

УДК 621.865.8

## **Разработка системы управления медицинским микророботом с применением методов нечеткой логики**

д.т.н. Ющенко А. С.<sup>1,\*</sup>, Войнов В. В.<sup>1</sup>

\*[arka.dyus@mail.ru](mailto:arka.dyus@mail.ru)

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

---

В статье рассматривается задача управления медицинским микророботом, предназначенным для интраваскулярной диагностики и хирургии. В связи с тем, что робот работает в условиях неопределенности, при разработке принципов управления использовались методы нечеткой логики и ситуационного управления. Применение этих методов оправдано также и тем, что медицинский робот управляется хирургом-оператором и, в определенной степени, может использовать его опыт, формализованный с помощью лингвистических переменных. Основное требование к рассматриваемой системе управления – это безопасность для пациента, достигаемая как за счет предварительного исследования физиологических характеристик его организма, так и путем адаптации движений микроробота в процессе выполнения операции.

**Ключевые слова:** робототехническая система, микроробот, нечеткая логика, лингвистические переменные, конечные автоматы, ситуационное управление

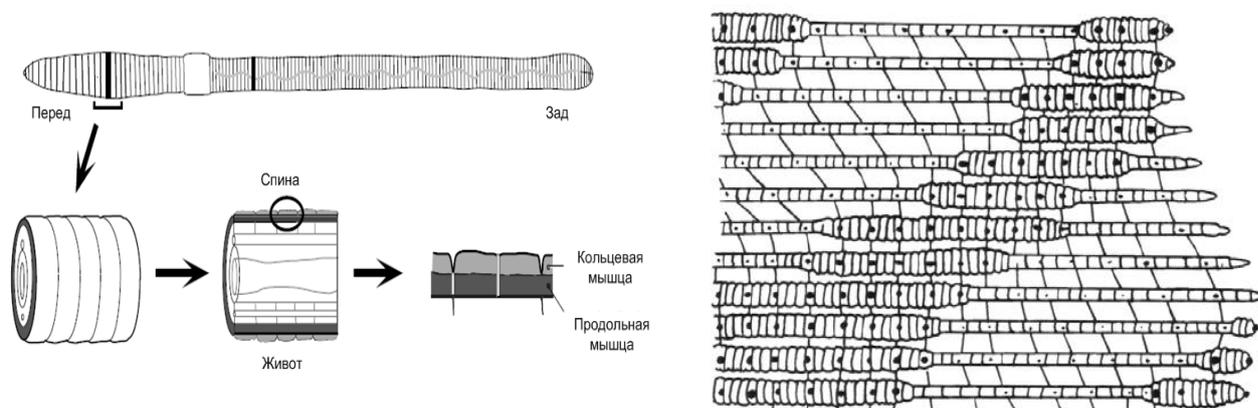
---

### **Введение**

Рассматриваемое исследование относится к направлению, связанному с совершенствованием существующих средств диагностики и лечения трубчатых органов с человека, в том числе кровеносных сосудов, сегментов желудочно-кишечного тракта и др. Одним из наиболее перспективных направлений в этой области является создание медицинских микророботов, способных перемещаться внутри трубчатых органов. В случае интраваскулярной хирургии основная область применения таких устройств – удаление атеросклеротических отложений из окклюзированных сосудов с применением баллонной ангиопластики, атерэктомии, а также с применением ультразвукового воздействия. Применение микроробототехники относится к малоинвазивным методам, которые менее опасны для пациента, и более надежны по своим результатам [1].

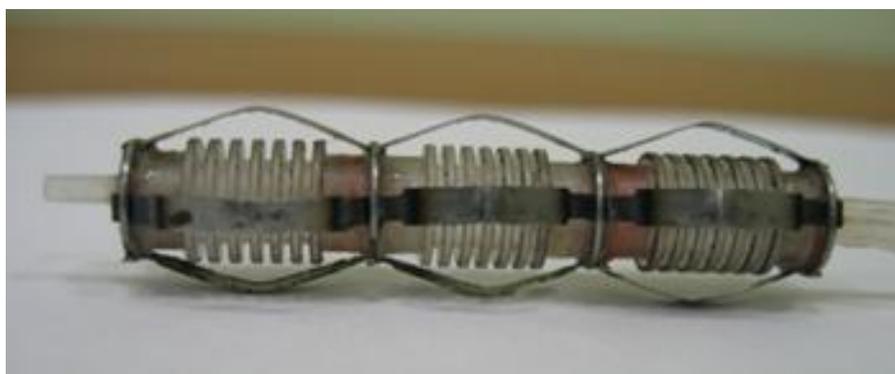
В большинстве известных работ для перемещения микроробота внутри сосуда используется принцип перемещения дождевого червя, путем последовательных сокращений

своих сегментов (принцип перистальтики). За счет продольных мышц происходит удлинение отдельных сегментов туловища, а за счет кольцевых – их фиксация, в результате чего образуется как бы “волна” сокращений, благодаря которой и происходит поступательное движение (Рис.1)



**Рис.1.** Схема движения дождевого червя

Такой же принцип был положен и в основу конструкции микроробота, разработанного в МГТУ им. Н.Э.Баумана (рис.2) [2]. Эта конструкция содержит всего три сегмента, что определяет их минимальное число для реализации движения. Здесь роль продольных удлиняющих мышц играют сами сегменты робота, способные удлиняться. Фиксаторами служат специальные контактные элементы, прижимающие конструкцию к стенкам сосуда при сжатии соответствующего сегмента.



**Рис.2.** Макет микроробота

Отметим, что сам по себе рассматриваемый принцип перемещения робота внутри труб не является новым. По сути дела, это другая реализация принципа пушпульного перемещения [3]. Однако, применение пушпульного принципа неприменимо для медицинского микроробота из-за ударных нагрузок. Система управления медицинским роботом должна обеспечить адаптивность процесса перемещения к индивидуальным особенностям биологической среды и безопасность использования робототехнического устройства внутри человеческого организма. Поскольку непосредственное управление движением робота со стороны хирурга в условиях дефицита информации является достаточно сложной задачей, то необходимо использовать современные методы искусственного интеллекта для поддержки работы хирурга. Нужно создать систему, автоматически управляющую движением микроробота внутри сосуда, обеспечивая безопасность для пациента и оставляя за хирургом только функции контроля и управления направлением и скоростью движения.

## 1. Структура системы управления

Экспериментальный макет микроробота (рис.1) имеет диаметр, меньший, чем диаметр исследуемого сосуда и опирается о стенки сосуда специальными гибкими направляющими, что позволяет избежать закупорки сосуда. Каждый сегмент робота содержит три контактных элемента, датчики давления и регулятор, обеспечивающий прижатие этих элементов к стенкам сосуда. На «борту» робота может быть установлена микро-видеокамера, обеспечивающая хирурга информацией о состоянии внутри сосуда и иная необходимая аппаратура. Гибкие направляющие снабжаются тензометрическими датчиками сил. Отличие данной конструкции от ряда других аналогичных конструкций микророботов, в том числе, применяемых для колоноскопии и при исследовании других трубчатых органов человека, в первую очередь, состоит в том, что благодаря наличию контактных элементов русло сосуда не перекрывается в момент опоры о стенки сосуда. Второе важное отличие заключается в применении гидравлического движителя с использованием в качестве рабочей жидкости физиологического раствора. При случайном повреждении оболочки робота попадание небольшого количества этого раствора в кровь не представляет опасности для пациента. При сбросе давления сегменты робота выпрямляются и его можно извлечь из сосуда. В аналогичных конструкциях микророботов, применяемых для других трубчатых органов может использоваться более простая пневматическая система питания, но она в данном случае неприменима из-за опасности эмболии. Неприменима и система, основанная на применении сплавов с памятью формы, требующих использования значительной силы тока, что совершенно неприемлемо в кровеносной среде.

Мини-робот является частью робототехнической системы, структура которой показана на рис. 3 [4]. Исполнительная часть системы включает гидропривод, вынесенный в стационарную ее часть. Это, по существу, система насосов, координированно изменяющая давление рабочей жидкости в сегментах робота. Она непосредственно приводит в движение конструкцию робота. Эта конструкция – движитель - включает сегменты робота, ко-

торые меняют свою длину при повышении давления рабочей жидкости. Возможно подключение к ней и специальных инструментов, необходимых для выполнения тех или иных операций внутри сосуда.

Как показано на схеме рис.3, на борту робота размещены микро-видеокамера, датчик давления крови и датчик давления в зоне контакта. Сенсорная информация обрабатывается в расположенной на посту управления системе обработки сенсорной информации, информация с которой передаётся в контроллер управления роботом. Здесь реализуются три уровня управления – исполнительный, логический и ситуационный, содержание которых раскрывается ниже.

Работа хирурга-оператора состоит в наблюдении за состоянием внутренней поверхности сосуда с использованием датчиков информации, установленных на роботе, и в управлении движением робота по руслу сосуда с обходом возможных препятствий. Интеллектуальный интерфейс хирурга-оператора не только позволяет контролировать процесс движения робота, но и содержит экспертную систему, облегчающую процедуру диагностики, или оперативного вмешательства.

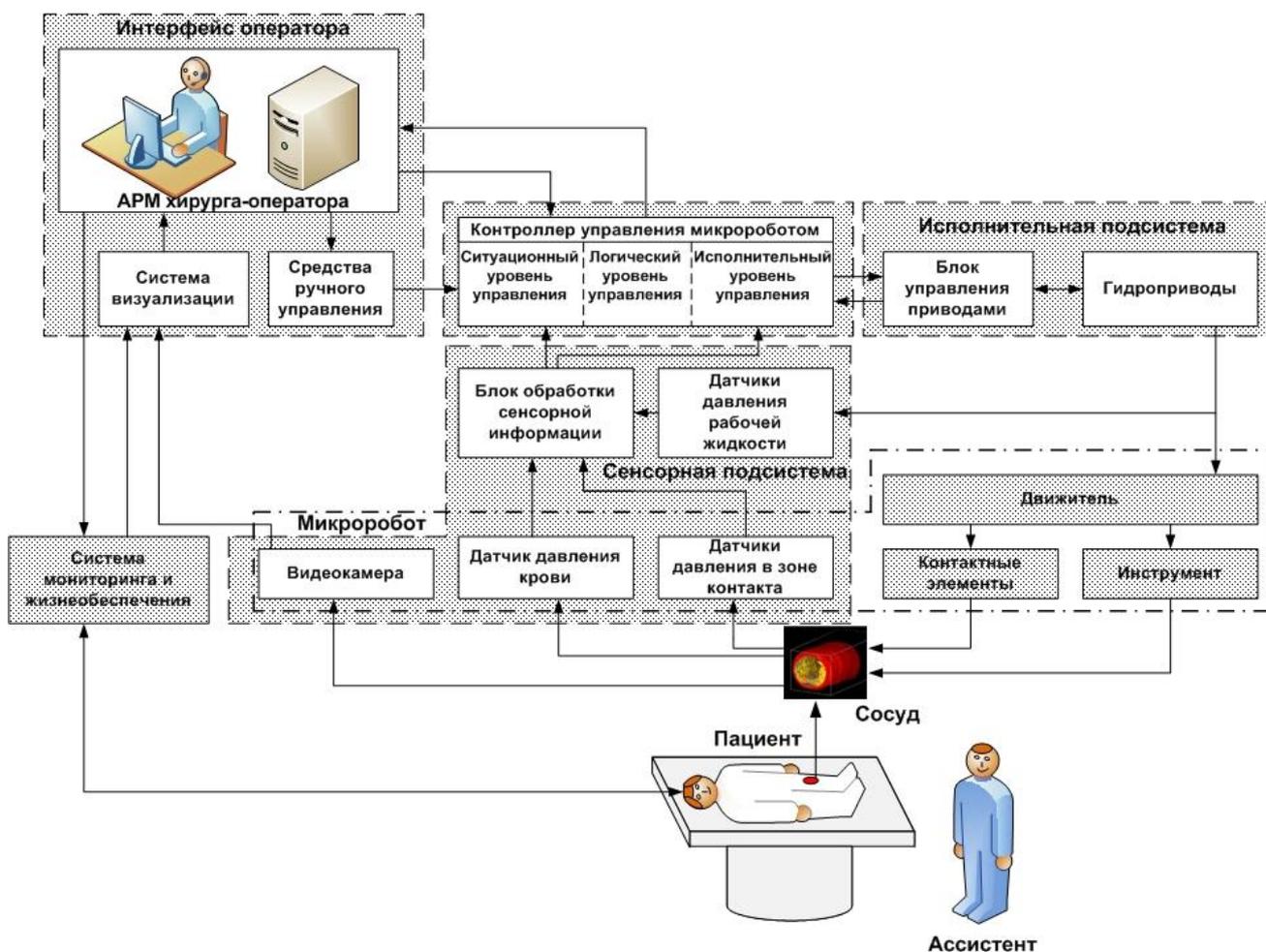


Рис. 3. Структура системы управления микророботом

## 1. Исполнительная подсистема управления как конечный автомат.

Основная особенность движения микроробота заключается в его циклическом характере, при котором сегменты последовательно принимают одно из двух возможных положений: звено активно (сжато) или пассивно (растянуто). Последовательные фазы состояния движителя робота показаны на рис.4. В нашем случае устройство имеет шесть фаз состояния, не считая нейтрального состояния, при котором все звенья выпрямлены (пассивны). В этом состоянии микроробот вводится в сосуд и извлекается из него.

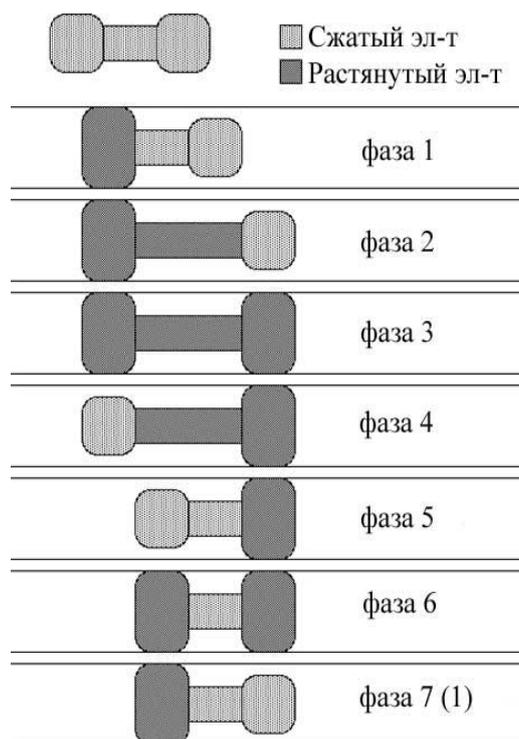
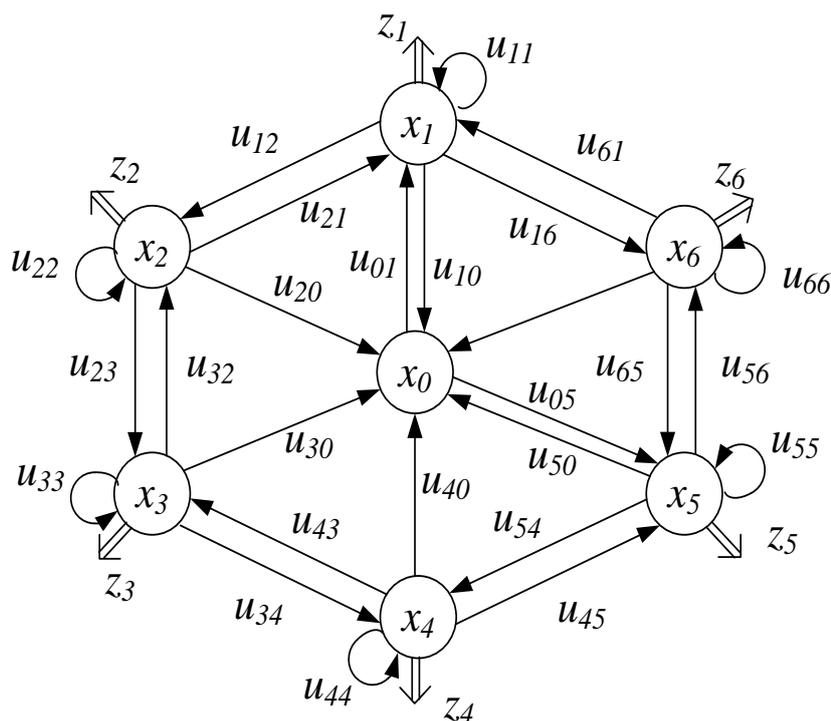


Рис. 4. Фазы состояния движителя

Математической моделью движителя является циклический конечный автомат (Мура) [5]. Граф такого конечного автомата (рис. 5), имеет шесть состояний. Конечный автомат такого типа описывается как  $A=(U, X, Z, f, h)$ . Здесь обозначено:  $X=\{x_i\}, (i=0 \dots 6)$  – состояния (фазы) движения; входной алфавит  $U = \{u_{ij}\}$ , где  $u_{ij}$  – команда «перейти из состояния  $i$  в состояние  $j$ » ( $i=0, \dots, 6, j=0, \dots, 6$ ), выходной алфавит  $Z = \{z_i\}$ , где  $z_i$  – символ перехода в фазу с номером  $i$ . Символы  $f, h$  это функции переходов и выходов соответственно. Получив команду от оператора (вперед, назад, стоп или инициализация, т.е. возвращение движителя в начальное состояние), система управления формирует цепь операций, обеспечивающую согласованную работу привода и элементов движителя и обеспечивающую реализацию перемещения робота в нужном направлении, или его остановку.

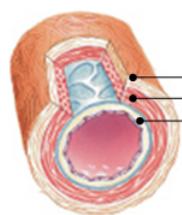


**Рис.5.** Конечный автомат, описывающий движение робота

Более детальный анализ задачи потребовал исследования условий, при которых обеспечивается удержание робота в потоке крови, «опираясь» на стенки сосуда, и перемещение внутри сосуда, не повреждая его. Это исследование было выполнено с использованием данных, касающихся физических характеристик крови и строения кровеносного сосуда [1]. Моделирование процесса выполнялось в пакете ANSYS. Принятые характеристики кровеносного сосуда и конечно-элементная модель сосуда показаны на Рис 6. Здесь же приведены и принятые допущения.

Исследование проводилось при действии на внутреннюю стенку сосуда сил прижатия со стороны контактных элементов внутрисосудистого микроробота (ВМР), показанных на рисунке. Примеры результатов исследования, а также полученные по ним выводы представлены на рис. 7. С учетом этих выводов, сила прижатия может достигать критических значений. Однако, характеристики сосудов отдельных пациентов могут сильно различаться. Следовательно, необходима адаптация силы прижатия к характеристикам сосуда в ходе конкретной операции.

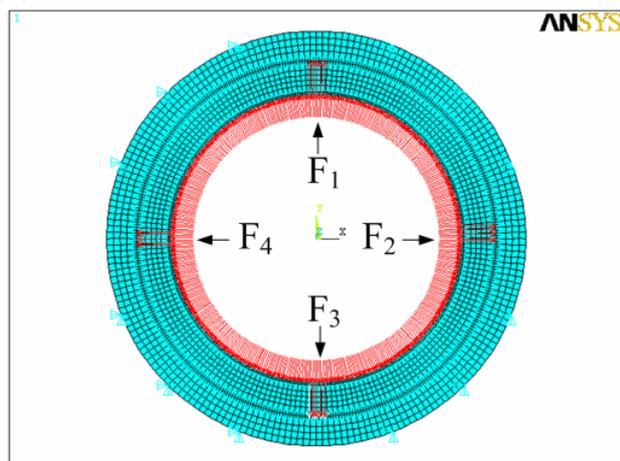
## Характеристики кровеносного сосуда\*



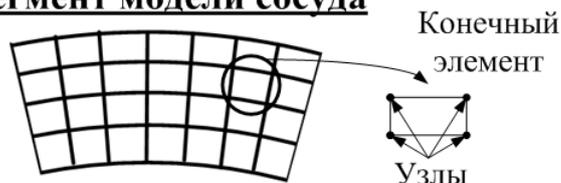
Адвентиция  
Медиа  
Интима

Слой	Динамический модуль Юнга E, МПа	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Толщина h, мкм
Интима	1,4	1020	3
Медиа	1,8	1080	27
Адвентиция	2,2	1130	600

### Конечно-элементная модель сосуда в среде ANSYS \*(Пурина Б.А., Касьянов В.А.)



#### Сегмент модели сосуда



#### Допущения:

- артерия - гибкая осесимметричная трехслойная оболочка;
- материал каждого слоя однородный и изотропный;
- наружный слой оболочки артерии жестко защемлен.

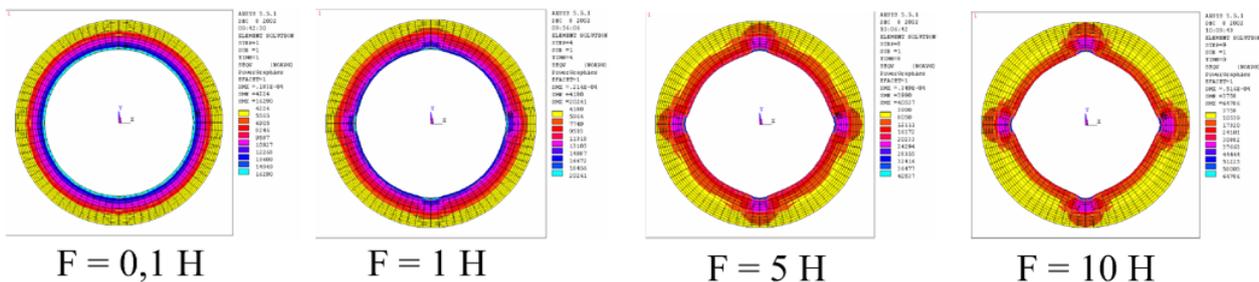
**Рис. 6.** Конечно-элементная модель кровеносного сосуда.

Еще один важный вывод из проведенных исследований состоял в том, что диаметр сильфонной оболочки не должен превышать 1/3 диаметра сосуда, так как в противном случае течение крови перестаёт быть ламинарным, что может привести к повреждению кровяных телец. Если последнее требование легко удовлетворить при создании конструкции микроробота, то первое требует создания конечного автомата, обладающего адаптивными свойствами. Решение этой задачи было найдено на пути создания нечеткого конечного автомата.

## **2. Адаптивная система управления двигателем как нечеткий конечный автомат**

Представленный на рис.5 циклический конечный автомат не полностью описывает работу микроробота. В каждом конкретном случае положения звеньев определены не точно, поскольку это зависит от конфигурации внутренней поверхности сосуда. Не полностью определена и информация, используемая для выработки сигналов управления. Таким образом, переход из одного состояния автомата в другое определяется нечеткими правилами.

## Исследование распределения напряжений по толщине сосудистой стенки при взаимодействии с контактными элементами ВМР



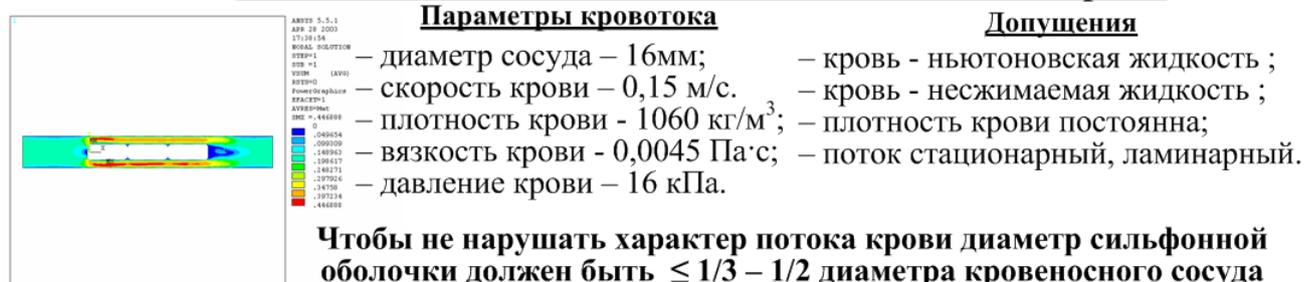
$F < 1 \text{ Н}$  - воздействие осуществляется в пределах физиологической нормы;

$1 \text{ Н} < F < 4 \text{ Н}$  - воздействие превышает физиологический предел;

$F = 4 \text{ Н}$  – критическое значение,

$F > 4 \text{ Н}$  - разрушение биоткани.

## Исследование взаимодействия ВМР с потоком крови

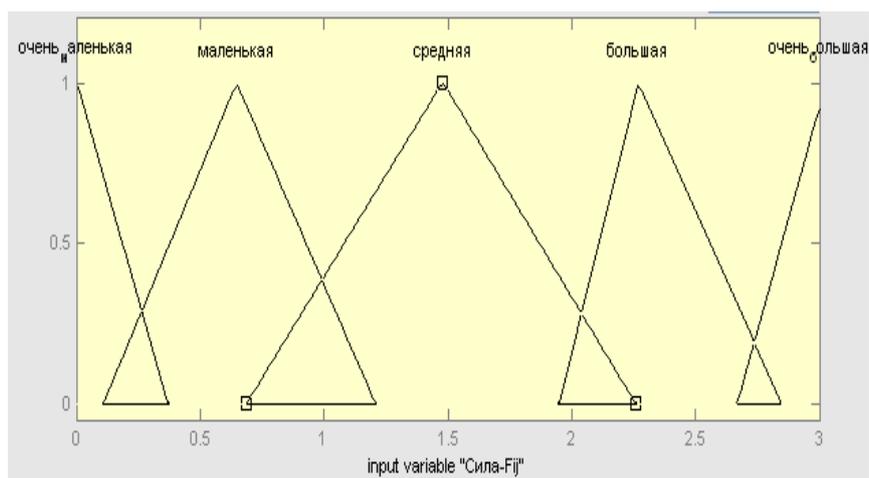


**Рис.7.** Исследование напряжений в стенке кровеносного сосуда при воздействии контактных элементов микроробота и взаимодействия конструкции робота с потоком крови

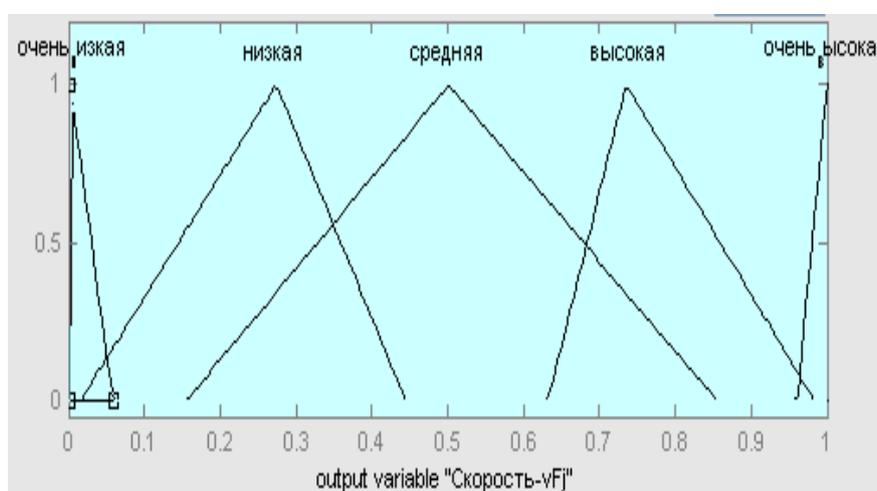
Каждый активный контактный элемент также может быть описан как нечеткий конечный автомат, управляемый соответствующим нечетким регулятором (рис.8) [4]. Входной лингвистической переменной является сила прижатия контактного элемента, а выходной – скорость прижатия. Соответствующие функции принадлежности выбираются индивидуально с учетом сосудистой системы пациента (рис.9).



**Рис.8.**Схема нечеткого контура управления контактным элементом



а)



б)

**Рис.9** Функции принадлежности для входной (а) и выходной (б) лингвистических переменных

Ниже приведен пример выбора нечетких правил принятия решений. Это продукционные правила выбора скорости прижатия контактного элемента от измеряемой тем или иным способом силы прижатия:

$R_1$ : ЕСЛИ «сила  $F_{ij}$  очень маленькая», ТО «скорость прижатия  $v_{Fj}$  очень высокая»;

$R_2$ : ЕСЛИ «сила  $F_{ij}$  маленькая», ТО «скорость прижатия  $v_{Fj}$  высокая»;

$R_3$ : ЕСЛИ «сила  $F_{ij}$  средняя», ТО «скорость прижатия  $v_{Fj}$  средняя»;

$R_4$ : ЕСЛИ «сила  $F_{ij}$  большая», ТО «скорость прижатия  $v_{Fj}$  низкая»;

$R_5$ : ЕСЛИ «сила  $F_{ij}$  очень большая», ТО «скорость прижатия  $v_{Fj}$  очень низкая».

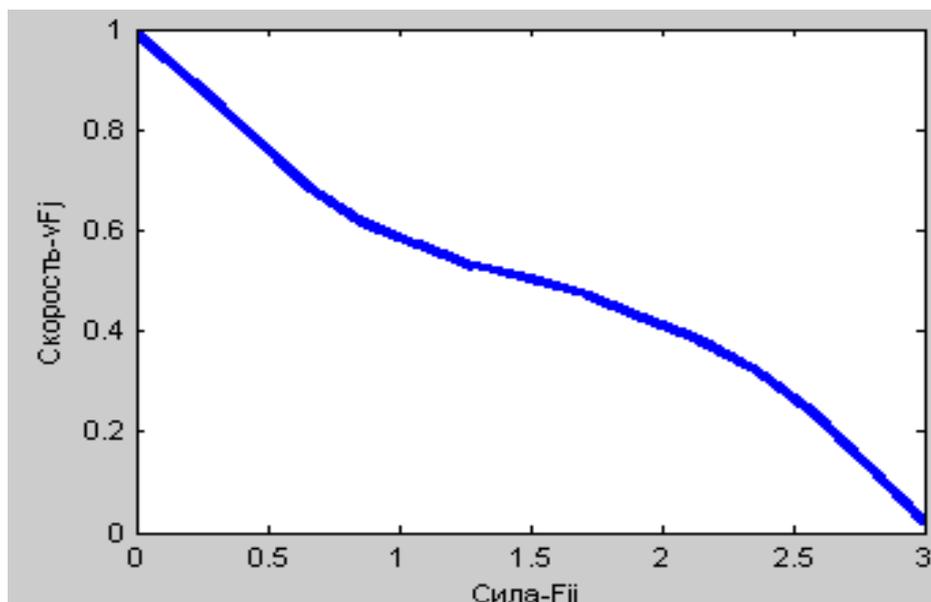


Рис. 10. Зависимость скорости прижатия от величины контактных сил.

Путем соответствующего выбора функций принадлежности (настройки) нечеткого регулятора удаётся добиться достаточно плавного снижения скорости прижатия в зависимости от измеряемых контактных сил (рис.10). Это обеспечивает плавное, безопасное для стенки сосуда соприкосновение с контактным элементом и развитие заданной силы прижима, величина которой должна быть предварительно оценена в каждом конкретном случае.

Условия перехода от одной фазы к другой для конечного автомата на рис.5 теперь зависят от того, когда закончится фаза прижима на предыдущем этапе и, следовательно, эти условия являются нечеткими и определяются состоянием внутренней поверхности сосуда. Нечеткий конечный автомат можно представить в виде схемы на рис. 11, в которой переходы нагружены нечеткими условиями.

Выходной алфавит имеет следующие значения: *stop* – остановить изменение состояния контактного элемента (КЭ); *fix* – фиксировать КЭ; *def*– расфиксировать КЭ; *ext* - удлинить звено, *gr* – сжать звено. Символы *dm* и *fm* обозначают, что получив подтверждение выполнения команд от регуляторов монитор  $M_i$  выдаёт информацию о завершении операции фиксации *fm*, или расфиксации *dm* соответствующего звена на монитор движителя  $M$ . Последний обеспечивает координированное управление всеми звеньями робота.

Логический уровень системы управления микроботом в целом можно представить в виде трехуровневой сети конечных автоматов, представленной на рис.12. Нижний уровень включает в себя регуляторы контактных элементов  $R_{1,1}, R_{1,2}, R_{1,3}, R_{1,4}, R_{3,1}, R_{3,2}, R_{3,3}, R_{3,4}$  и обеспечивает регулирование процессов прижатия элементов к стенкам сосуда. Средний уровень состоит из мониторов трех сегментов робота  $M_1, M_2, M_3$ , обеспечивающих их со-

гласованную работу с учетом поступившей команды. Верхний уровень представлен монитором двигателя  $M$  обеспечивающим реализацию перемещения микроробота посредством формирования сигналов управления состояниями сегментов в последовательности, определяемой командой оператора.

Результаты математического моделирования логического уровня управления микророботом в пакете *MATLAB Stateflow* подтвердили возможность реализации координированного управления перемещением двигателя ВМР. В дальнейшем исследования, проводившиеся на физическом макете микроробота, также подтвердили работоспособность предлагаемой схемы автоматического управления.

### 3. Ситуационный уровень управления

В проблемных ситуациях, когда перед микророботом появляются препятствия в виде кальцинированных отложений на стенках сосуда, изменения геометрии сосудистого канала (бифуркации), робототехническая система должна обеспечивать поддержку решений хирурга. Видеоизображение, получаемое с помощью микро-видеокамеры, установленной в головной части робота, анализируется, распознается тип препятствия, и формируется рекомендуемое управляющее решение. Выбор решения всегда остаётся за хирургом – оператором.

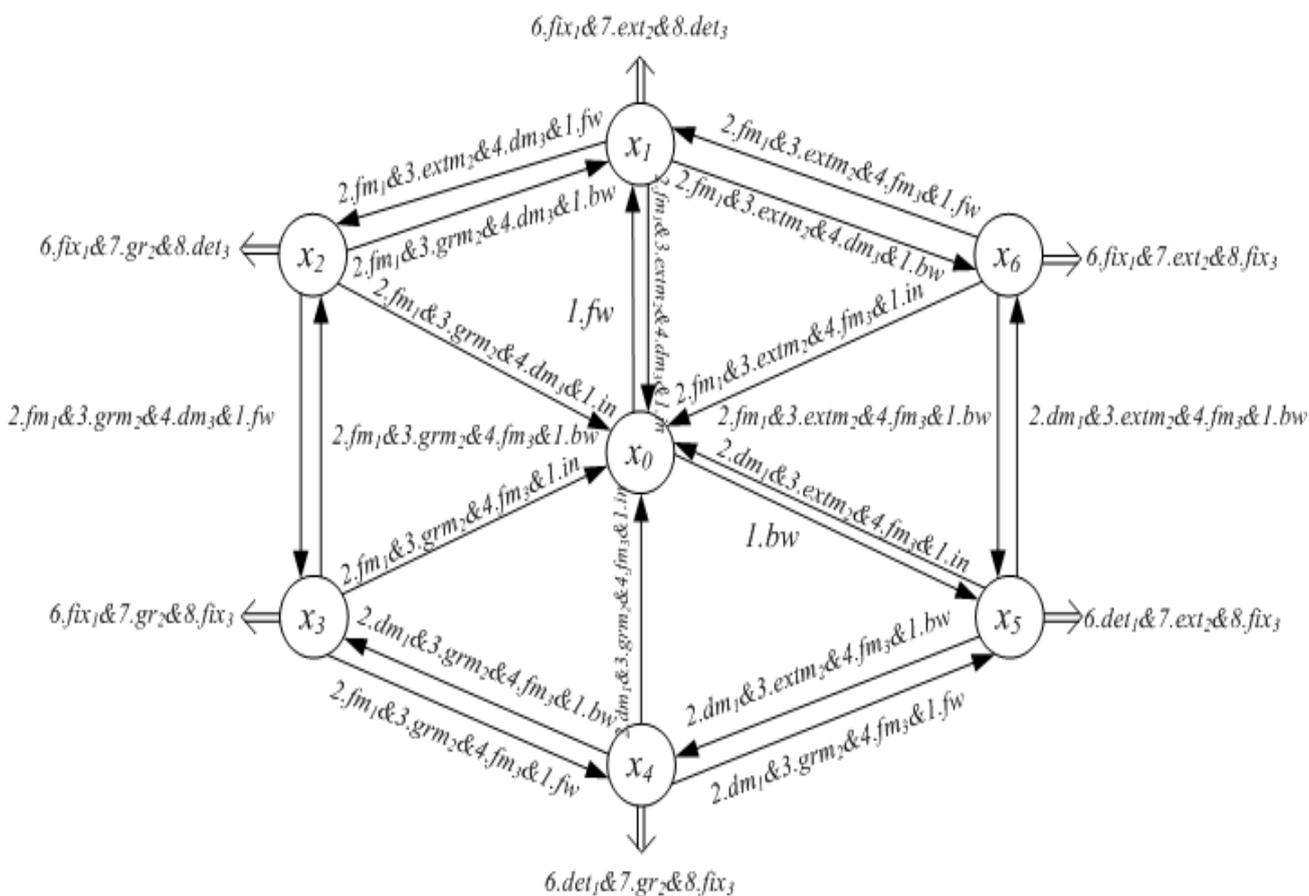


Рис.11. Нечеткий конечный автомат

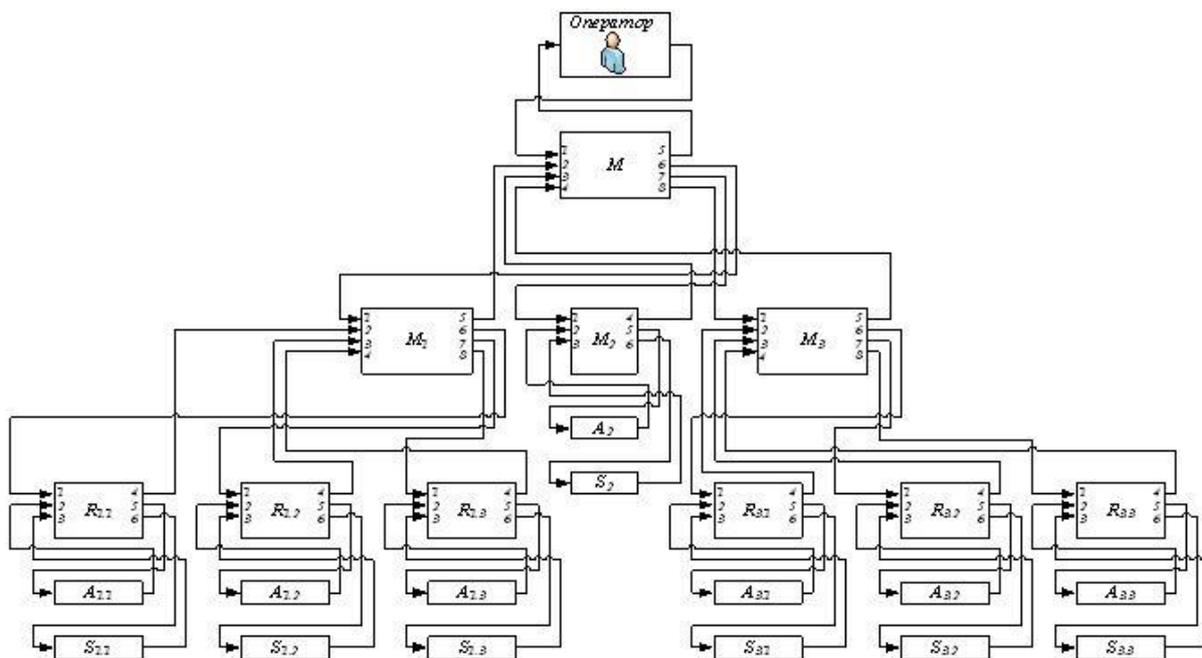


Рис.12. Схема системы управления (логический уровень)

Можно выделить следующие задачи, требующие решения на ситуационном уровне: распознавание ситуации, выбор и принятие решения, формирование рекомендуемого управляющего воздействия. Для реализации ситуационного уровня целесообразно использовать методы нечеткого ситуационного управления [ 5 ].

Распознавание ситуации, в которой находится ВМР, проводится путем сравнения входной нечеткой ситуации  $s_0$  с каждой нечеткой эталонной ситуацией  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ , содержащейся в базе данных. В качестве меры для определения степени близости нечеткой ситуации  $s_0$  к нечеткой ситуации  $s_i \in S$  ( $i=1,2,\dots,N$ ) используется степень нечеткого включения нечеткой ситуации  $s_0$  в нечеткую ситуацию  $s_i$ , которая обозначается как

$$v(\tilde{s}_i, \tilde{s}_j) = \&_{y \in Y} v(\mu_{s_i}(y), \mu_{s_j}(y))$$

Величина  $v(\mu_{s_i}(y), \mu_{s_j}(y))$  является степенью включения нечеткого множества  $\mu_{s_i}(y)$  в нечеткое множество  $\mu_{s_j}(y)$ .

Ситуация  $s_i$  нечетко включается в ситуацию  $s_0$ , если степень включения не меньше некоторого порога, определяемого условиями управления.

Решение задачи распознавания ситуации продемонстрировано на примере обхода микророботом препятствия в виде кальцинированного отложения внутри сосуда. Из кли-

нических наблюдений выделены 14 эталонных ситуаций, зависящих от ориентации патологических отложений в сосуде (рис.13). Ситуации описываются нечетким признаком «ориентация препятствия в сосуде» по отношению к микророботу.

Определим терм-множества этого признака:  $T_1 = \{T_1^1 - \text{препятствие сверху слева}, T_2^1 - \text{препятствие сверху справа}, T_3^1 - \text{препятствие снизу слева}, T_4^1 - \text{препятствие снизу справа}\}$ . Тогда все эталонные ситуации, а также текущая  $T_1^1$  ситуация могут быть представлены следующим образом как:

$S_i = \{ \langle \mu_1^1 / T_1^1 \rangle, \langle \mu_2^1 / T_2^1 \rangle, \langle \mu_3^1 / T_3^1 \rangle, \langle \mu_4^1 / T_4^1 \rangle \}$ . Здесь первая компонента выражения  $\mu_1^1 / T_1^1$  определяет степень кальцинированного отложения (от 0 до 1), а вторая компонента – его ориентацию.

В данном случае  $S_1 = \{ \langle 0,1 / T_1^1 \rangle \langle 0,1 / T_2^1 \rangle \langle 0,1 / T_3^1 \rangle \langle 0,1 / T_4^1 \rangle \}$ ,

$S_2 = \{ \langle 1 / T_1^1 \rangle \langle 1 / T_2^1 \rangle \langle 1 / T_3^1 \rangle \langle 1 / T_4^1 \rangle \}$ ,

$S_3 = \{ \langle 1 / T_1^1 \rangle \langle 1 / T_2^1 \rangle \langle 1 / T_3^1 \rangle \langle 0,2 / T_4^1 \rangle \}$ , ...

Первая и вторая ситуации соответствуют случаю наличия и отсутствия отложений. Остальные ситуации оцениваются как ситуации, отнесенные к трем уровням иерархии по степени отложения.

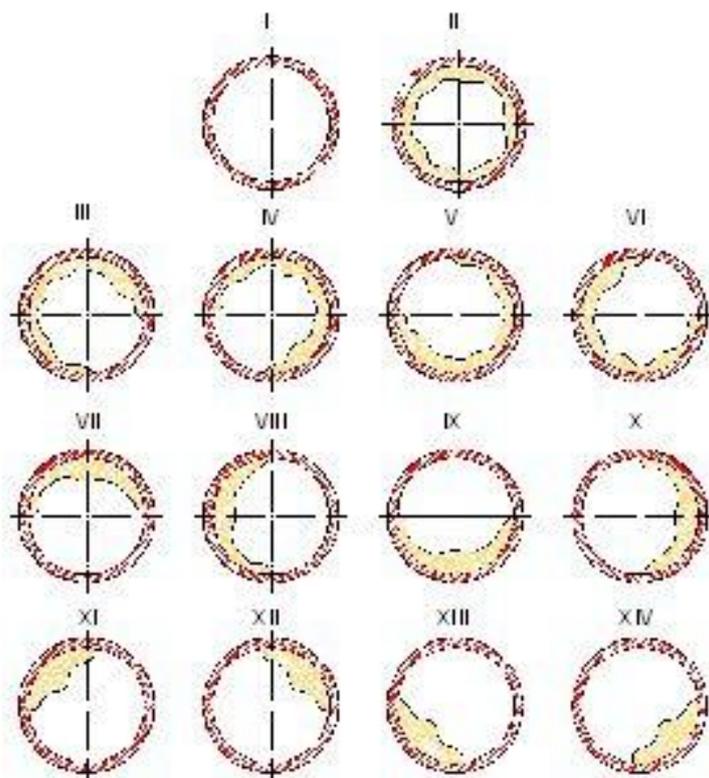


Рис. 13. Иерархия эталонных ситуаций

После распознавания ситуации, в которой находится микроробот, осуществляется выбор управляющего решения с помощью "решающей таблицы", т.е. таблицы соответствия между всеми возможными ситуациями и некоторым набором управляющих решений. Такая таблица составляется с учетом опыта хирурга. Терм-множество управляющих решений, например, может иметь следующий вид:  $R = \{R_1 - \text{повернуть вправо}, R_2 - \text{повернуть влево}, R_3 - \text{повернуть вверх}, R_4 - \text{повернуть вниз}, R_5 - \text{повернуть вправо вверх}, R_6 - \text{повернуть влево вверх}, R_7 - \text{повернуть вправо вниз}, R_8 - \text{повернуть влево вниз}\}$ .

После выбора того или иного управляющего решения осуществляется формирование управляющего воздействия. При этом вес определяемого воздействия для каждого решения определяется матрицами отношений, связывающих решения со значениями признаков текущей ситуации.

### **Заключение**

Методы нечеткой логики в настоящее время являются достаточно развитым математическим аппаратом. Помимо традиционной теории принятия нечетких решений с помощью лингвистических переменных, они включают сегодня и теорию нечетких конечных автоматов и методы нечеткого ситуационного управления. Они хорошо подходят для решения задач управления роботами в условиях неопределенности, к которым в полной мере относятся и задачи управления медицинскими роботами.

Заметим также, что предложенные принципы управления не зависят от числа звеньев микроробота и позволяют описать движение многозвенной системы, включающей большее число сегментов, и приближающейся по своему виду к биологическому прототипу – дождевому червю, перемещающемуся за счет создания бегущей трехмерной волны. Развитие микро- и нано-технологий позволят в ближайшем будущем создавать такие робототехнические системы достаточно малого размера, оснащенные всеми необходимыми сенсорными элементами. Такие устройства, проникая в отделы организма, ранее недоступные иначе как путем сложных хирургических операций, сделают такие операции мало травматическими и более безопасными для пациента.

### **Список литературы**

1. Войнов В.В., Пospelов В.И., Гаврюшин С.С. Оценка влияния микроробототехнической системы на стенки кровеносного сосуда человека // XIV науч.-техн. конференция «Экстремальная робототехника»: матер. СПб., 2004. С. 126- 133.

2. Градецкий В.Г., Князьков М.М., Фомин Л.Ф., Чашухин В.Г. Механика миниатюрных роботов. М.: Наука, 2010. 265 с.
3. Войнов В.В. Адаптивная система управления внутрисосудистым медицинским микророботом: дис. ... канд. техн. наук. М., МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009.
4. Войнов В.В., Ющенко А.С. Адаптивное управление микророботом для диагностики трубчатых органов // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. 2005. Вып. 7-8. С. 103-108.
5. Мелихов А.Н., Бернштейн Л.С., Коровин С.Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. М.: Наука, 1990. 272 с.

## **The Medical Microrobot Control System Design via Fuzzy Logic Application**

A.S. Yuschenko<sup>1,\*</sup>, V.V. Voynov<sup>1</sup>

[\\*arkadyus@mail.ru](mailto:arkadyus@mail.ru)

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

---

**Keywords:** robotic system, microrobot, fuzzy logic, linguistic variables, finite state automata, situation control

---

The aim of the investigation is the development of the instruments and technologies for diagnostics and treatment of tube-like human's organs such as blood vessels and intestines. The medical microrobots may be applied to move along the tube-like organs by the same way as a worm. Such microrobots had been presented in some works in Russia and abroad among them is a project of BMSTU. The control system of the robot has to adapt the movement process to the peculiarity of the biology environment. The safety of the application of robotic device inside the human body is the main requirement to the construction.

An experimental model of microrobot has three segments which contracting successively to ensure progressive movement of the device. The diameter of the robot is smaller than the same of the blood vessel. So it is pressed to the internal cover of the vessel by the special planes to avoid the thrombosis of the vessel. Every segment of robot contain three contact elements, pressure sensors and a regulator to control the pressure of the elements to the internal surface of the vessel. Aboard the robot is a micro-video camera has been mounted to inform the surgeon of the situation inside the vessel and other micro-devices. The supporting plates carry tens metric sensors to control the contact forces. The driver of the robot is of hydraulic type with physiologic solution to avoid the danger of embolism.

Microrobot is a part of the robotic system including also a hydro-driver mounted in the stationary part of the system and intelligent interface of the operator. The surgeon-operator has opportunity to observe the inner surface of the vessel by the sensors mounted aboard the robot and to control the robot movement along the vessel. The construction of the microrobot has to guarantee the stable position of the robot in the moving blood flow and its movement inside the vessel without any damage of the inner surface.

The peculiarity of the microrobot movement is in its cyclic type. The segments of the robot contracts successively and during the cycle they may possess only one of two states – active (contracted) or passive (stretched). The conditions of the transition from one state to another determined only approximately and depend of the current situation. So the mathematical model based on the fuzzy finite state automata concept has been proposed. The transition conditions in the model are determined by fuzzy production rules.

Such microrobots possess more wide possibilities to penetrate to distant parts of human body to perform diagnostic or surgical operation in the less traumatically way for the patient and make such operations safer.

### References

1. Voynov V.V., Pospelov V.I., Gavryushin S.S. Otsenka vliyaniya mikro-robototekhnicheskoy sistemy na stenki krovenosnogo sosuda cheloveka. *14 nauch.-tekhn. konferentsiya "Ekstremal'naya robototekhnika": mater.* [Proc. of the 14<sup>th</sup> Scientific and Engineering Conference "Extreme Robotics"]. St. Petersburg, 2004, pp. 126-133. (in Russian).
2. Gradetskiy V.G., Knyaz'kov M.M., Fomin L.F., Chashchukhin V.G. *Mekhanika miniatyurnykh robotov* [Mechanics of miniature robots]. Moscow, Nauka Publ., 2010. 265 p. (in Russian).
3. Voynov V.V. *Adaptivnaya sistema upravleniya vnutrisosudistym meditsinskim mikrorobotom. Kand. diss.* [Adaptive control system of intravascular medical microrobot. Cand. diss.]. Moscow, Bauman MSTU, 2009. (In Russian, unpublished).
4. Voynov V.V., Yushchenko A.S. Adaptive control system of the microrobot for the tube-like organs diagnostics. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Ser. 16 = Defense Engineering Problems. Ser. 16*, 2005, no. 7-8, pp. 103-108. (in Russian).
5. Melikhov A.N., Bernshteyn L.S., Korovin S.Ya. *Situatsionnye sovetuyushchie sistemy s nechetkoy logikoy* [Situation advising systems with fuzzy logic]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 272 p. (in Russian).