

Структура биотехнической системы внутрисосудистого робототехнического комплекса

Аннотация

В статье рассмотрена структура биотехнической системы роботизированного комплекса для внутрисосудистой хирургии. Основной комплекс является внутрисосудистый микроробот, который способен передвигаться по крупным артериям в автоматическом и полуавтоматическом режимах. На роботе могут быть установлены модули для диагностики и осуществления воздействия на стенки сосудов, атеросклеротические бляшки или тромбы. Выделены основные системы комплекса, описаны каналы прямой и обратной связи.

Внутрисосудистое оперативное вмешательство является одной из наиболее сложных хирургических технологий. Для повышения эффективности и качества операций и улучшения условий работы хирурга необходимо принципиально изменить технику хирургических операций с использованием робототехнических средств. В ряде случаев процесс хирургии сосудов может быть организован таким образом, чтобы основную работу по реализации оперативного вмешательства выполняла роботизированная система, а функции хирурга сводились к управлению этой системой. При этом хирург-оператор находится вне стерильной зоны и работает за эргономичным постом управления.

На рис. 1 представлен один из вариантов робототехнической системы для сосудистой хирургии – система внутрисосудистого микроробота (ВМР). Микроробот предназначен для проведения внутрисосудистых операций на крупных артериях (аорта, общая подвздошная артерия и т. д.). ВМР состоит из транспортного модуля (ТМ), на котором устанавливаются средства диагностики и воздействия [1]-[4]. Хирург выполняет функции оператора, осуществляя дистанционно контроль и управление действиями ВМР.

Представленная в статье робототехническая система для сосудистой хирургии представляет собой медицинский робототехнический комплекс внутрисосудистого микроробота (МРТК ВМР). В состав комплекса входят внутрисосудистый микроробот, привод робота, аппарат системы воздействия, пост оператора и устройство для введения робота в кровотоки.

Для адекватного функционирования комплекс МРТК ВМР должен:

- обеспечивать перемещение ВМР в сосудах в автоматическом и полуавтоматическом режимах с возможностью проходить через сосуды с изменяющимся в определенных пределах диаметром в процессе одного введения;
- работать в пульсирующем потоке крови, не перекрывая его;

- минимизировать возможность травматизации стенок сосуда, а также форменных элементов крови;
- допускать свободное извлечение из тела пациента в случае возникновения непредвиденных ситуаций, обеспечивая безопасность пациента.

С системных позиций МРТК ВМР может быть представлен как сложная биотехническая система эргатического типа, объединившая в едином контуре биологические и технические элементы. Активный биологический элемент (хирург) взаимодействует с пассивным (пациентом) опосредованно, с помощью технической системы [5].

Особенностью структурно-функциональной схемы МРТК ВМР является появление в ней блока транспортной системы, осуществляющего автоматизированное перемещение по сосудистому руслу, и блока управления, автоматизирующего систему в целом (рис. 2).

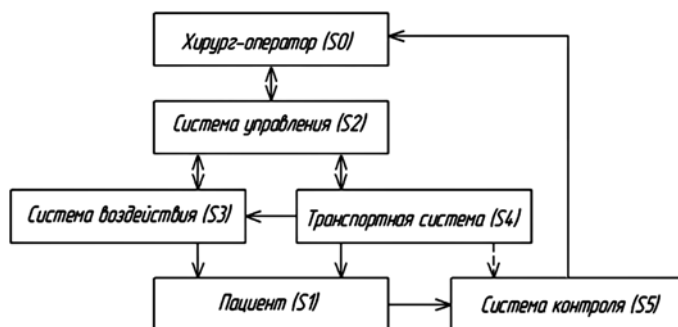


Рис. 2. Обобщенная схема БТС МРТК ВМР

Для данной схемы имеется декомпозиция вида

$$S = S_0 \cup S_1 \cup S_2 \cup S_3 \cup S_4 \cup S_5. \quad (1)$$

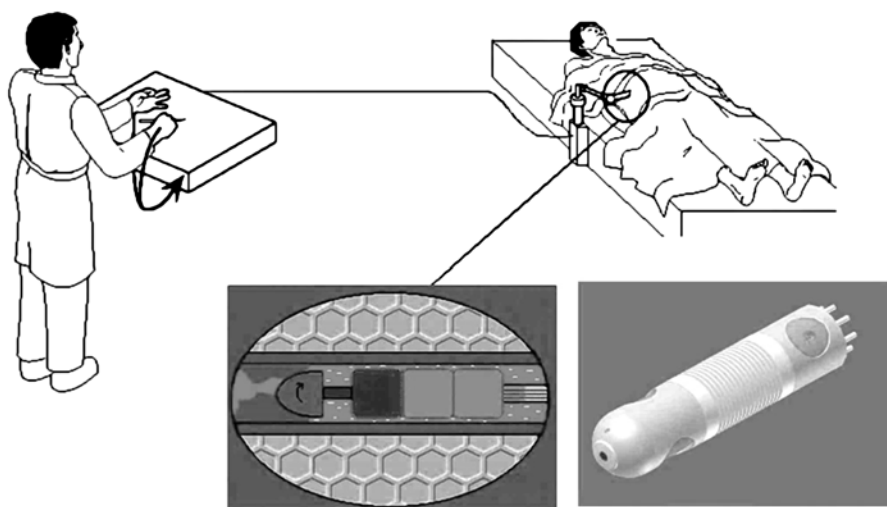


Рис. 1. Схема роботизированной операции с помощью внутрисосудистого микроробота

Разрабатываемая БТС МРТК ВМР имеет полуавтоматический тип управления, т. е. система управления на основе заданных оператором параметров и информации, получаемой от воздействующей и транспортной систем, выполняет заложенный в нее алгоритм. При этом совместно с системой контроля она предоставляет хирургу-оператору необходимую информацию о ходе выполнения операции, анализируя которую, врач может внести коррективы.

Транспортная система

Наличие автоматизированной транспортной системы – самое существенное отличие МРТК от существующих эндоваскулярных устройств.

Исходя из требований к комплексу, была выбрана следующая схема транспортной системы. Транспортный модуль представляет собой два элемента, способные изменять свои поперечные размеры, предназначенные для поочередной фиксации в сосуде и соединенные элементом, способным изменять свою длину (сильфоном), предназначенным для перемещения ТМ. Принцип движения ТМ показан на циклограмме.

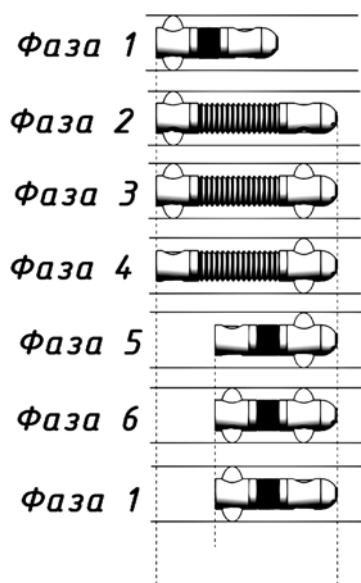


Рис. 3. Циклограмма движения ТМ ВМР

Элементы приводятся в движение за счет изменения объема жидкости. В целях безопасности в качестве рабочей жидкости в этой гидравлической системе выбран физиологический раствор. Для обеспечения безопасности необходим канал обратной связи, позволяющий контролировать усилие, оказываемое на стенку сосуда при фиксации. Таким образом, транспортная система включает в себя ТМ, блок гидравлических приводов, блок обработки сигнала обратной связи и блок управления транспортной системой.

Система управления комплексом

- Система управления выполняет следующие функции:
- сбор и обработку данных, поступающих от других систем комплекса;
 - формирование согласованных команд для других систем комплекса;
 - обеспечение управления комплексом хирургом-оператором с автоматизированного рабочего места.

В структуре системы управления можно выделить три уровня. *Исполнительный уровень.* Для транспортной системы на исполнительном уровне осуществляется адаптивное регулирование сил прижатия контактных элементов к сосудистой стенке в зависимости от информации, получаемой по каналу обратной связи.

Логический уровень управления. На логическом уровне осуществляется формирование фаз движения микроробота, зависящих от команд, поступающих с ситуационного уровня управления и определяющих распределение управляющих команд на исполнительном уровне (т. е. на гидроприводы звеньев микроробота). Так же формируется режим работы систем воздействия и эвакуации разрушенных тромбов.

Ситуационный уровень управления. В процессе работы ситуационный уровень системы управления обеспечивает самостоятельную оценку текущей ситуации и формирование решений о последующих действиях с учетом поставленной задачи. Эти решения предоставляются оператору. При необходимости реализации решения может осуществляться как оператором в ручном режиме, так и робототехнической системой в автоматическом режиме.

В штатном режиме функции оператора сводятся к формированию целевого указания системе управления в форме команды для выполнения определенных технологических операций и контроля их исполнения робототехнической системой. Однако использование в системе принципов интеллектуального управления не снимает с оператора функций оперативного вмешательства на всех уровнях процесса управления. Это может потребоваться, например, в тех случаях, когда робот не может автономно выполнить какую-то сложную операцию, либо в аварийных ситуациях. Для обеспечения взаимодействия хирурга-оператора с микророботом необходима разработка интеллектуального интерфейса, который обеспечивает эффективное взаимодействие человека с системой управления и объектом управления.

С учетом проведенных исследований, экспериментов, анализа аналогов возможно формирование подробной структурной схемы БТС.

Морфологическое описание БТС

В разрабатываемой системе для МРТК ВМР получим декомпозицию вида, приведенного в табл. 1-4.

Проведем декомпозицию системы (1), используя данные табл. 1-4:

$$\begin{cases} S_0 = S_{00} \cup S_{01} \cup S_{02} \cup S_{03}; \\ S_1 = S_{10} \cup S_{11} \cup S_{12} \cup S_{13}; \\ S_2 = S_{20} \cup S_{21}; \\ S_4 = S_{40} \cup S_{41} \cup S_{42} \cup S_{43} \cup S_{44}. \end{cases} \quad (2)$$

Выделив основные интересующие нас блоки системы, необходимо обозначить типы связей, возникающие между ними.

Основным звеном в системе является пациент, информация о состоянии которого с разных уровней организации поступает в систему контроля. Эта информация используется для корректировки действий хирурга по управлению МРТК, осуществляются контроль состояния пациента и корректировка хирургической тактики по ходу операции.

В систему управления подается информация о состоянии ВМР. Данные поступают на дисплей и далее к хирургу для принятия решений. В случае непредвиденной ситуации хирург получает звуковой сигнал в дополнение к информации, выводимой на дисплей. Главной функцией хирурга остается управление технической системой, контроль перемещения ТМ, принятие решений об использовании воздействующей системы.

Описание элементов БТС и типов связей между ними

Кровеносный сосуд (S_{12}) имеет вещественные свойства, проявляемые в преобразовании вещества (восстановление просвета сосудов).

Верхние конечности хирурга-оператора (S_{01}) осуществляют управляющее воздействие на органы управления, передавая информацию о траектории движения ВМР, параметрах работы ТМ.

Органы зрения (S_{02}) и слуха (S_{03}) хирурга-оператора обрабатывают визуальную и акустическую информацию, поступающую от системы индикации состояния ВМП и пациента, а также от мониторирующих систем, и предупреждают об экстренной ситуации во время операции.

Органы управления (S_{21}) обладают информационными свойствами, поскольку передают информацию о желаемых действиях от хирурга-оператора к системе управления. Система управления (S_{20}) также обладает информационными свойствами, она контролирует работу комплекса, принимает управляющие сигналы от органов управления, принимает и об-

рабатывает сигналы обратной связи, формирует управляющие сигналы для системы воздействия и транспортной системы, формирует сигнал для системы индикации состояния.

Блок приводов (S_{40}) обладает энергетическими и вещественными свойствами, передает энергию приводов к транспортному модулю. Транспортный модуль (S_{41}) осуществляет перемещение по сосудистому руслу, несет на себе органы диагностики и воздействия, обладает смешанными энергетическими и вещественными свойствами.

Датчики давления в гидравлических линиях опорных элементов ТМ ВМП (S_{42}) преобразуют давление, возникающие в

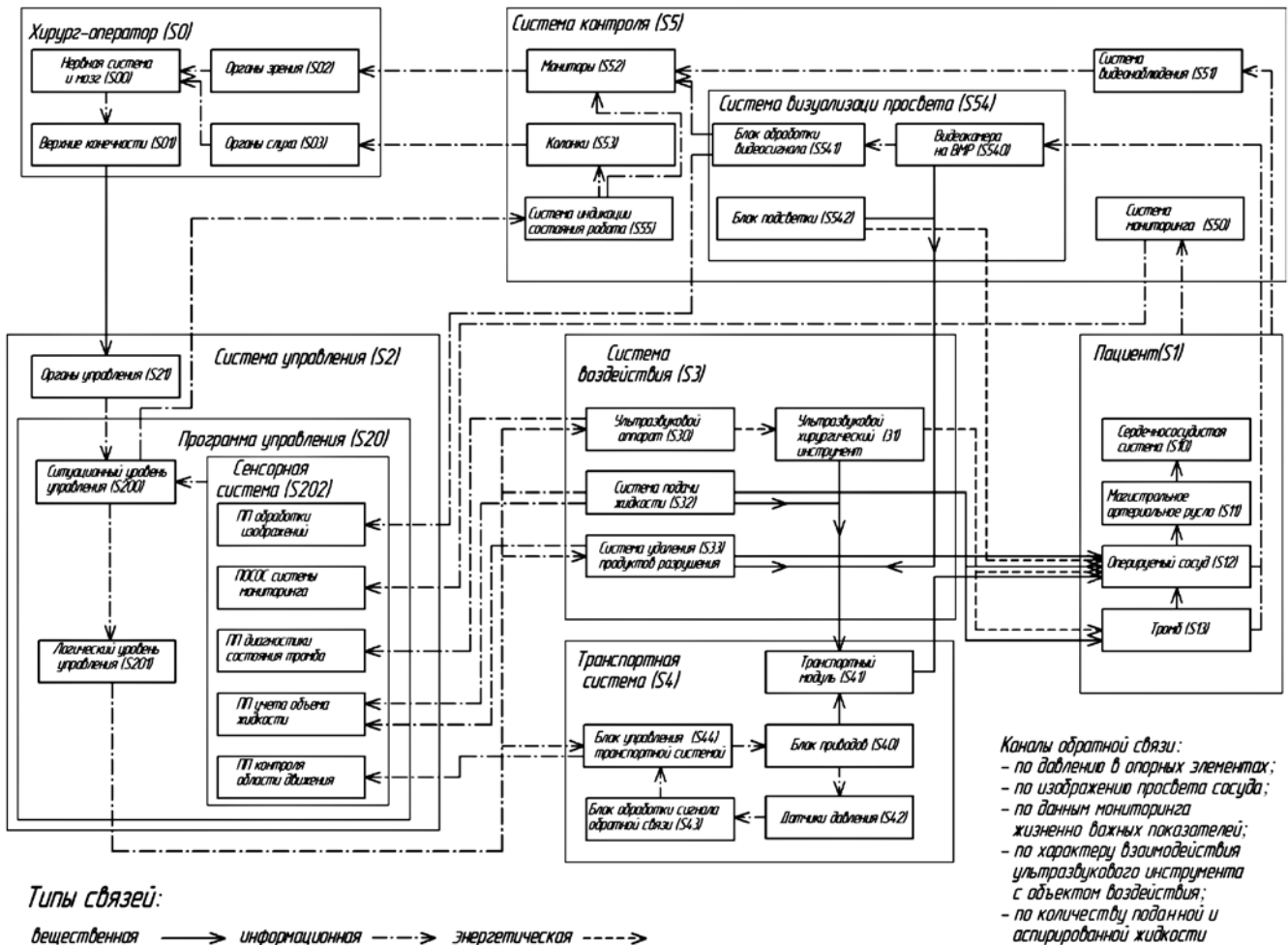


Рис. 4. Структурная схема БТС

Таблица 1

Хирург-оператор S_0

| | |
|----------|------------------------|
| S_{00} | Нервная система и мозг |
| S_{01} | Верхние конечности |
| S_{02} | Органы зрения |
| S_{03} | Органы слуха |

Таблица 3

Система управления S_2

| | |
|----------|----------------------|
| S_{20} | Программа управления |
| S_{21} | Органы управления |

Таблица 2

Пациент S_1

| | |
|----------|---|
| S_{10} | Сердечно-сосудистая система |
| S_{11} | Сосуды магистрального артериального русла |
| S_{12} | Оперированный сосуд |
| S_{13} | Тромб |

Таблица 4

Транспортная система S_4

| | |
|----------|---|
| S_{40} | Блок приводов |
| S_{41} | Транспортный модуль |
| S_{42} | Датчики давления в опорных элементах ТМ ВМП |
| S_{43} | Блок обработки сигнала обратной связи |
| S_{44} | Блок управления транспортной системой |

процессе работы опорных элементов, в электрический сигнал, выполняя информационную функцию.

Блок обработки сигнала (S_{43}) производит первичную обработку сигнала с датчика давления и передает ее в блок управления ТС (S_{44}).

Выделение основных каналов связи в БТС МРТК ВМР

Каналы связи, используемые в БТС, подразделяются на каналы прямой связи и каналы обратной связи. Данные каналы показаны в *табл. 5 и 6*.

Таблица 5

Прямые каналы связи

| Прямые каналы связи | |
|--|---|
| Канал перемещения транспортного модуля | $S_{00} \rightarrow S_{01} \rightarrow S_{21} \rightarrow S_{20} \rightarrow S_{44} \rightarrow S_{40} \rightarrow S_{41} \rightarrow S_{12}$ |
| Канал воздействия | $S_{00} \rightarrow S_{01} \rightarrow S_{21} \rightarrow S_{20} \rightarrow S_3 \rightarrow S_{13}$ |

Таблица 6

Каналы обратной связи

| Каналы обратной связи | |
|--|--|
| Канал передачи информации о пациенте | $S_1 \rightarrow S_5 \rightarrow S_{00}$ |
| Канал сигналов обратной связи системы воздействия | $S_3 \rightarrow S_{20}$ |
| Канал индикации состояния ВМР | $S_{20} \rightarrow S_5 \rightarrow S_{00}$ |
| Канал обратной связи по давлению в опорных элементах | $S_{40} \rightarrow S_{42} \rightarrow S_{43} \rightarrow S_{44} \rightarrow S_{20}$ |

В системе можно выделить два основных прямых канала связи.

Первый прямой канал связи – это канал перемещения транспортного модуля. Хирург-оператор контролирует перемещение ТМ при помощи органов управления.

Второй прямой канал связи – это канал воздействия на сосуд. Хирург при помощи органов управления запускает воздействующую систему при обнаружении препятствия (тромба или атеросклеротической бляшки).

Каналы обратной связи предназначены для слежения за ходом проведения операции. В БТС выделяются четыре канала связи, наиболее важные для хирурга-оператора.

Первый канал обратной связи – это канал информации о состоянии пациента. Информация снимается (в том числе с помощью органов диагностики, установленных на ТМ) с различных систем организма (сердечно-сосудистой, дыхательной), поэтому в качестве начального звена выбран сам пациент. Информация о состоянии пациента выводится на дисплей. Кроме того, возмож-

но использование ПК для частичного анализа информации, поступающей к хирургу-оператору. Также к этому каналу относится передача видеоизображения о ходе проведения операции. Видеоизображение передается хирургу и записывается в память компьютера. Это дает возможность анализировать и контролировать действия хирурга, составлять прогнозы возможных действий во время операции.

Второй канал обратной связи – канал сигналов обратной связи по параметрам работы системы воздействия, позволяющий контролировать параметры воздействия и устанавливать их оптимальные значения.

Третий канал обратной связи – канал индикации состояния ВМР. По этому каналу оператор получает информацию о работе управляющей программы, работе блока приводов, воздействующей системы.

Четвертый канал обратной связи – канал обратной связи по давлению в опорных элементах. Информация о давлении в опорных элементах позволяет системе управления регулировать работу блока приводов, предотвращает чрезмерное выдувание опорных элементов, которое может привести к их разрушению или травме сосудистой стенки.

Главными каналами, обеспечивающими жесткий контроль работы комплекса, являются канал обратной связи транспортной системы при перемещении и канал обратной связи системы воздействия.

Каналы индикации состояния комплекса и пациента являются вспомогательными и обеспечивают нежесткую оперативную связь через хирурга-оператора.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 13-08-12043.

Список литературы:

1. Саврасов Г.В., Поспелов В.И. Применение микроробототехники в медицине // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2001. № 9. С. 33-37.
2. Саврасов Г.В., Нарайкин О.С., Гаврюшин С.С., Ющенко А.С. Внутрисосудистый микроробот // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2006. № 11. С. 44-48.
3. Нарайкин О.С., Саврасов Г.В., Козинцев В.И., Потапов И.С., Козубняк С.А., Захаревич Е.М., Решетов И.В. Двигатель внутрисосудистого микроробота / Патент RU 91832U1, 2009.
4. Саврасов Г.В., Покровский А.В., Гаврюшин С.С., Нарайкин О.С., Ющенко А.С., Поспелов В.И. Эндовазальный миниробот / Патент № 2218191, 2002.
5. Саврасов Г.В. Медицинская робототехника. Часть 1. Учебное пособие по курсу «Медицинская робототехника». – М.: Изд-во МГТУ, 2000. 33 с.

Геннадий Викторович Саврасов,
д-р техн. наук, профессор,
Антон Павлович Баилай,
аспирант,
кафедра «Биомедицинские технические системы»,
МГТУ им. Н.Э. Баумана,
г. Москва,
e-mail: savrasov2000@mail.ru

* * * * *