

- life-support interventional trial (ORBIT) // Resuscitation. 2005. № 66. PP. 149-157.
22. Qu F., Nikolski V.P., Wollenzier B.R., Efimov I.R. Comparison of three biphasic waveforms: Gurvich waveform is more efficient / Proc. of the Second Joint EMBS/BMES Conference. Houston, TX, USA. October 23-26, 2002. PP. 1439-1440.

Вячеслав Александрович Востриков,
д-р мед. наук, ведущ. научный сотрудник,
Первый московский государственный
медицинский университет им. И.М. Сеченова,
г. Москва,
Борис Борисович Горбунов,
ведущий инженер-электроник,
Алексей Николаевич Гусев,
ведущий инженер-электроник,
Дмитрий Владимирович Гусев,
инженер-электроник,
Московский государственный институт
электронной техники
(технический университет),
г. Зеленоград,

Георгий Пинкусович Иткин,
д-р биолог. наук, зав. лабораторией,
Елена Геннадьевна Коньшиева,
канд. биолог. наук, мл. научный сотрудник,
Федеральный научный центр трансплантологии
и искусственных органов
им. акад. В.И. Шумакова,
г. Москва,
Кирилл Андреевич Мамекин,
ведущий инженер-электроник,
Игорь Валерьевич Нестеренко,
ведущий инженер-электроник,
Сергей Васильевич Селищев,
д-р физ.-мат. наук, профессор,
зав. кафедрой биомедицинских систем,
Дмитрий Викторович Тельшиев,
инженер,
Московский государственный институт
электронной техники
(технический университет),
г. Зеленоград,
e-mail: vostricov.v@mtu-net.ru

А.В. Адашкин, К.Н. Дозоров, А.Н. Стиценко, И.А. Филатов, Е.Г. Коньшева, А.Н. Гусев

РАЗРАБОТКА БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ И СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ ИМПЛАНТИРУЕМЫМ НАСОСОМ СИСТЕМЫ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО КРОВООБРАЩЕНИЯ

Аннотация

В данной статье рассмотрены результаты исследований по созданию блока управления имплантируемого насоса левого желудочка сердца, разрабатываемого совместно ФГУ ФНЦТИО им. В.И. Шумакова, МИЭТ и ООО «БИОСОФТ-М». Конечной целью разработки является создание портативной, безопасной и автономной системы ИЛЖС, отвечающей самым высоким требованиям к производству и эксплуатации носимых систем вспомогательного кровообращения (СВК). Освещены вопросы структурной, схемотехнической и программной реализации системы управления имплантируемого осевого насоса (ИОН) СВК искусственного левого желудочка сердца (ИЛЖС).

Разработки по созданию искусственных органов (ИО) и системы вспомогательного кровообращения (СВК) относятся к приоритетному направлению развития современной трансплантологии. Ведущие страны мира проводят широкие научные и лабораторные исследования по внедрению в медицинскую практику СВК [1], обеспечивающих высокий уровень качества жизни пациентов после имплантации ИО, что достигается за счет применения биосовместимых материалов, совершенствования конструкции, внедрения эффективных средств и методов управления подсистемами СВК [2].

Растущая потребность в СВК вызвана острой нехваткой донорских органов и распространенностью тяжелых форм сердечно-сосудистых заболеваний. Частичная или полная замена насосной фун-

кции миокарда средствами СВК крайне актуальна в нейрохирургии, реанимации и реабилитации для пациентов с острыми формами сердечных патологий [3]. Так, только потребность США в СВК составляет около 100 тыс. приборов в год. Учитывая неблагоприятный прогноз роста численности кардиохирургических больных, дефицит СВК будет только увеличиваться.

Разновидностью СВК, получившей широкое развитие в мировой клинической практике, являются искусственные левые желудочки сердца (ИЛЖС), предназначенные для решения следующих задач:

- замены насосной функции сердца у тяжелобольных пациентов в период ожидания донорского органа и подготовки пациента к трансплантации;

- компенсации гемодинамических нарушений в период острой сердечной недостаточности;
- полной замены функций миокарда при наличии противопоказаний к трансплантации донорского сердца.

Широкое распространение в современной трансплантологии получили следующие типы систем ИЛЖС:

- экстракорпоральные: «Thoratec VAD», «ABIOMED BVS5000»®, «Berlin Heart EXCOR», «BioMedicus», «MEDOS»;
- имплантируемые осевые насосы: «DeBakey Assist», «Jarvik2000», «INCOR I»;
- имплантируемые пульсирующие насосы: «Novacor LVAS», «Lion Heart», «TCI» (Heart Mate), «АИИС», «INCOR II»;
- миниинвазивные интрааортальные насосы: «Intraaortic Balloon Pump» (IABP), «Nemopump Cardiac Assist System», «IMPELLA recovery», «IMPELLA acut».

ИЛЖС подключается к сердечно-сосудистой системе и функционируют параллельно с собственным сердцем пациента. Физиологичность функционирования, анатомичность конструкции, надежность, портативность, удобство технического обслуживания и эргономичность управления определяют основные требования к конструкции и функциональным характеристикам системы в целом и ее подсистем в частности. В этой связи особое внимание уделяется созданию безотказных, автономных систем управления ИЛЖС.

Постановка задачи

В штатном режиме эксплуатации разрабатываемая система управления (СУ) должна поддерживать заданную оператором скорость вращения имплантируемого осевого насоса (ИОН) и выполнять сброс тромбообразований за счет изменения по специальному алгоритму мгновенной скорости вращения ротора насоса.

Условия реализации

Система управления двигателем ИОН реализована на базе цифрового ПИ-регулятора со следующими параметрами настройки:

- для нормального режима: $K_p = 1 / 256$;
- $K_i = 1 / 128$; $T = 0,2$ с;
- для режима сброса тромбообразований: $K_p = 0$;
- $K_i = 1 / 16$; $T = 0,05$ с.

Ограничения

Максимальное напряжение, подаваемое на двигатель имплантируемого осевого насоса (ИОН) не превышает 16,8 В, максимально допустимый ток, протекающий через обмотки двигателя, составляет 3 А, максимальная температура окружающей среды – 800 °С. Диапазон регулирования скорости потока крови, создаваемого насосом, составляет от 3 до 9 л/мин. Время установления рабочего режима насоса не превышает 10 с.

Система управления и питания ИОН

На рис. 1 представлены основные функциональные блоки разработанного ИЛЖС. К ним относятся: ИОН, носимый блок управления (НБУ) ИОН, компьютерный блок информации и управления (КБИУ) ИОН и система автономного питания НБУ.

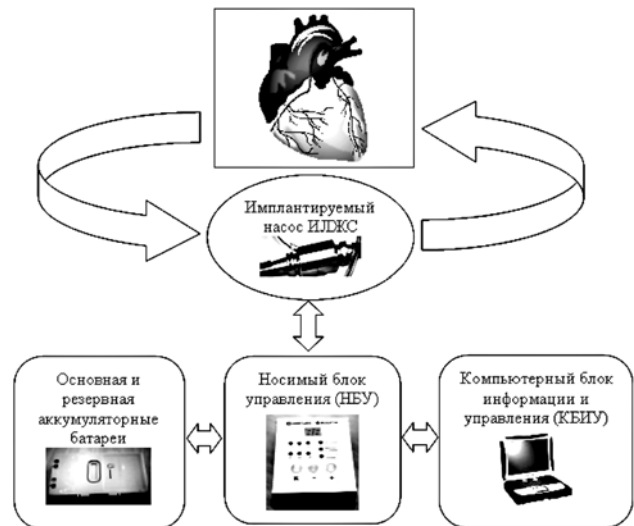


Рис. 1. Функциональная схема СВК ИЛЖС

Системы НБУ и КБИУ образуют систему управления (СУ) ИОН, обеспечивающую регулируемое вспомогательное кровообращение левого желудочка сердца человека с использованием имплантируемого насоса по крови.

КБИУ ИОН

КБИУ представлен компьютером с предустановленной специализированной программой «Ритрах», решающей следующие задачи:

- первоначальный запуск и задание параметров системы вспомогательного кровообращения после имплантации насоса пациенту. На рис. 2 показано окно настройки следующих характеристик ИЛЖС: заданной скорости вращения ротора ИОН, интервала очистки, определяюще-

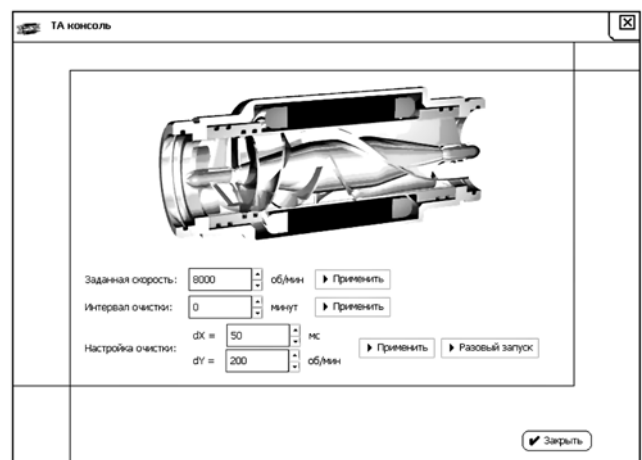


Рис. 2. Окно настройки рабочих характеристик ИОН ИЛЖС

го частоту запуска режима сброса тромбообразований;

- мониторинг функциональных характеристик ИЛЖС в течение интенсивного и рекуперативного лечения пациента, а также для его периодического контроля в ходе выполнения клинических или амбулаторных процедур. На рис. 3 показано окно мониторинга, отображающее графики мгновенных текущих значений потребляемого тока и числа оборотов двигателя ИОН, цифровую индикацию рабочих параметров ИОН и системы энергопитания, диагностические сообщения;

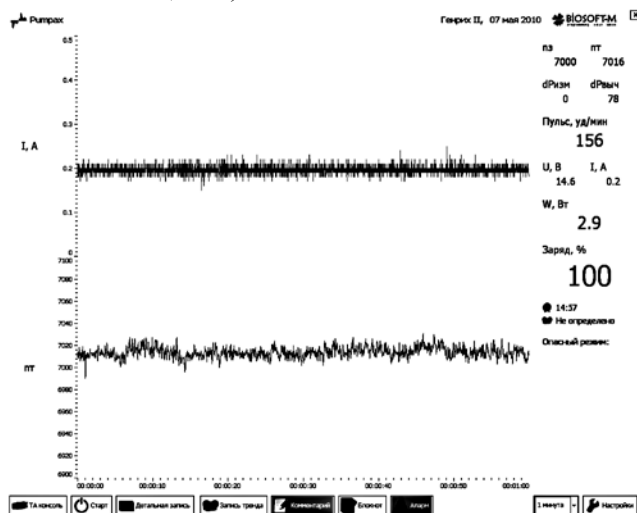


Рис. 3. Рабочее окно программы мониторинга характеристик ВСК ИЛЖС

- получение информации о параметрах и режимах функционирования насоса и аппарата в целом за определенный период эксплуатации.

Основными функциональными возможностями КБИУ являются:

- установка медицинским специалистом заданной скорости оборотов рабочего колеса насоса через НБУ в диапазоне от 5000 до 12000 об/мин;
- запись и хранение в базе данных основных данных пациента (ФИО, возраст, диагноз, биохимические данные до операции и после установки и включения насоса в работу), ассоциированных с его регистрационной картой;
- считывание с НБУ следующей информации:
 - скорость оборотов двигателя насоса;
 - потребляемый двигателем ток (мгновенные значения);
 - напряжение питания;
 - степень разряда питающей батареи;
- отображение на мониторе специализированного компьютера следующих данных:
 - производительность насоса (л/мин);
 - перепад давления на входе и выходе насоса (мм рт. ст.);
 - оставшийся заряд батареи (%);
 - частота сердечных сокращений (уд/мин);
 - потребляемая мощность (Вт);
 - значения потребляемого тока и напряжения питания;

- динамическая кривая потребляемого тока;
- график скорости оборотов двигателя ИОН;
- индекс пульсации $ИП = I_{max} - I_{min} / I_{mean}$;
- сигнал тревоги (мигание красной лампочки и звуковой сигнал);
- настройка состава и внешних характеристик (размер, цвет) отображаемой информации.

НБУ ИОН

НБУ представляет собой экстракорпоральный блок электрического управления и энергопитания ИОН, с которым он соединен посредством чрескожного кабеля. Носимый блок вместе с автономной системой питания ИОН, включающей в себя 2 аккумулятора, размещается на пациенте в специальной сумке и обеспечивает электропитание НБУ в течение не менее 10 ч. Вес носимого блока составляет менее 500 г, габаритные размеры – 120×30×60 мм.

Основная задача НБУ состоит в стабилизации и ручной регулировке заданной скорости вращения насоса в зависимости от состояния пациента (покой, физическая нагрузка, сон). Дополнительно реализуется отображение рабочих характеристик ИОН, выдача пациенту аварийных сообщений при отказах системы, запись сбоев на встроенный модуль памяти, отображение заряда аккумуляторов и их переключение, обеспечение связи со специализированным компьютером для мониторинга и настройки системы ИЛЖС.

Основные функциональные характеристики НБУ:

- длительное управление имплантируемым осевым насосом;
- ручная регулировка пациентом скорости вращения рабочего колеса ИОН в диапазоне от 5000 до 12000 об/мин;
- поддержка заданной скорости вращения ротора насоса в пределах ± 50 об/мин;
- отображение на передней панели блока управления следующей информации:
 - потребляемая мощность в ваттах (диапазон 3...15 Вт, дискретность 1 Вт);
 - степень разряда основной и резервной питающих батарей;
 - вид источника питания (батарея или сетевой источник);
 - сигналы тревоги (мигание красной лампочки и звуковой сигнал);
- подача/отключение сигнала тревоги в случае:
 - снижения заряда батареи ниже 25 %;
 - повышения потребляемой мощности на 25 % (при постоянной скорости вращения рабочего колеса);
 - уменьшения оборотов двигателя относительного заданного на (500 ± 100) об/мин.

Внешний вид корпуса НБУ представлен на рис. 4, а его платы – на рис. 5.

На рис. 6 представлена структурная схема НБУ ИОН, которая включает в себя блоки центрального (Ц), двигательного (Д) и интерфейсного (И) микроконтроллеров (МК), обеспечивающих основные и вспомогательные режимы функциони-

рования НБУ. Каждый блок реализует специфицированный набор функций ИЛЖС и имеет законченное схемотехническое решение. Связь между ДМК и ЦМК реализована по интерфейсу UART (универсальный асинхронный приемопередатчик), аналогично реализуется связь между ЦМК и ИМК. Связь между ИМК и ПК реализована по интерфейсу USB 2.0.

Блок ЦМК НБУ реализует в on-line режиме:

- отображение информации о мощности и скорости вращения ИОН на цифровом индикаторе НБУ;
- индикацию с помощью светодиодов и звукового генератора уровня заряда аккумуляторных батарей и типа источника питания;
- обмен данными с ДМК и ИМК;
- получение текущей скорости и текущего состояния ДМК;



Рис. 4. Внешний вид корпуса прототипа НБУ ИОН ИЛЖС

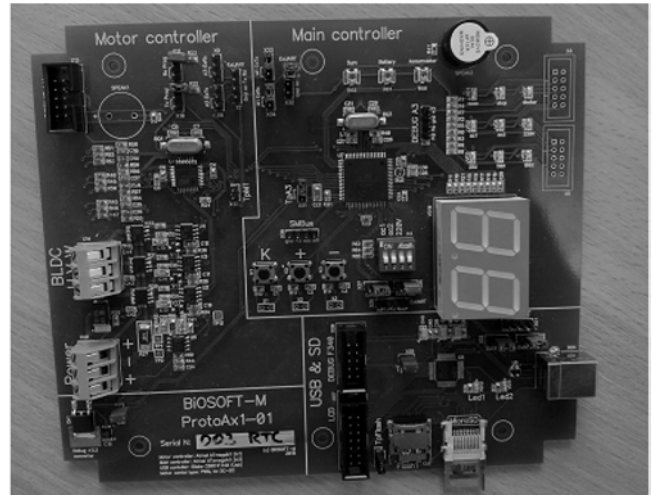


Рис. 5. Печатная плата с электронными компонентами НБУ ИОН ЛЖС

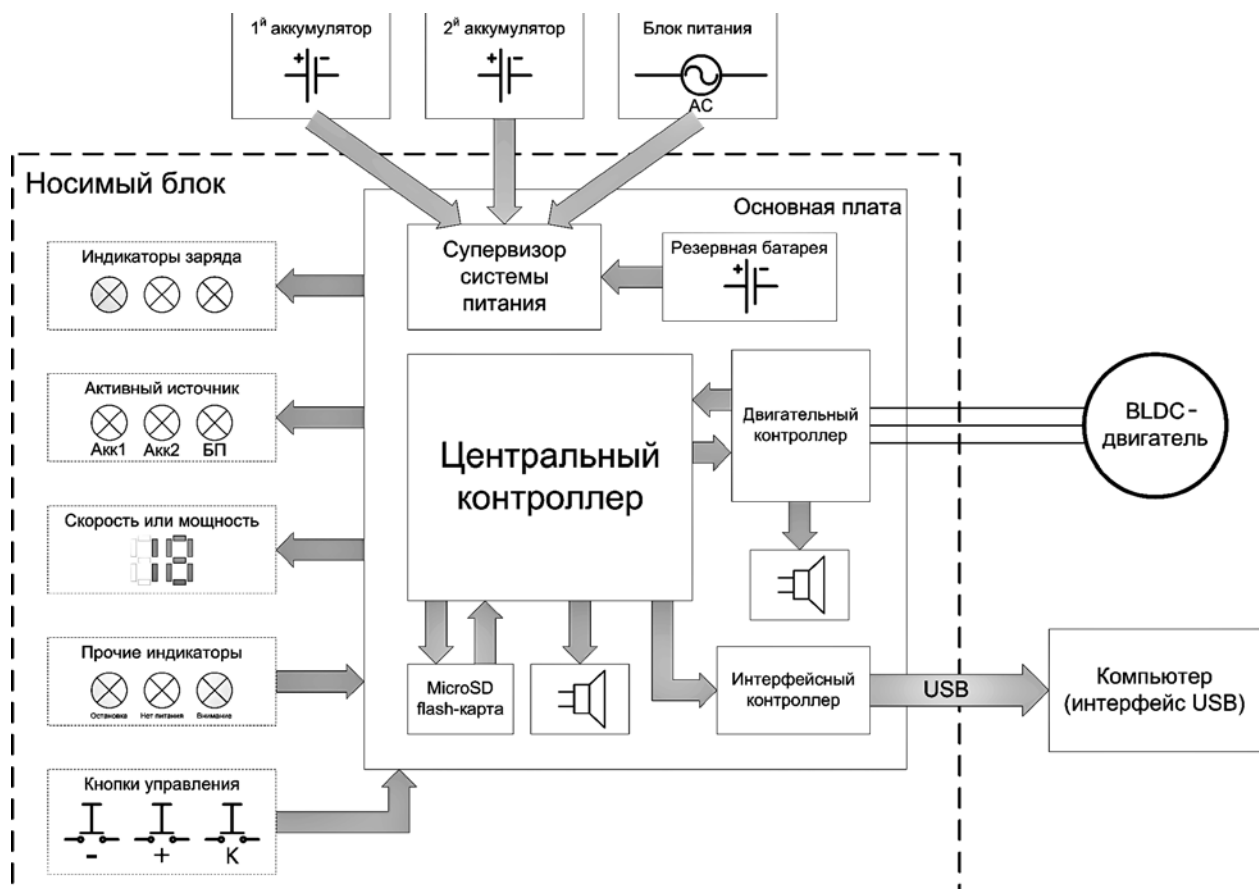


Рис. 6. Структурная схема НБУ ИОН ИЛЖС

- передачу заданной скорости и конфигурационных параметров на ДМК;
- измерение тока и напряжения, потребляемых имплантированным насосом;
- обработку нажатия кнопок;
- сохранение и загрузку заданной скорости и конфигурационных параметров в энергонезависимую память;
- передачу информации о состоянии системы в ИМК;
- прием и обработку команд от ИМК;
- определение отказа ДМК (по сигналам UART);
- реализацию часов реального времени (RTC).

На рис. 7 представлена структура и основные информационные потоки ЦМК НБУ в рабочем режиме.

Схемотехническая реализация ЦМК выполнена на микросхеме «Atmel AVR ATxmega128A3». Связь между ЦМК и аккумуляторами реализована по интерфейсу SMBUS с частотой тактирования 50 кГц и проверкой ошибок пакетов данных (PEC). Структура прошивки ЦМК включает в себя взаимодействующие модули USART, таймеров, тактовых генераторов, АЦП, ввода-вывода интерфейса оператора (кнопки, индикаторы), SMBUS.

ЦМК формирует индикацию для двух режимов эксплуатации НБУ: рабочего и управления скоростью. В первом случае на индикаторе отображается значение мгновенной мощности (Вт), потребляемой

двигателем ИОН, во втором случае – заданная скорость вращения ротора насоса (~1000 об/мин).

Обработка ЦМК команд с кнопок управления на корпусе НБУ реализована следующим образом:

- нажатие любой кнопки активизирует всю систему индикации НБУ на 10 с. По истечении указанного времени индикация переходит в режим ожидания;
- нажатие кнопки «Уменьшить скорость/индикация скорости» и удержание ее в таком состоянии приводит к отображению скорости вращения ротора насоса. Если при этом нажата кнопка «Ключ», то каждое нажатие рассматриваемой кнопки понижает скорость двигателя ИОН на 1000 об/мин. Допускается уменьшение скорости не более чем на 2000 об/мин относительно заданной, которая не может быть в результате регулировки установлена меньше 5000 об/мин;
- нажатие кнопки «Увеличить скорость/индикация резервного аккумулятора» и удержание ее в таком состоянии приводит к отображению уровня заряда резервного аккумулятора. Если при этом нажата кнопка «Ключ», то каждое нажатие рассматриваемой кнопки повышает скорость двигателя ИОН на 1000 об/мин. Допускается увеличение скорости не более чем на 2000 об/мин относительно заданной, которая не может быть в результате регулировки установлена больше 12000 об/мин.

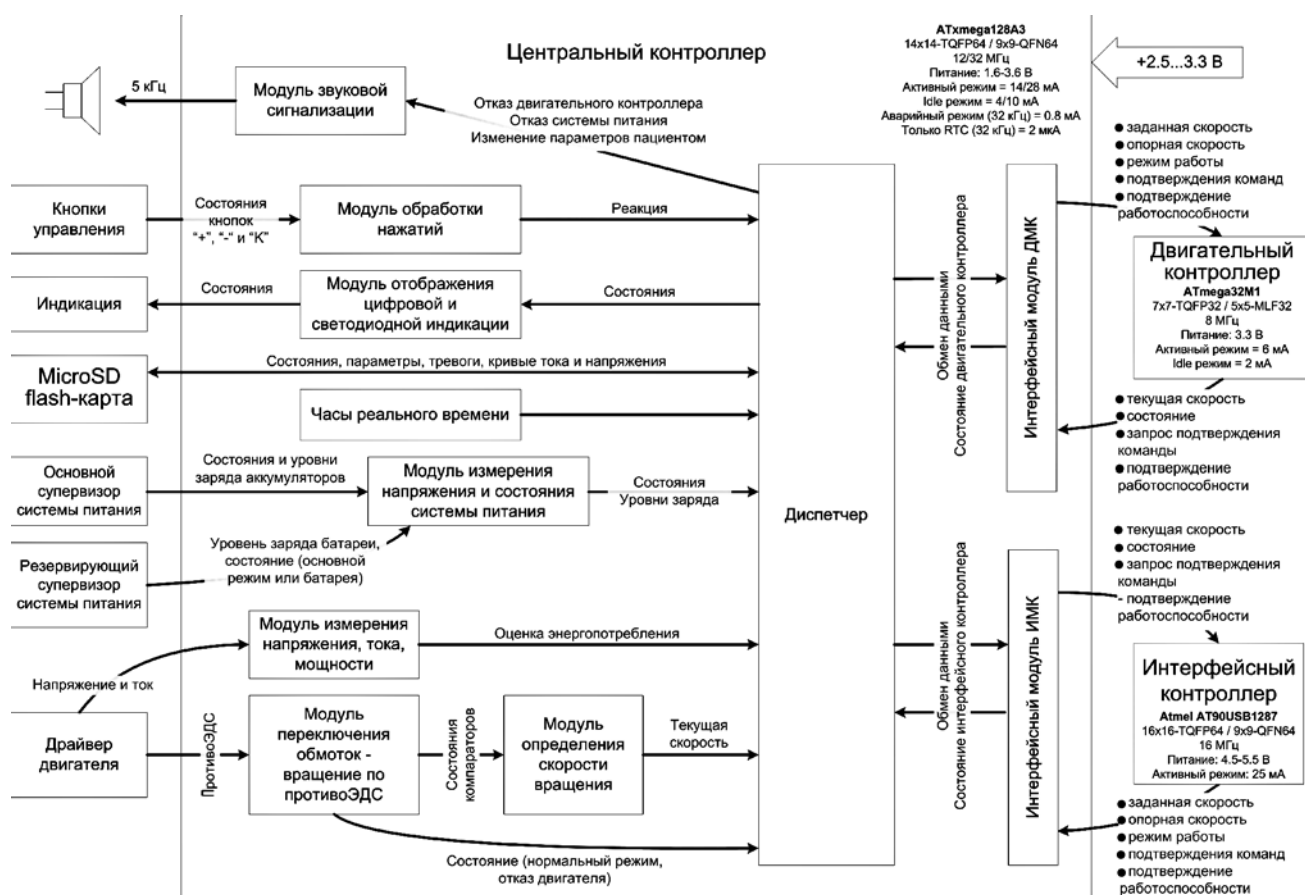


Рис. 7. Структурная схема ЦМК НБУ

Блок ДМК НБУ

Блок ДМК НБУ отвечает за вращение рабочего колеса насоса, управление его скоростью вращения, обмен данными с ЦМК, сигнализацию о сбоях в работе насоса и ЦМК. На *рис. 8* представлена структура и основные информационные потоки ДМК НБУ ИОН при работе СВК ИЛЖС.

Прошивка ДМК реализует систему стабилизации скорости вращения ротора двигателя осевого насоса в условиях переменной (пульсирующей) нагрузки при изменении уровня питающего напряжения.

В основе схемотехнической реализации ДМК лежит микросхема «Atmel AVR ATmega32M1». Структура прошивки ДМК включает в себя взаимодействующие модули UART, таймеров, АЦП, компараторов, управления бесколлекторным двигателем.

ДМК выполняет: разгон двигателя ИОН в шаговом режиме до ~1000 об/мин; вращение (переключение обмоток) по сигналам противоЭДС; измерение текущей скорости; управление для стабилизации скорости на заданном уровне; обмен данными с центральным МК; прием и обработка команд от центрального МК; определение отказа вращения ротора двигателя; определение отказа центрального МК (по сигналам UART); сохранение параметров в энергонезависимой памяти для загрузки в случае сбоя и отказа центрального МК.

Блок ИМК НБУ

ИМК НБУ осуществляет обмен данными с ЦМК, обмен данными с PORTEX. Схемотехническая реализация ИМК выполнена на микросхеме «Atmel AVR AT90USB1287». Связь между ИМК и КБИУ осуществляется по интерфейсу USB 2.0 HID. На *рис. 9* представлены структура и основные информационные потоки ИМК НБУ ИОН в рабочем режиме.

ИМК выполняет в on-line режиме получение команд от КБИУ, передачу команд от КБИУ в ЦМК, получение данных от ЦМК, передачу пакета данных IPR в формате PUMPAH на КБИУ для отображения результатов мониторинга рабочих характеристик СВК ИЛЖС в графическом, цифровом и текстовых форматах.

Модуль автономного энергоснабжения должен обеспечивать не менее чем 10-часовое функционирование НБУ ИОН при скорости потока крови, создаваемого насосом, равной 5 л/мин, и при противодавлении 80 мм рт. ст.

Система электропитания НБУ

Для обеспечения автономности энергоснабжения НБУ предусмотрено 4 источника питания: аккумулятор 1, аккумулятор 2, блок питания от сети 220 В и резервный аккумулятор.

Аккумулятор 1 и аккумулятор 2 являются идентичными взаимозаменяемыми портативными ис-

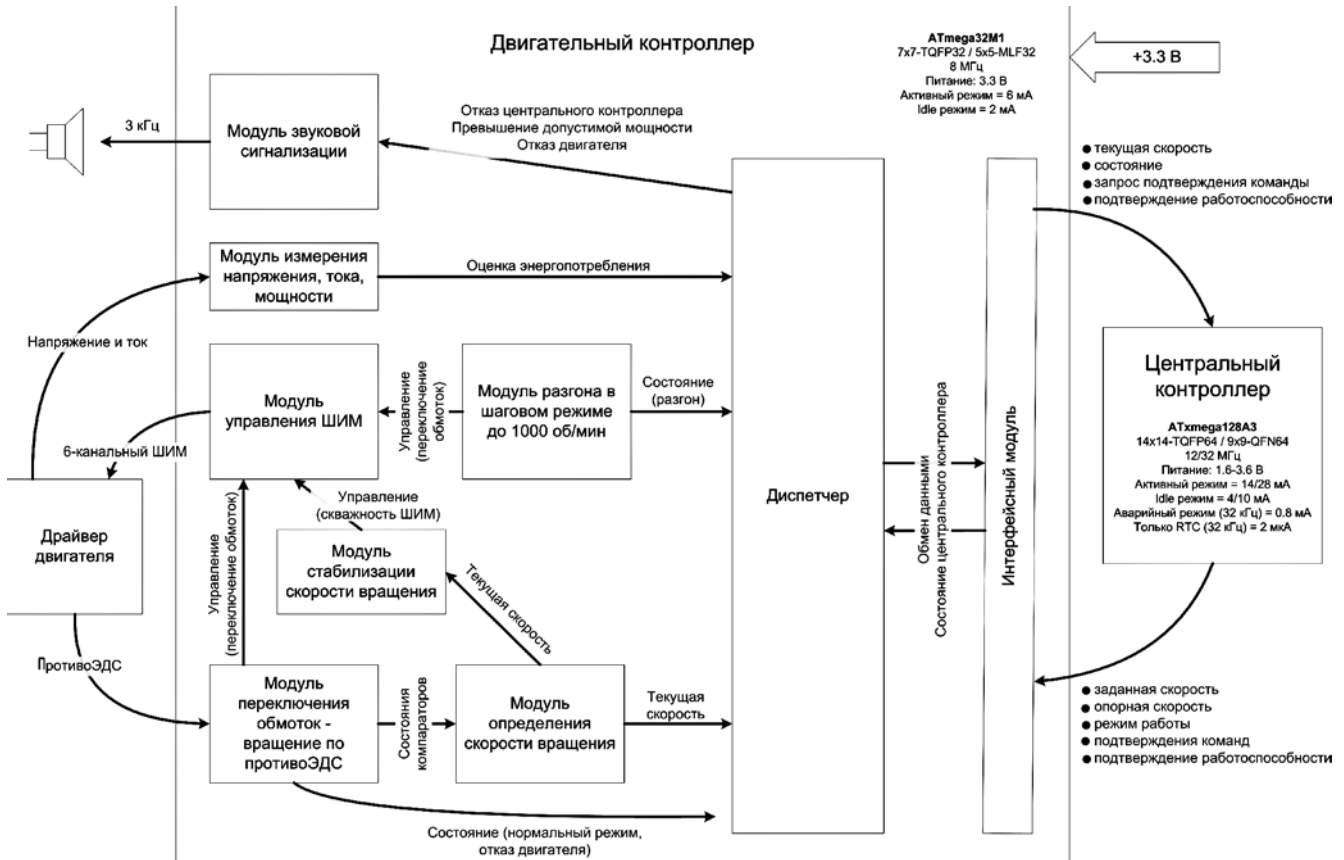


Рис. 8. Структурная схема ДМК НБУ

точниками энергии. При разряде или отключении одного из аккумуляторов происходит переключение на использование другого аккумулятора.

Резервный аккумулятор предназначен для питания блока ЦМК в случае отключения всех остальных источников энергии. При подключении резервного аккумулятора НБУ ИОН осуществляет только звуковую и светодиодную сигнализацию о необходимости подключения или замены основных источников питания. Функционирование ИОН в данном случае не осуществляется.

Переключение между источниками питания и определение используемого источника реализовано при помощи основного и резервирующего супервизоров. На *рис. 10* показаны структурная схема и информационные потоки основного супервизора по питанию НБУ ИЛЖС. Красным цветом выделены электрические линии связи, синим – информационные каналы.

Два аккумулятора подключены к ЦМК через SMBUS-хаб, который позволяет выбрать первый или второй аккумулятор для обмена данными. Аккумулятор поддерживает интерфейс SBS (Smart Battery System), обеспечивающий передачу информации о состоянии аккумулятора (такие параметры, как относительный заряд, ток, напряжение, температура, емкость, ошибки функционирования и др.) и изменении некоторых из них. Информация об активном источнике энергопитания передается в мик-

росхему основного супервизора, которая выполняет его переключение. ЦМК получает информацию об активном источнике питания для управления светодиодной индикацией на корпусе. Логика работы индикации о состоянии системы автономного энергопитания ИЛЖС реализована следующим образом.

1. Индикатор активного источника питания состоит из трех светодиодов зеленого цвета, где 1-й светодиод соответствует 1-му аккумулятору, 2-й светодиод соответствует 2-му аккумулятору, 3-й светодиод соответствует питанию от сети 220 В.

При работе СВК от аккумулятора 1 или аккумулятора 2 постоянно горит светодиод 1 или светодиод 2, при работе от сети 220 В постоянно горит светодиод 3 и соответствующий светодиод аккумулятора, от которого продолжит питаться система при отсоединении сети 220 В.

2. Для экономии электроэнергии все световые индикаторы уровня заряда аккумуляторов по умолчанию находятся в выключенном состоянии (режим ожидания). Каждый индикатор состоит из трех светодиодов красного, желтого и зеленого цветов. 1-й светодиод красного цвета соответствует 25 % заряда аккумулятора, 2-й светодиод желтого (или оранжевого) цвета соответствует 50 % заряда аккумулятора, 3-й светодиод зеленого цвета соответствует 100 % заряда аккумулятора. Индикация заряда осуществляется для обоих аккумуляторов. При этом выполняются следующие условия:

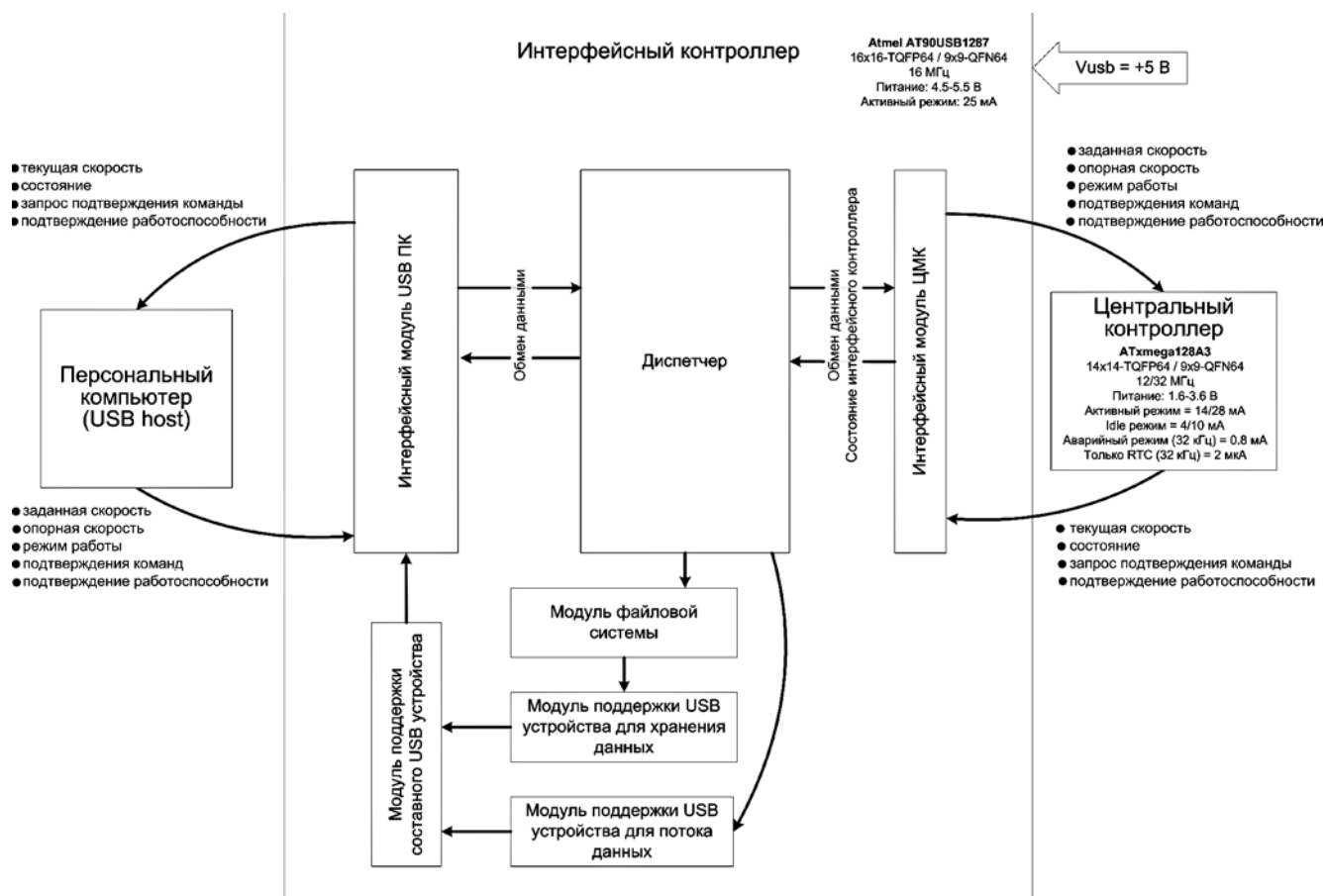


Рис. 9. Структурная схема ИМК НБУ

- в случае заряда батареи менее 25 % постоянно горит только 1-й светодиод;
- в случае заряда батареи более 25 % и менее 50 % постоянно горят 1-й и 2-й светодиоды;
- в случае заряда батареи более 50 % постоянно горят все три светодиода.

На рис. 11 показаны информационные и электрические взаимосвязи резервирующего супервизора носимого блока управления имплантируемым осевым насосом.

Резервирующий супервизор управляет питанием ЦМК: в штатном режиме питание осуществляется от DC-DC конвертора, в аварийном – от резервного аккумулятора. В последнем случае осуществляется исключительно питание ЦМК для формирования индикации на экране НБУ и выдачи звукового предупреждения.

Обеспечение надежности НБУ

Одной из основных задач разработки ИЛЖС было обеспечение высокой надежности передачи команд/данных между основными микроконтроллерами НБУ. Последнее было достигнуто за счет реализации алгоритма тестирующих пакетов (ping), системы подтверждения принятых команд/данных и добавления в передаваемый пакет контрольной суммы (CRC). В первом случае для контроля линий связи между МК периодически отсылаются тестирующие пакеты. Анализ содержимого возвра-

щенного пакета позволяет достоверно определить работоспособность канала и состояние МК.

Для повышения качества сервисного обслуживания НБУ ИОН в систему управления была включена SD/MMC-карта памяти, на которую ЦМК осуществляет постоянную запись данных и событий как для штатных, так и для аварийных условий эксплуатации ИЛЖС. Карта может быть извлечена из НБУ и считана средствами РС для визуализации и обработки данных мониторинга. Структура данных карты включает в себя область с нативной информацией (скорость оборотов ИОН, потребляемые двигателем ток и напряжение) и область событий, к которым относятся:

- нажатие кнопок на корпусе НБУ;
- получение команды с ПК;
- изменение заданной скорости вращения ИОН;
- получение команды по USB;
- изменение потребляемой двигателем мощности;
- превышение разницы между измеренной и заданной скоростями более чем на 500 об/мин;
- остановка насоса (не запланированная оператором, тромбы, обрыв провода...);
- подключение/отключение источника сетевого питания AC220;
- подключение/отключение/использование/неиспользование/заряд меньше 25 % для первого и второго аккумуляторов.

Обслуживание SD/MMC реализовано в прошивке ЦМК. Пространство карты памяти логически

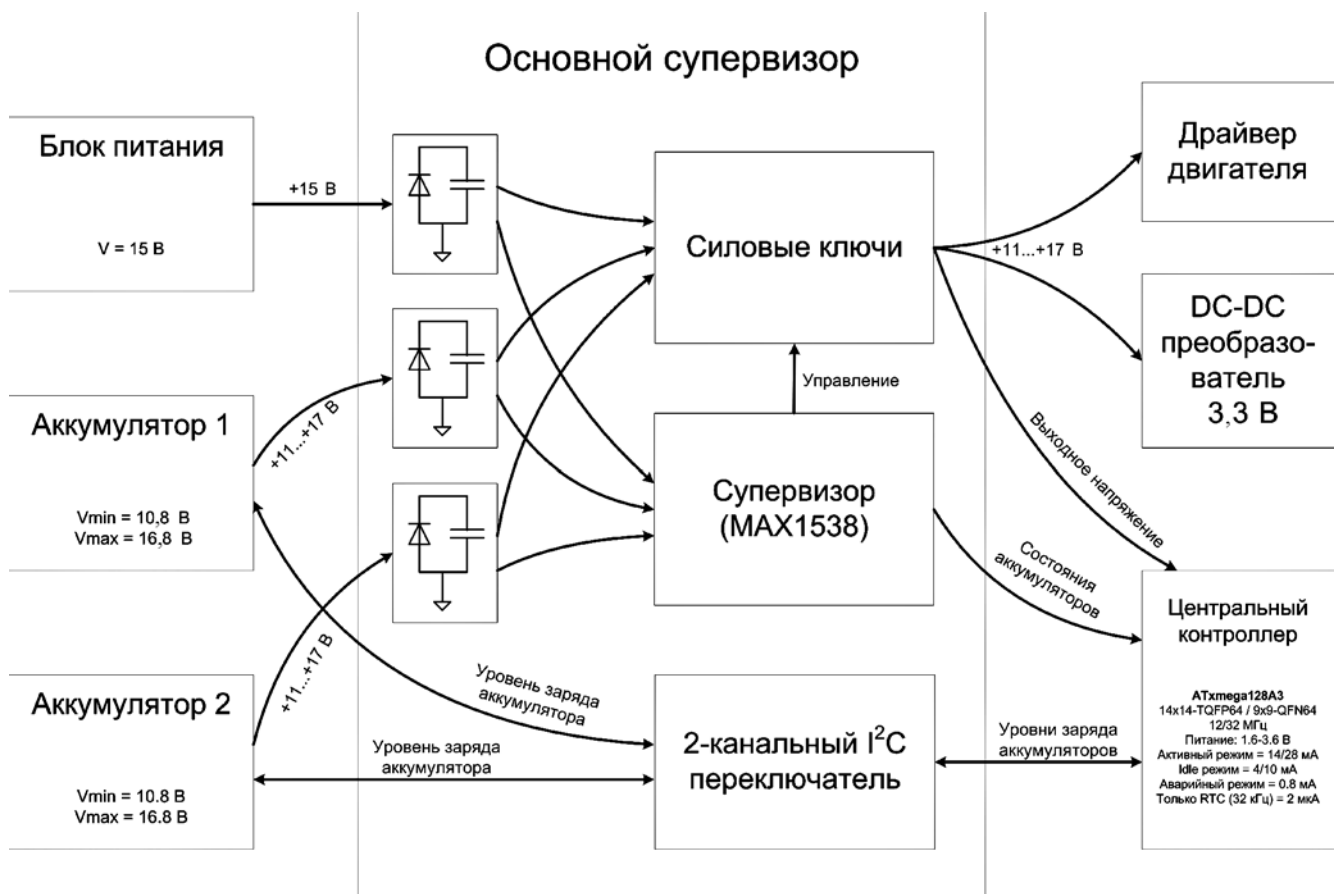


Рис. 10. Структурная схема и информационные потоки основного супервизора НБУ

поделено на области – кластеры. С частотой 100 Гц данные заносятся в буфер, который по заполнении записывается на карту памяти. Данные записываются в кластер циклическим буфером в течение суток, затем кластер помечается как использованный (для ограничения циклов перезаписи и исключения ошибок) и запись переключается на следующий свободный кластер. При возникновении событий кластер помечается, информация в него записывается до заполнения, затем производится запись в следующий свободный кластер. Объем карты 8 Гб позволяет осуществлять непрерывную запись продолжительностью более 5 лет.

Стендовые испытания

Для оценки работоспособности созданного НБУ на базе ФГУ ФНЦТИО им. В.И. Шумакова была проведена серия стендовых испытаний. Для проведения испытаний был использован пульсирующий гидродинамический стенд, имитирующий большой круг кровообращения человека. В состав стенда (см. рис. 12) входят следующие компоненты:

- артериальный резервуар;
- венозный резервуар;
- полиуретановый левый желудочек сердца;
- компрессор;
- консоль управления левым желудочком сердца;
- набор трубопроводов;
- ротаметр;
- инвазивные датчики давления.

На рис. 12 стенд разделен на две части, состоящие из артериального и венозного резервуаров, соединенных между собой шлангами. В каждой части

имеется ротаметр, а также устройство для пережатия шланга для имитации сопротивления. Отличием одной части от другой является объем венозного резервуара. Из венозного резервуара жидкость поступает в камеру насоса, а затем жидкость из камеры насоса поступает в артериальный резервуар.

В состав исследуемого комплекса СВК ИЛЖС входят: ИОН, НБУ, КБИУ, два аккумулятора, лабораторный блок питания.

Структурная схема подключения к стенду пульсирующего имитатора левого желудочка сердца и ИОН представлена на рис. 13. СВК подключен по схеме «левый желудочек сердца – аорта».

Испытания проводились при следующих условиях:

- 1) параметры функционирования левого желудочка сердца:
 - систолическое давление, мм рт. ст.: 140, 160;
 - частота сердечных сокращений, уд/мин: 60, 90;
 - диастолическое давление, мм рт. ст.: 0...10;
 - соотношение длительности систолы к длительности диастолы, %: 30;
- 2) параметры функционирования ИОН:
 - скорость вращения рабочего колеса насоса, об/мин: от 5000 до 10000 с шагом 1000;
 - напряжение питания, В: 16;
- 3) регистрируемые параметры:
 - давление на входе левого желудочка;
 - давление на входе ИОН;
 - давление на выходе ИОН;
 - напряжение питания;
 - потребляемый ток;
 - пульс;

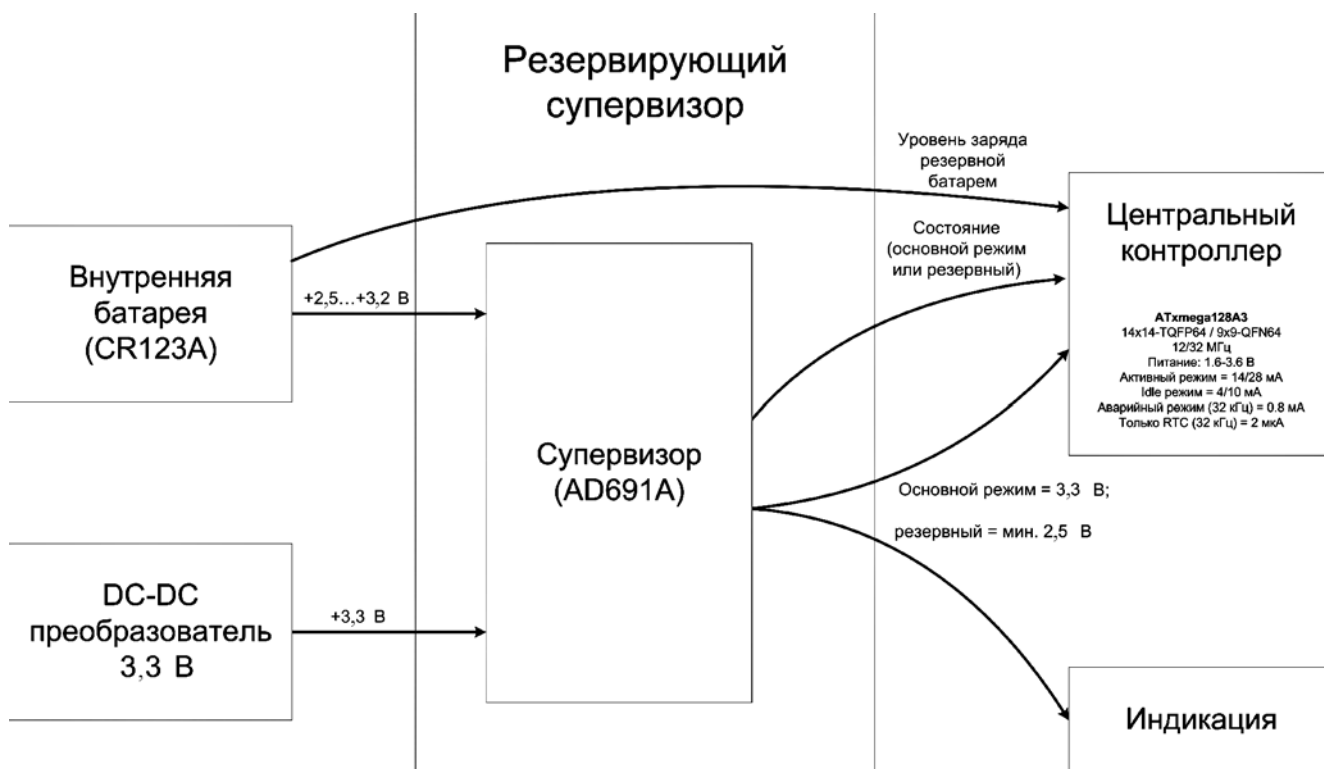


Рис. 11. Структурная схема и информационные потоки резервирующего супервизора НБУ

- заданная скорость вращения рабочего колеса насоса;
- фактическая скорость вращения рабочего колеса насоса.

В процессе испытаний параметры пульсирующего имитатора левого желудочка сердца изменялись при помощи регуляторов на консоли управления, скорость вращения рабочего колеса ИОН изменялась в ПО «Румрах». Запись результатов исследований в файл также производилась в ПО «Румрах».

Результаты стендовых испытаний НБУ

Регистрируемые параметры экспортированы в среду Mathworks Matlab для анализа и отображения. Разработаны программные средства, выполняющие импорт результатов мониторинга ПО

«Румрах» в Matlab, вычисление необходимых производных величин, формирование системы отображения результатов испытаний. На рис. 14 представлены осциллограммы следующих измеренных величин: давление на входе ИОН (мм рт. ст.), напор (мм рт. ст.) ИОН, потребляемый электрический ток (А), фактическая скорость вращения рабочего колеса ИОН (об/мин).

При испытаниях средние значения фактической скорости вращения рабочего колеса ИОН отличались от заданных значений не более чем на 30 об/мин. Мгновенные значения фактической скорости вращения изменялись в соответствии с пульсациями имитатора левого желудочка сердца. Частота колебаний мгновенных значений тока и фактической скорости вращения соответствовали значениям,

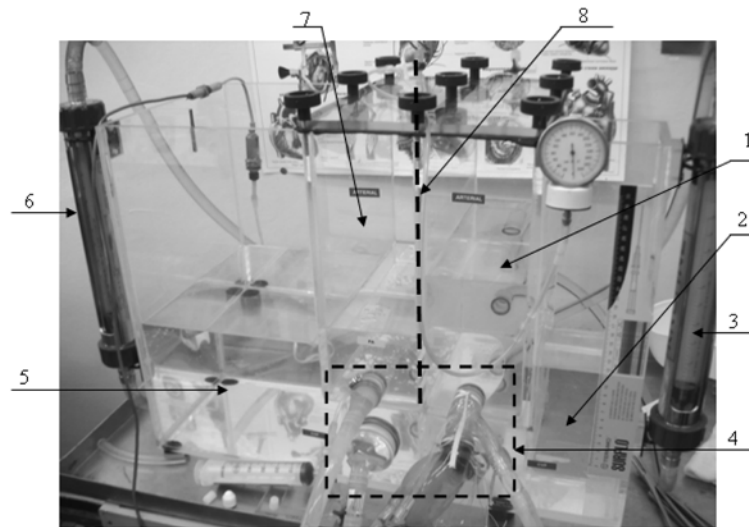


Рис. 12. Изображение исследовательского стенда:

1 – резервуар, имитирующий артериальную систему малого круга кровообращения; 2 – резервуар, имитирующий венозную систему малого круга кровообращения; 3, 6 – ротаметры; 4 – места подключения аппаратов вспомогательного кровообращения; 5 – резервуар, имитирующий венозную систему большого круга кровообращения; 7 – резервуар, имитирующий артериальную систему большого круга кровообращения; 8 – линия, разделяющая стенд на симметричные части

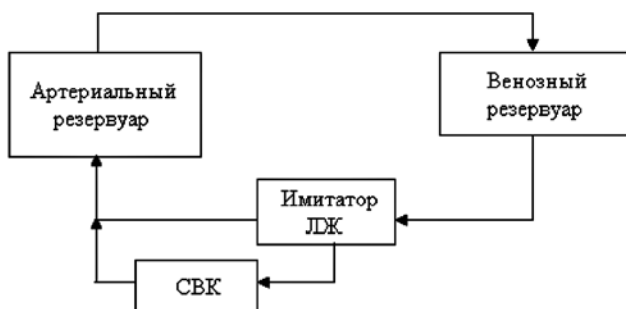


Рис. 13. Структурная схема подключения СВК

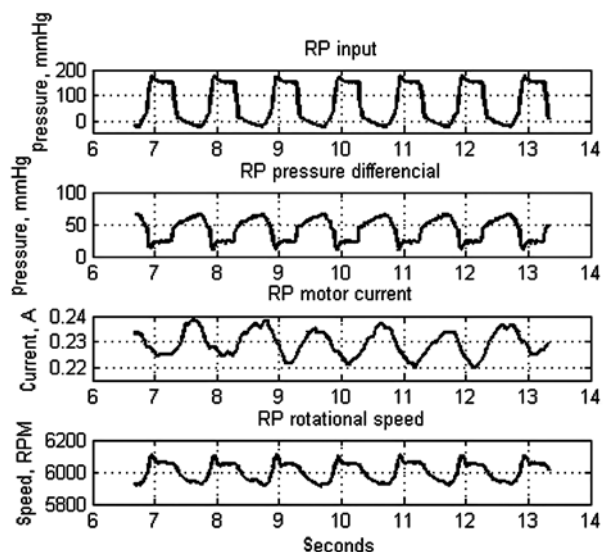


Рис. 14. Осциллограммы результатов испытаний

заданным на консоли управления имитатора левого желудочка сердца.

Основные результаты и выводы

В результате проведенных исследований была разработана система управления имплантируемым насосом левого желудочка сердца. Выполненная в виде носимого блока, система реализует автоматический/ручной режимы управления насосом и автономного энергопитания блока, индикацию состояния его систем, запись событий на встроенный модуль памяти и мониторинг всех рабочих характеристик СВК ИЛЖС.

В ходе разработки получены новые оригинальные решения, обеспечивающие простоту эксплуатации, развитые функциональные возможности и удобство технического обслуживания ИЛЖС.

Результаты испытаний показали высокую надежность и физиологичность управления ИОН, отвечающего лучшим мировым образцам СВК ИЛЖС.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственный контракт № 02.522.12.2010 от 2009 г.).

Список литературы:

1. Бокерия Л.А., Шаталов К.В., Свободов А.А. Системы вспомогательного и заместительного кровообращения. – М.: Изд-во НЦССХ им. А.Н. Бакулева РАМН, 2000.
2. Локин Л.С., Лурье Г.О., Дементьева И.И. Искусственное и вспомогательное кровообращение в сердечно-сосудистой хирургии. – М.: НЦХ РАМН, 1998.
3. Шумаков В.И. Искусственные органы. – М.: Медицина, 1990.

*Александр Владимирович Адашкин,
канд. техн. наук, ведущий инженер,*

*Константин Николаевич Дозоров,
канд. техн. наук, инженер-конструктор,*

*Артем Николаевич Стиценко,
инженер-электроник,*

*Игорь Алексеевич Филатов,
канд. техн. наук, генеральный директор,*

*ООО «БИСОФТ-М»,
г. Москва,*

*Елена Геннадьевна Коньшиева,
канд. биол. наук, профессор,*

*зам. заведующего лабораторией
биотехнических систем,*

*ФНЦ трансплантологии и искусственных
органов им. акад. В.И. Шумакова,*

г. Москва,

*Алексей Николаевич Гусев,
ведущий инженер кафедры*

*биомедицинских систем,
Московский государственный институт*

электронной техники

(технический университет),

г. Зеленоград,

e-mail: av_clean@mail.ru

К.Н. Дозоров, Г.П. Иткин, А.В. Адашкин

СИСТЕМА КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ РОТОРНЫМИ НАСОСАМИ КРОВИ

Аннотация

Управление роторными насосами крови по стабилизации скорости вращения рабочего колеса может не соответствовать потребностям организма. Для физиологичного управления роторными насосами крови необходимо получать информацию о состоянии системы кровообращения. Так как использование датчиков, контактирующих со средой организма, недопустимо, предложена система косвенных измерений. Рассмотренная система использует данные о значениях потребляемого тока и фактической скорости вращения рабочего колеса насоса. С использованием системы косвенных измерений мы получили информацию о ряде параметров системы кровообращения и насоса крови.

В последнее десятилетие для механической поддержки сердца значительно возросло использование роторных насосов крови (РНК). Это связано прежде всего с уменьшением массо-габаритных показателей, большим ресурсом и меньшей стоимостью по сравнению с пульсирующими насосами крови.

С точки зрения управления такими насосами, в отличие от пульсирующих насосов единственным управляющим параметром является скорость вращения рабочего колеса. В большинстве используемых в клинике РНК применяется схема стабилизации скорости вращения рабочего колеса.

Как правило, основными параметрами, характеризующими работу насоса, являются напор, расход и потребляемая мощность. В свою очередь, эти параметры определяются скоростью вращения рабочего колеса (определяется по сигналам противо-ЭДС) и параметрами крови (вязкость). Потребляемую мощность можно определить на основании измерения тока и напряжения питания. В свою очередь, напор можно измерить при помощи датчиков давления, установленных на входном и выходном патрубках, а расход – при помощи датчика расхода жидкости.