

УДК 621.3.029.8; 621.356; 541.136.3

## АВТОНОМНАЯ ЭНЕРГОУСТАНОВКА ДЛЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ИСКУССТВЕННОГО СЕРДЦА НА БАЗЕ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

А.И. Груздев, А.В. Кузовков, Н.И. Куликов\*, А.Д. Куприянов\*, Д.В. Сухов\*

*ОАО «Авиационная электроника и коммуникационные системы», Москва, Россия*

*\* Московский авиационный институт (государственный технический университет), Россия*

Поступила в редакцию 15.12.04 г.

Рассмотрены принципы построения и алгоритм функционирования источника электропитания для имплантируемого электромеханического искусственного сердца. Приведены результаты его стендовых и натурных испытаний. Показаны преимущества построения источника питания на базе литий-ионных и литий-полимерных аккумуляторов.

The principles of the construction and the algorithm of the operation of the power supply source for the implanted electromechanical artificial heart have been considered. The results of its stand-based and real-life tests are included. Also the advantages of the construction of the power supply on the basis of lithium-ion and lithium-polymer accumulators are eliminated.

### ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что в развитых странах мира сердечно-сосудистые заболевания уносят человеческие жизни больше, чем все остальные заболевания вместе взятые. Единственной возможностью помощи больным с сердечной недостаточностью, как острой, так и хронической, является пересадка сердца. В последние годы в мире наблюдается тенденция увеличения количества операций по имплантации механических аппаратов, поддерживающих сердечную деятельность, так как пересадка донорского органа связана со многими неразрешимыми биологическими и социальными проблемами и не может обеспечить всех нуждающихся [1].

Кроме того, весьма перспективна технология двухэтапной трансплантации сердца, при которой проводится операция по временной имплантации системы механической поддержки сердца на период подготовки к пересадке сердца. Она позволяет продлить период ожидания донора на достаточно длительный срок (до нескольких лет). Для обеспечения условий жизни пациента близких к нормальным (нахождение вне клиники, возможность свободного передвижения без ограничения по месту и времени, нормальный сон и др.) необходимо обеспечить автономное бесперебойное электропитание электромеханического искусственного сердца (ЭМИС). При этом масса и объем аппаратуры, обеспечивающей автономное энергопитание, должны быть минимизированы [2].

### КОНСТРУКЦИЯ ЭМИС И ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМЕ ЕЕ ЭНЕРГОПИТАНИЯ

Основным конструктивным элементом ЭМИС является искусственный желудочек сердца (ИЖС) с жесткой внешней оболочкой и эластичной мембра-

ной с его внешней стороны. На мембрану воздействует толкатель электромеханического привода. Толкатель совершает возвратно-поступательные движения, увеличивая или сокращая объем крови внутри ИЖС. При этом через выходной и входной искусственные клапаны производится выброс крови в аорту (фаза систолы) или же повторное наполнение желудочка венозной кровью (фаза диастолы). Этот процесс, циклически повторяясь, обеспечивает кровоток в большом круге кровообращения пациента.

В качестве привода толкателя в ЭМИС использован вентильный двигатель с преобразователем вращательного движения ротора двигателя в возвратно-поступательное движение толкателя мембраны на базе несоосной роliko-винтовой передачи. Вентильный двигатель имеет режим работы со значительными динамическими нагрузками, связанными с изменением направления вращения, причем максимальная скорость вращения ротора двигателя может достигать 8000 об/мин.

Работу двигателя обеспечивает электронный блок управления (БУИС). Алгоритм управления двигателем направлен на реализацию закона (механизма) Франка–Старлинга, который формулируется для сердца как зависимость энергии сокращения насоса от венозного притока или давления наполнения [2]. При этом ИЖС работает в режиме полного заполнения и полного выброса (режим постоянного ударного объема) с переменной частотой сокращения. Для минимизации энергопотребления системы, а также повышения точности отработки задающего воздействия, управление движением толкателя осуществляется по гармоническому (синусоидальному) закону.

В связи с вышеописанными особенностями функционирования ЭМИС ее энергопотребление носит ярко выраженный импульсный характер (рис.1).

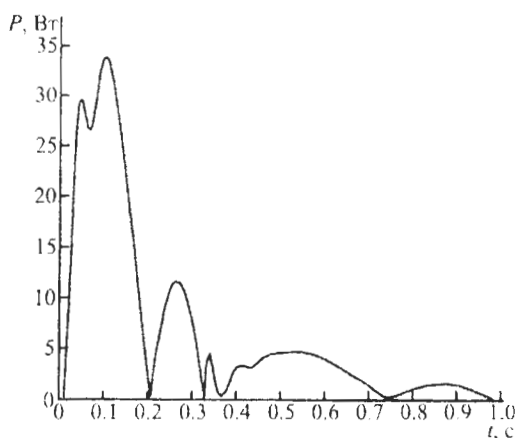


Рис. 1. Зависимость мощности потребления ЭМИС от времени при ЧСС = 60 ударов/мин и  $T_{\text{сис}}/T_{\text{диас}} = 1/1$

При этом средний уровень энергопотребления зависит от режима работы системы: частоты сердечного сокращения (ЧСС) и соотношения продолжительностей фазы систолы и фазы диастолы ( $T_{\text{сис}}/T_{\text{диас}}$ ) (рис.2). Для нормального жизнеобеспечения пациента необходимо обеспечить работу ЭМИС с ЧСС в диапазоне от 40 до 120 ударов/мин. Для реализации таких режимов работы ЭМИС необходимо иметь источник электропитания со средней активной мощностью от 8 до 35 Вт при энергопотреблении в импульсе (до 60 мс) мощности до 120 Вт.

Кроме мощностных характеристик основными требованиями к автономной энергоустановке (АЭИС), предназначенной для питания ЭМИС, являются: бесперебойность электропитания и безотказность работы энергоустановки, а также время автономной работы (включая и время автономной работы ЭМИС в ситуации отсутствия централизованного электропитания). Важность этих требований очевидна:

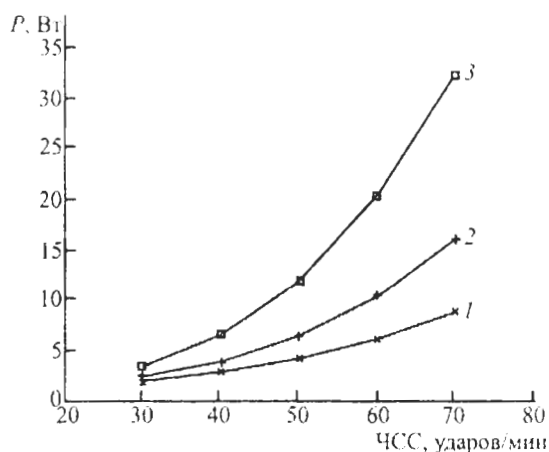


Рис. 2. Зависимость мощности потребления ЭМИС от ЧСС при соотношении продолжительностей  $T_{\text{сис}}/T_{\text{диас}}$ , равном: 1 — 1/1, 2 — 1/2, 3 — 1/3

прерывание электропитания даже на несколько секунд может привести к необратимым последствиям для пациента.

## КОНСТРУКЦИЯ И АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АЭИС

АЭИС состоит из носимой и стационарной частей. Носимая часть АЭИС включает основной источник тока (ОИТ) и резервный источник тока (РИТ), размещенные в двух контейнерах. Они через электрические разъемы подключены к контейнеру с БУИС, который обеспечивает заданный режим работы ЭМИС (рис.3). В комплект АЭИС входят два ОИТ, подключаемые к БУИС поочередно.

В стационарную часть входят:

- сетевой источник питания (СИП), обеспечивающий электропитание ЭМИС от стационарной сети переменного тока 220 В; он имеет защиту от токовых перегрузок во входной и выходных цепях и стабилизирует выходное напряжение на уровне 16.0 В;

- сетевое зарядное устройство (СЗУ), обеспечивающее заряд ОИТ при питании от стационарной сети переменного тока 220 В;

- автономное зарядное устройство (АЗУ), выполненное на базе металловоздушного источника тока с механически перезаряжаемыми магниевыми анодами (МВИТ); оно обеспечивает заряд ОИТ при отсутствии сетевого напряжения питания; имеется возможность работы ЭМИС в режимах с мощностью потребления ниже 15 Вт при непосредственном питании от МВИТ; нужный уровень напряжения при этом обеспечивает электронный преобразователь напряжения, встроенный в МВИТ.

МВИТ (рис.4) состоит из корпуса с тремя анодно-катодными блоками, бака и электронного преобразователя напряжения. Корпус имеет две защелки для крепления на баке, решетки для прохода воздуха вовнутрь к поверхностям газодиффузион-

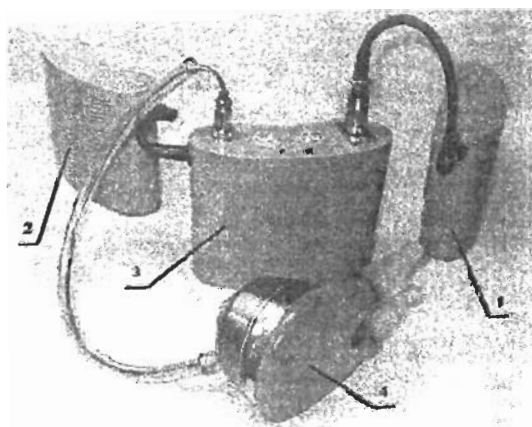


Рис. 3. Носимая часть АЭИС, подключенная к ЭМИС: 1 — ОИТ, 2 — РИТ, 3 — БУИС, 4 — ЭМИС



Рис. 4. Металло-воздушный источник тока из комплекта АЭИС

ных катодов, токораспределительную плату, закрываемую крышкой, и разъем для подключения преобразователя напряжения. Каждый анодно-катодный блок образует две гальванические пары «катод-анод», разделенные воздушной камерой. Для исключения электрической связи между ними через электролит, блок по своему периметру имеет уплотнение из пористого полиэтилена. Аноды с резиновыми уплотнительными кольцами крепятся на токораспределительной плате гайками. Бак представляет собой емкость, имеющую три отсека для каждой анодно-катодной пары. Для работы МВИТ используется 15%-ный раствор NaCl в воде, объем одной заправки - 1,4 л электролита. Емкость одного комплекта анодных пластин не менее 100 А·ч. Время работы на одной заправке электролита порядка 10 часов. Максимальная мощность МВИТ около 20 Вт. Масса в заправленном состоянии - 4 кг.

Основной источник тока (рис.5) представляет собой батарею из четырех цилиндрических литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) емкостью 10 А·ч и микропроцессорный блок ее контроля и управления (БКУ). Выравнивание напряжения отдельных ЛИА в батарее производится при ее заряде от СЗУ (или АЗУ). Для этого при подключении ОИТ к зарядному устройству БКУ обеспечивает перекоммутацию ЛИА в батарее с последовательной схемы на параллельную схему. Кроме того, БКУ ОИТ контролирует напряжения каждого ЛИА и отключает ОИТ от нагрузки или зарядного устройства при выходе напряжения любого ЛИА из заданного диапазона.



Рис. 5. Основной источник тока, подключенный к сегевому зарядному устройству

Резервный источник тока изготовлен на базе батареи из четырех призматических ЛИА емкостью 2,0 А·ч. БКУ РИТ также выполнен на базе микропроцессора. Он контролирует напряжение отдельных ЛИА и обеспечивает индивидуальный подзаряд ЛИА при снижении их напряжения ниже 3,9 В, одновременно выравнивая напряжение в батарее. Кроме того, в этом контейнере находится плата управления источниками питания (ПУИП), обеспечивающая: подключение РИТ к БУИС при снижении напряжения ОИТ ниже 12 В, отключение РИТ от нагрузки при подключении к ней ОИТ (или СИП) с напряжением выше 16 В, формирование сигналов световой индикации (два светодиода с четырьмя градациями свечения) и аварийной звуковой сигнализации глубины разряда РИТ и ОИТ.

Конструкция АЭИС обеспечивает бесперебойное электропитание ЭМИС без непосредственного подключения к стационарной электросети. Два ОИТ поочередно подключаются к БУ ЭМИС через электрический разъем и заряжаются от ЗУ или МВИТ. При отключении ОИТ питание ЭМИС автоматически осуществляется от РИТ. Вместо ОИТ к БУ ЭМИС может подключаться СИП, который обеспечивает его питание от стационарной сети 220 В. Время работы ЭМИС от СИП не ограничено.

Носимая часть АЭИС в автономном режиме работает по следующему алгоритму:

- при понижении напряжения на ОИТ ниже 13,6 В ЭМИС автоматически переходит на работу от РИТ;
- подается звуковой сигнал, который можно отключить нажатием на кнопку, расположенную на верхней крышке РИТ (звуковой сигнал невозможно отключить кнопкой только в случае полного разряда РИТ);
- работа от резервного источника продолжается до полного разряда РИТ или до момента подключения к БКУ источника питания с напряжением выше 16,0 В (полностью заряженного ОИТ или СИП); при этом ЭМИС переключается на работу от этих источников питания и начинается подзаряд ЛИА РИТ, если их напряжение ниже 3,9 В;
- подзаряд ЛИА РИТ прекращается при достижении на них напряжения 4,15 В.

#### СИСТЕМНЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ АЭИС

Основным критерием при оценке надежности работы АЭИС является обеспечение бесперебойности электропитания ЭМИС как в штатных режимах работы, так и в нештатных или аварийных ситуациях, связанных с отказами в блоках АЭИС и отключением напряжения в стационарной электросети. В штатных режимах работы АЭИС бесперебойность электропитания достигается аппаратно путем автоматического переключения электропитания (плата

ПУИП) на РИТ в случае отключения (или отказа) ОИТ или СИП.

Обеспечение предупреждения или парирования единичных отказов основных блоков АЭИС достигается следующими методами.

1. Отказ платы управления источниками питания:

1.1) возможность замены разряженного ОИТ в ручном режиме при параллельной работе с РИТ;

1.2) возможность замены разряженного ОИТ в ручном режиме при параллельной работе с СИП.

2. Отказ основного источника тока:

2.1) использование в ОИТ литий-ионных аккумуляторов, не требующих обслуживания в течение всего срока службы, отказ которых в большинстве случаев не носит катастрофический характер, а связан с относительно медленным ухудшением электрических параметров (снижение электрической емкости, повышение внутреннего сопротивления) [3];

2.2) повышение срока службы батареи ЛИА за счет:

2.2.1) использования системы контроля напряжения и температуры отдельных аккумуляторов в батарее при ее заряде и разряде [4];

2.2.2) выравнивания степени заряженности отдельных аккумуляторов в батарее путем ее перекоммутации при заряде с последовательной схемы на параллельную схему;

2.3) наличие в комплекте АЭИС двух ОИТ (при апробации на человеке – не менее трех);

2.4) возможность использования СИП вместо ОИТ.

3. Отказ резервного источника тока:

3.1) использование в РИТ литий-полимерных аккумуляторов, имеющих более высокие эксплуатационные характеристики по сравнению с ЛИА, прежде всего в части надежности и безопасности работы [5];

3.2) повышение срока службы батареи ЛПА за счет:

3.2.1) использования системы контроля напряжения и температуры отдельных аккумуляторов в батарее при ее заряде и разряде;

3.2.2) выравнивания степени заряженности отдельных аккумуляторов в батарее аппаратными методами (блок подзаряда);

3.3) возможность замены разряженного ОИТ в ручном режиме при параллельной работе со вторым ОИТ;

3.4) возможность замены разряженного ОИТ в ручном режиме при параллельной работе с СИП.

4. Отказ систем контроля и управления ОИТ и РИТ:

4.1) наличие функции самотестирования и автоматического перезапуска программы микропроцессора при возникновении сбоев в программном обеспечении;

4.2) наличие аварийной сигнализации (световой и звуковой) при сбоях и отказах СКУ и возможность перезапуска программы микропроцессора в ручном режиме;

4.3) использование в БКУ электрических схем, не влияющих на работоспособность силовых цепей аккумуляторных батарей при отказе электронных блоков.

5. Отказ сетевого зарядного устройства:

5.1) в экспериментах на человеке наличие в комплекте АЭИС не менее двух СЗУ;

5.2) возможность заряда ОИТ от МВИТ;

5.3) возможность неограниченно долгой работы ЭМИС от СИП.

6. Отказ сетевого источника питания:

6.1) возможность неограниченно долгой работы ЭМИС от комплекта ОИТ при их заряде от СЗУ.

Автономная работа АЭИС при аварии (отключении) в стационарной сети переменного тока обеспечивается следующими способами:

– зарядом ОИТ от МВИТ;

– работой ЭМИС при питании непосредственно от МВИТ;

– большой энергоемкостью аккумуляторных батарей в комплекте АЭИС (время автономной работы ЭМИС без подзаряда ОИТ не менее 12 часов).

## РЕЗУЛЬТАТЫ СТЕНДОВЫХ И НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭМИС

Испытания ЭМИС с целью подтверждения технических характеристик АЭИС проводились на специально созданном стенде, а медико-биологические испытания ЭМИС – на животных. Широкие функциональные возможности, обеспечиваемые блоком управления ЭМИС, а также приемлемые для имплантации габариты и вес системы, позволили провести более 20 успешных операций (рис.6).

Для электропитания ЭМИС на первом этапе экспериментов использовался источник бесперебойного питания (ИБП) на базе никель-металлогидридных аккумуляторов (НМГА), на втором этапе – рассматриваемая в настоящей статье АЭИС

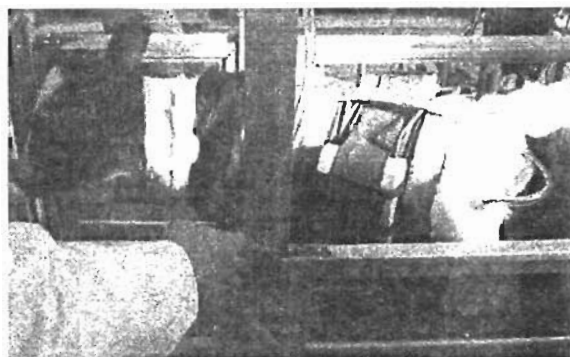


Рис 6. Медико-биологические испытания ЭМИС

на базе литий-ионных аккумуляторов. Носимые части обоих источников энергопитания были размещены в унифицированных пластиковых контейнерах, имеющих габариты (ДхШхВ) – 170х45х130 мм и вес около 200 г. Необходимо отметить, что объем контейнера для размещения РИТ на базе ЛПА мог быть уменьшен на 40–45%.

Как показали стендовые и медико-биологические испытания, оба использованные источника электропитания обеспечивают функционирование ЭМИС во всех штатных режимах работы. Отказов в их аппаратной части и программном обеспечении не наблюдалось.

Основные технические и эксплуатационные характеристики использованных при испытаниях источников электропитания ЭМИС приведены в таблице.

Основные технические и эксплуатационные характеристики носимой части источников бесперебойного электропитания ЭМИС

| Техническая характеристика                                                        | АЭИС на базе ЛИА | ИБП на базе НМГА |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|
| Количество ОИТ в комплекте, шт.                                                   | 2                | 2                |
| Максимальное разрядное напряжение, В                                              | 16.0             | 13.8             |
| Минимальное разрядное напряжение, В                                               | 12.5             | 11.0             |
| Номинальная емкость, А·ч                                                          |                  |                  |
| основной источник тока                                                            | 10.0             | 6.5              |
| резервный источник тока                                                           | 2.0              | 3.0              |
| Емкость буферного конденсаторного накопителя, Ф                                   | нет              | 0.132            |
| Номинальная мощность, Вт                                                          |                  |                  |
| средняя                                                                           | 36               | 36               |
| импульсная                                                                        | 120              | 120              |
| Время автономной работы ЭМИС при средней мощности потребления 36 Вт/ч             |                  |                  |
| от основного источника тока                                                       | 4.0              | 2.1              |
| от резервного источника тока                                                      | 0.8              | 1.0              |
| Сервисные возможности:                                                            |                  |                  |
| - индикация степени заряженности ОИТ и РИТ;                                       | Да               | Да               |
| - аварийная сигнализация;                                                         | Да               | Да               |
| - поэлементный контроль напряжения и температуры в ОИТ и РИТ;                     | Да               | Нет              |
| - выравнивание напряжения аккумуляторов в ОИТ и РИТ                               | Да               | Нет              |
| Требования к обслуживанию:                                                        |                  |                  |
| - необходимость доразряда ОИТ, связанная с «эффектом памяти» [5];                 | Нет              | Да               |
| - периодический контроль и выравнивание степени заряженности аккумуляторов в ОИТ, | Нет              | Да               |
| - периодическое проведение зарядно-разрядных восстановительных циклов для РИТ     | Нет              | Да               |
| Оценка надежности работы:                                                         |                  |                  |
| основного источника тока                                                          | Высокая          | Средняя          |
| резервного источника тока                                                         | Высокая          | Низкая           |
| системы в целом                                                                   | Высокая          | Низкая           |
| Вес, кг                                                                           |                  |                  |
| контейнер с ОИТ                                                                   | 1.3              | 2.0              |
| контейнер с РИТ                                                                   | 0.6              | 1.3              |

Как видно из таблицы, АЭИС на базе ЛИА:

- имеет расширенные функциональные возможности;
- обладает высокой надежностью работы – обеспечения бесперебойности электропитания;
- практически не требует никакого обслуживания;
- ОИТ при меньшей (в 1.5 раза) массе имеет в 2 раза большую энергоемкость.

Необходимо также отметить, что при штатной работе ЭМИС резервный источник тока должен функционировать в режиме периодических неглубоких (3–5%) разрядов. В случае возникновения нештатных или аварийных ситуаций РИТ гарантированно должен обеспечить работу ЭМИС на весь период переключения основных источников питания. Полностью реализовать эти требования к РИТ на базе НМГА представляется нам достаточно проблематичным. В то же время надежность работы батареи литий-полимерных аккумуляторов, имеющей систему поэлементного контроля напряжения и температуры, а также поэлементный подзаряд аккумуляторов, представляется нам достаточно высокой.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и испытана автономная энергоустановка для имплантируемого электромеханического искусственного сердца на базе литий-ионных и литий-полимерных аккумуляторов.

Применение системных методов повышения надежности работы при конструировании энергоустановки существенно повысило надежность ее работы и позволило гарантировать бесперебойность электропитания ЭМИС как при единичных отказах блоков, входящих в ЭМИС, так и при многочасовых отключениях в стационарной электросети переменного тока.

По сравнению с источником бесперебойного электропитания аналогичной мощности на базе никель-металлогидридных аккумуляторов, использование в энергоустановке литий-ионных и литий-полимерных аккумуляторов в два раза увеличило ее энергоемкость при сокращении массы носимой части в 1.7 раза.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Искусственное сердце / В.И. Шумаков и др. / Отв. ред. Б.В. Петровский. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1980.
2. Бокерия Л.А., Шаталов К.В., Свободов А.А. Системы вспомогательного и заместительного кровообращения. М.: Изд-во науч. центра сердечно-сосудистой хирургии им. А.И. Бакулева РАМН, 2000.
3. Кедринский И.А., Яковлев В.Г. Li-ионные аккумуляторы. Красноярск: ИПК «Платина», 2002.
4. Орлов С. // Электронные компоненты. 2000. №4. С.54.
5. Скундин А.М., Ефимов О.Н., Ярмоленко О.В. // Успехи химии. 2002. Т.71, №4. С.378.