбиты [8-10] показывает, что у каждой частицы определенного размера существует орбита, на которой она находится в равновесии под действием центробежной силы и силы сопротивления. Если радиус этой орбиты больше радиуса поверхности

раздела, то частицы выводятся в сгущенную фракцию, если меньше - в осветленную. Существуют такие частицы, для которых равновесная орбита совпадает с поверхностью раздела, т.е. эти частицы с равной вероятностью могут попасть как в осветленную, так и в сгущенную фракцию. Следовательно, зная спектр распределения сепарируемых частиц по размерам, можно определить основные геометрические параметры гидроциклона.

Параметром определяющим эффективность работы гидроциклона является величина степени очистки, которая равна:

$$f = (C_{исх} - C)/C_{исх} \quad (11)$$

где $C_{исх}$, C - соответственно концентрации твердой фазы в исходной и осветленной суспензиях.

Большой интерес представляет также возможность совместного использования гидроциклона с другими агрегатами очистки, например, комбинации гидроциклон - отстойник или гидроциклон - фильтр, что существенно упрощает работу данных агрегатов.

Таким образом, по результатам работы можно сделать следующие выводы.

1. Схемы ЭУ на основе ВА ХИТ будут существенно различны в зависимости от уровня мощности, примененного электролита и способа организации рабочего процесса.

2. В подавляющем большинстве случаев ЭУ на основе ВА ХИТ

целесообразно строить по схеме без корректировки состава электролита.

3. На основании анализа возможных схем ЭНА, предназначенных для ЭУ на основе ВА ХИТ, предъявляемых к ним требований по расходу и напору рабочих жидкостей, а также по свойствам многофазной системы, образующейся при работе источника, показано, что оптимальным следует признать герметичный необслуживаемый ЭНА с асинхронным приводом переменного тока при совмещении функций ротора электродвигателя и рабочего колеса насоса. Во многих случаях это может быть шнековый насос с гидродинамическими опорами.

4. Рассмотрен важнейший вопрос очистки электролита от продуктов реакции, который во многом определяет ресурсные и энергетические возможности системы.

5. Применение рассмотренного способа организации рабочего процесса целесообразно для расчета, проектирования и создания ЭУ на основе ВА ХИТ, которые могут быть очень эффективны как в авиационной, так и в космической технике.

Библиографический список

1. Ключкова Л.Л., Севрук С.Д. Электрохимические генераторы для энергоустановок со сложным графиком энергопотребления. - В кн.: Рабочие процессы в энергетических и двигательных установках. Тем. сб. научн. тр. ин-та. Вып. 320. М.: МАИ, 1975, с. 17 – 22
2. Ключкова Л.Л., Севрук С.Д. Оценка целесообразности применения

буферных батарей в составе энергетической установки, обеспечивающей сложный график нагрузки. - В кн.: Тезисы докладов II Всесоюзной конференции “Электрохимическая энергетика”. М., 1984, с. 97 – 98

3. Севрук С.Д. Оценка целесообразности применения и выбор наиболее эффективных буферных батарей для энергетических установок, обеспечивающих сложный график нагрузки. - В кн.: Процессы в элементах энергетических установок ЛА. Тем. сб. научн. тр. ин-та. М.: МАИ, 1985, с. 57 – 61

4. Перченков А.В. Исследование процессов в кислородно - алюминиевых химических источниках тока и системах энергетических установок, рассчитанных на длительную работу. Дисс. к.т.н., - М.: МАИ, 1996

5. Малиновская Т.А., Коробинский И.А., Кирсанов О.С., Рейнфорд И.А. Разделение суспензий в химической промышленности. - М: Химия, 1983

6. Жужиков В.А. Фильтрация. Теория и практика разделения суспензий. - М.: Химия, 1980

7. Harvath L. Equation of Constant Pressure Cake Filtration. - Technical University of Heavy Industry, 1977, V.A. - 33, N3-4, pp. 119-136

8. Svarovsky L. Hydrocyclones in solid liquid separation. - London, 1977, p. 101-123

9. Ritema K. The mechanism of the separation of finely dispersed solids in cyclones. Amsterdam: Elsevier, 1961

10. Bredly D. The hydrocyclone. - London: Pergamon Press, 1965