Г.В. Саврасов, А.Ф. Батанов, С.Г. Гусаров

РОБОТ-МАНИПУЛЯТОР ДЛЯ ХИРУРГИИ КРОВЕНОСНЫХ СОСУДОВ С ПОЗИЦИИ ТЕОРИИ БИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Аннотация

Описана роботизированная биотехническая система для проведения внутрисосудистых операций на примере метода «ультразвуковая эндартерэктомия». Приведено морфологическое описание системы.

При выполнении любого внутрисосудистого вмешательства хирург вынужден полагаться главным образом на собственные навыки и тактильную информацию, поступающую к нему со стороны технического средства. Человеческий фактор наиболее сильно влияет на конечный результат тогда, когда реконструкция сосуда связана с нарушением целостности сосудистой стенки. Например, при выполнении закрытой или полузакрытой эндартерэктомии очень высока вероятность перфорации сосудистой стенки при реализации методов, основанных на применении лишь мускульных усилий хирурга. Но особенно сильно влияние человеческого фактора проявляется в тех случаях, когда в качестве основного физического агента воздействия на кровеносный сосуд используется не мускульное усилие хирурга, а высокоэнергетический и быстродействующий источник, например ультразвук.

При выполнении ультразвуковой эндартерэктомии в современных технических системах отсутствуют средства объективного контроля процесса отделения атеросклеротических масс от стенки артерии. При выполнении операций вручную врач должен задавать необходимую мощность ультразвука с помощью средств управления источником ультразвуковых колебаний. Неверный выбор уровня воздействия может приводить к различным повреждениям артерий. Наиболее опасными являются термическое повреждение стенки артерии ультразвуковыми колебаниями инструмента, прорыв стенки сосуда при слишком резких движениях и режим ультразвуковой термодеструкции сосудистой стенки при заклинивании инструмента.

Для того чтобы существенно улучшить условия работы хирурга и при этом повысить эффективность и качество выполняемых им операций, необходимо принципиально изменить технику хирургических операций с использованием средств мехатроники и робототехники. Процесс выполнения хирургии сосудов в ряде случаев может быть организован таким образом, чтобы основную работу по реализации оперативного вмешательства выполняли робототехнические системы, а функции хирурга сводились к управлению этими системами. Впервые идея применения робототехники для хирургии сосудов была выдвинута в 80-е годы прошлого столетия (Г.В. Саврасов. Дисс. на соискание степени д-ра техн. наук. 1989 г.).

На *рис. 1* представлена схема робототехнической системы для хирургии сосудов, позволяющая контролировать ход проведения внутрисосудистого вмешательства. Главным принципом ее работы является автоматизация перемещения инструмента с ограничением усилий, возникающих при взаимодействии инструмента со стенкой артерии, скорости движения инструмента и мощности ультразвука в безопасных для проведения операции пределах. Особенностью системы является то, что врач воздействует на биообъект при помощи робота-манипулятора. Данная система согласно теории биотехнических систем относится к сложным биотехническим системам (БТС) хирургического типа, а реализуемый способ воздействия называется бесконтактным опосредованием.

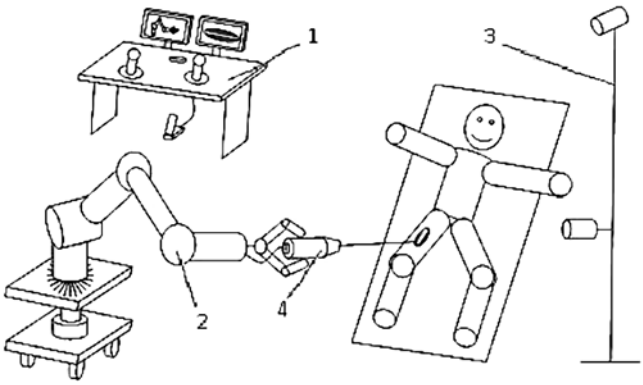

Рис. 1. Робототехническая система для хирургии сосудов: 1 – пост управления (хирург-оператор не показан); 2 – манипулятор; 3 – система видеонаблюдения; 4 – ультразвуковой инструмент

На *рис. 2* представлена структура БТС хирургического типа на высшем уровне иерархии системы, а на *рис. 3* – морфологическая структура биотехнической системы применительно к разрабатываемой системе. Степень детализации дана на уровне, достаточном для выявления взаимосвязей между частями такой системы. Показано, как именно чело-

век-оператор взаимодействует с технической частью системы. Также выявлен характер связей между отдельными частями системы.

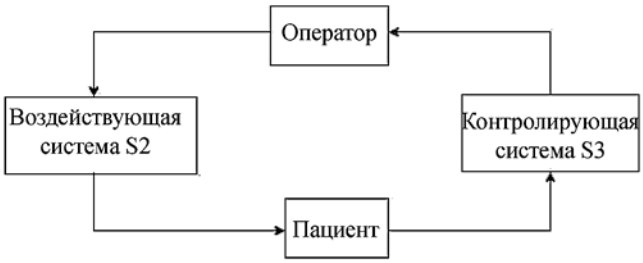

Рис. 2. БТС хирургического типа

Принципиально новыми звеньями в биотехнической системе являются манипулятор и система управления. Манипулятор представляет собой электромеханическое устройство, которое заменяет руку хирурга и должно отвечать определенным требованиям в отношении размеров и формы зоны обслуживания, сервиса, скорости. Манипуляционная система также должна позволять работать с удаленным центром вращения. Возможность работать с удаленным центром вращения и удерживать заданную скорость и направление движения обеспечивает система управления манипулятором.

Основным назначением разрабатываемой системы является удаление атеросклеротических масс из пораженного атеросклерозом сосуда путем их

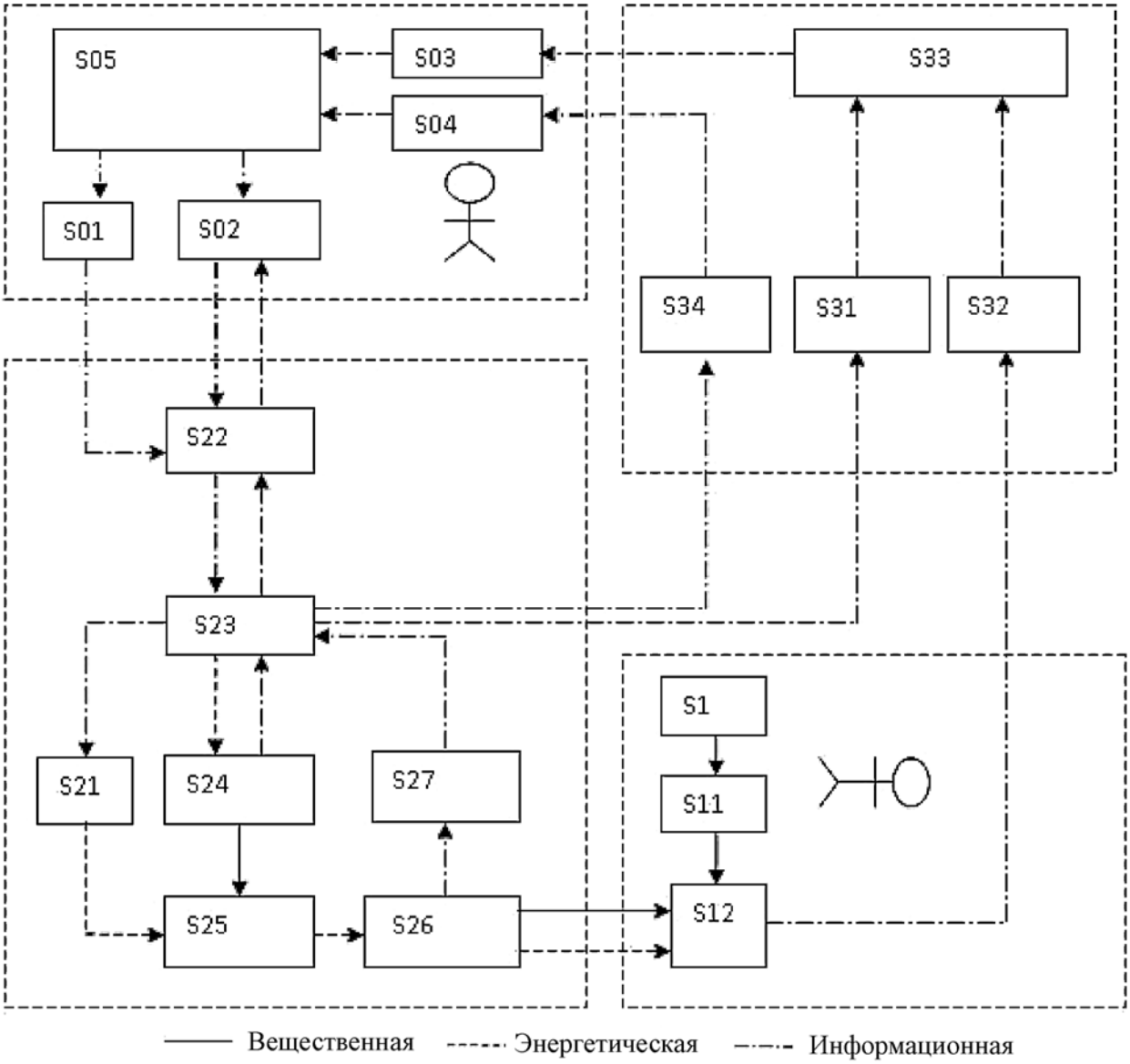

Рис. 3. Морфологическая структура БТС: S01 – нижние конечности оператора; S02 – верхние конечности оператора; S03 – орган зрения; S04 – орган слуха; S05 – центральная нервная система и головной мозг; S21 – ультразвуковой генератор; S22 – органы управления манипулятором (джойстик, кнопки и т. д.); S23 – система управления манипулятором; S24 – механическая манипуляционная система; S25 – акустический узел; S26 – ультразвуковой хирургический инструмент; S27 – датчик усилия; S31 – блок сбора, обработки и регистрации информации; S32 – система видеонаблюдения; S33 – дисплей; S34 – акустическая система

диссекции с помощью инструмента, колеблющегося с ультразвуковой частотой. Такая система обладает вещественными свойствами, проявляющимися в разрушении связей в кровеносном сосуде. Перемещение инструмента производится с помощью механической манипуляционной системы, управляющие сигналы для которой вычисляются системой управления. Человек-оператор в данном случае имеет возможность наблюдать за перемещениями инструмента на экране дисплея. Управление движением инструмента осуществляется двумя способами: с помощью специальных органов управления (джойстиков) и кнопками. Возможны два режима управления: полуавтоматический и автоматический. Полуавтоматическое управление осуществляется с помощью задающих рукояток (джойстиков). Этот режим управления может быть использован для подведения инструмента к разрезу, ввода кончика инструмента в кровеносный сосуд и выполнения операции. После ввода инструмента в сосуд врач, сидящий за пультом управления манипулятором, может переключиться в автоматический режим управления, задав соответствующую команду. После этого робототехническая система продолжает работу в автоматическом режиме. При необходимости врач может переключиться в полуавтоматический режим управления и выполнить операцию с помощью джойстиков.

Такая система позволяет хирургу производить манипуляции с удаленным кровеносным сосудом, на большом расстоянии, в том числе и с использованием принципов телехирургии. При этом вся информация о ходе выполнения операции централизованно поступает на пост управления. Возможность собирать и анализировать информацию об усилиях, возникающих в зоне контакта инструмента с кровеносным сосудом и параметрах ультразвука, повышает уровень контроля воздействия.

Важно отметить, что в такой системе ведущее положение занимает робототехническая система. Несмотря на то что управляет всей системой хирург, качество лечения будет зависеть от возможностей манипулятора и системы управления. Канал обратной связи, замыкаемый на систему управления манипулятором через датчик усилия, позволяет контролировать ход операции и осуществлять отделение бляшки от стенки кровеносного сосуда.

Все процессы и действия оператора записываются блоком сбора, обработки и регистрации информации. Такой блок может быть реализован на основе ЭВМ. В этом случае возможно объединение функций регистрации информации и системы управления манипулятором в одном устройстве.

Хирург наблюдает за происходящим в операционной на мониторе, который имеется на пульте управления. На дисплей выводится информация о возникающих при взаимодействии с кровеносным сосудом усилиях, а также изображение разреза. Возможно также наличие в системе второго дисплея, на котором отображается общий вид пациента и манипулятора. В ходе продвижения вглубь сосуда система управления манипулятором должна распознавать различные контактные ситуации. Необходимо отсекать боковые ветви, отходящие от основной артерии, а также реагировать на изменение сопротивления среды, вызванное неоднородностью атеросклеротических масс. Для выполнения таких действий требуются совершение возвратно-поступательных движений, разворот инструмента и изменение скорости его движения. При этом может быть использована исходная информация о сосуде, полученная на стадии ангиографических исследований.

Сравним разрабатываемую биотехническую систему с традиционной системой, морфологическая структура которой представлена на *рис. 4*.

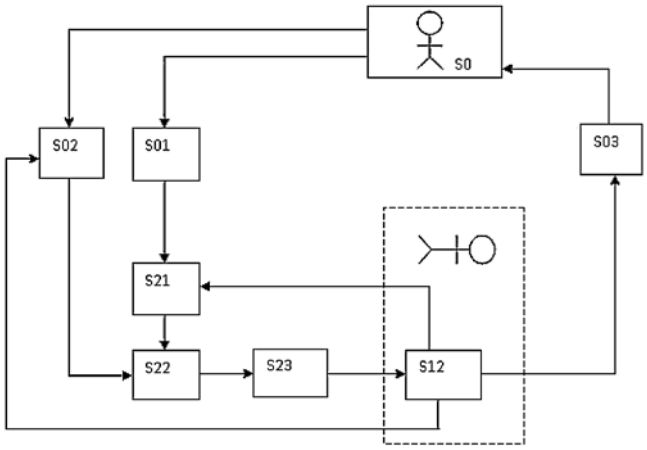

Рис. 4. Традиционная БТС: S0 – хирург-оператор; S02 – верхние конечности оператора; S21 – ультразвуковой генератор; S22 – акустический узел; S23 – ультразвуковой хирургический инструмент; S12 – облитерированный сегмент магистральной артерии; S03 – органы зрения; S01 – нижние конечности оператора

Традиционная система проще, содержит меньше элементов. В ней отсутствуют какие-либо датчики обратной связи. Все решения об изменении параметров воздействия врач принимает на основании своих органов чувств. В роботизированной системе информация об усилиях более объективна за счет применения датчика усилия. Обе системы работают со следующими параметрами: сила лобового сопротивления, скорость движения инструмента, мощность ультразвука (амплитуда колебаний). Параметры воздействия должны не только лежать в безопасных пределах, но и стремиться к оптимуму. Автоматизированная БТС контролирует указанные параметры и стремится удержать их в заданных пределах, тем самым повышая вероятность качественного выполнения операции любым врачом, независимо от его опыта и чувствительности рук.

При оценке биотехнической системы эргатического типа необходимо принимать во внимание критерий, отражающий стоимость достигнутого ре-

Таблица 1

Свойства традиционной и роботизированной биотехнических систем

Свойства	Автоматизированная	Традиционная
Зависимость от анатомии оператора	Нет	Да
Непосредственный контакт оператора с пациентом и кровеносным сосудом	Нет	Да
Качество обработки стенки сосуда	Зависит от параметров робототехнической системы	Зависит от мастерства хирурга
Сложность системы	Более сложная	Менее сложная
Эргономичность	Высокая	Низкая
Наличие объективного контроля процесса эндартерэктомии	Да	Нет
Требования к опыту и чувствительности рук врача	Низкие	Высокие
Лидирующая подсистема	Система управления	Хирург
Усталость оператора	Более низкая	Более высокая
Вероятность отказа	Более высокая	Более низкая
Время подготовки системы к работе	Более высокое	Более низкое
Эффективность	Более высокая	Более низкая

зультата. Для традиционной системы энергетические затраты оператора определяются как работа по перемещению акустического узла с инструментом, для автоматизированной БТС – как работа по перемещению задающей рукоятки или нажатию кнопки. Очевидно, что во втором случае выполняемая оператором работа уменьшается. Автоматизированная БТС также обеспечивает лучшие эргономические показатели.

С другой стороны, сложность БТС с манипулятором значительно выше, чем у традиционной системы. В силу высокой сложности выше вероятность отказа. В *табл. 1* представлены свойства биотехнических систем с использованием манипулятора и без него.

Как видно из *табл. 1*, эффективность БТС с роботом-манипулятором признана более высокой, чем у традиционной системы. Несмотря на то что роботизированная система имеет более высокую сложность и вероятность отказа, эта система обеспечивает объективный контроль таких параметров, как усилие, скорость движения, мощность ультразвука, и может удержать их в допустимых пределах. Именно это обстоятельство позволяет говорить о более высокой эффективности БТС.

Преимуществом предлагаемой системы перед традиционной системой без робота является независимость результата отделения бляшки от опыта и индивидуальных особенностей врача (особенно при использовании автоматического режима отделения бляшки). Другим преимуществом является большая безопасность воздействия. Всю работу по обеспечению безопасности воздействия на кровеносный сосуд выполняет система управления манипулятором.

Независимость результата отделения бляшки от индивидуальных особенностей хирурга позволяет предположить, что при использовании такой робототехнической системы исчезает проблема неуверенности врача при выполнении ультразвуковой эндартерэктомии, вызванная снижением усилия резания. Одним из ожидаемых эффектов от применения автоматизированной биотехнической системы является увеличение числа врачей, которые смогут эффективно выполнять ультразвуковые операции на кровеносных сосудах человека, а также снижение требований к необходимой квалификации хирургов.

Геннадий Викторович Саврасов,
д-р техн. наук, профессор,
кафедра «Биомедицинские технические системы»,
Александр Федорович Батанов,
начальник Специального конструкторско-технологического бюро прикладной робототехники,
Сергей Григорьевич Гусаров,
инженер 2-й категории,
Специальное конструкторско-технологическое бюро прикладной робототехники,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
г. Москва,
e-mail: savrasov2000@mail.ru