

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 004.896.001.63

ВНУТРИТРУБНАЯ ДИАГНОСТИКА ГАЗОПРОВОДОВ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ. ЧАСТЬ 2. УПРАВЛЕНИЕ РОБОТОМ В ТИПОВЫХ СИТУАЦИЯХ ВНУТРИ ТРУБОПРОВОДОВ

Статья поступила в редакцию 10.06.2016, в окончательном варианте 15.07.2016.

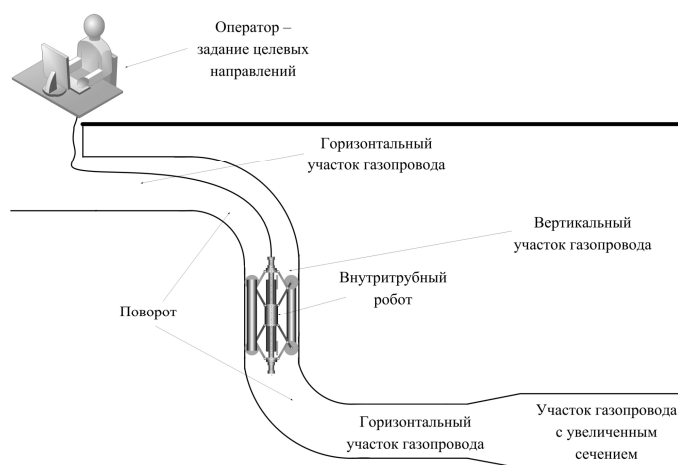
Голубкин Игорь Александрович, аспирант, Астраханский государственный технический университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, e-mail: golubkin@inbox.ru

Щербатов Иван Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, Астраханский государственный технический университет». 414025, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, e-mail: sherbatov2004@mail.ru.

На основе гибридной модели перемещения робота внутри трубы (сочетающей аналитическую модель робота и нечеткую формализацию переменных и ситуаций) поставлена задача управления инспекционным роботом для контроля трубопроводов. Разработана методика управления роботом на основе использования набора типовых ситуаций. Синтезировано алгоритмическое обеспечение реализации этой методики управления. Методика представляет собой последовательность этапов: определение наличия типовой ситуации; определение вида типовой ситуации; расчет управляющих воздействий: осевой силы в соответствии с алгоритмом управления подсистемой регуляторного уровня и скоростей в соответствии с алгоритмом вычисления скоростей колесных модулей. Показаны примеры имитационного моделирования при решении задачи управления роботом в различных режимах, а также при переходе из одного режима в другой. Разработано программное обеспечение, которое используется для решения задачи управления роботом в типовых ситуациях при движении внутри газопроводов различных конструкций.

Ключевые слова: управление, робот, внутритрубная диагностика, газопровод, типовая ситуация, гибридная модель, нечеткие множества, диагностика, методика управления роботом, сенсорная подсистема

Графическая аннотация (Graphical annotation)



INTERNAL DIAGNOSTICS OF PIPELINES WITH USE OF MOBILE ROBOTS. ВНУТРИТРУБНАЯ ДИАГНОСТИКА ГАЗОПРОВОДОВ PART 2. THE ROBOT CONTROL IN THE TYPICAL SITUATIONS INSIDE THE PIPELINE

The article has been received by editorial board 10.06.2016, in a final version – 15.07.2016.

Golubkin Igor A., post-graduate student, Astrakhan State Technical University, 16 Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: golubkin@inbox.ru

Shcherbatov Ivan A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Astrakhan State Technical University, 16 Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: sherbatov2004@mail.ru

In article is created based on the hybrid model of the robot moving inside the pipe (which combines an analytical model of the robot and the formalization of fuzzy variables and situations) the task of control of the inspection robot. Authors are developed a method for control of a robot based on typical situation, synthesized algorithmic support of the implementation of method for control. The method represents sequence of stages: definition of existence of a typical situation; definition of a type of a situation; calculation of the operating influences: axial force according to a control algorithm of a subsystem of regulatory level and speeds according to algorithm of calculation of speeds of wheel modules. Authors are showing examples

of simulation solutions management tasks the robot in different modes (when switching from mode to mode). The software developed, which is used to solve the problem of robot control in typical situations in pipelines of various designs.

Keywords: control, robot, internal diagnostics, gas pipeline, typical situation, hybrid model, fuzzy sets, diagnostics, method for control of a robot, sensor subsystem

Вопросам управления роботами, перемещающимися в трубопроводах и газопроводах различной конфигурации, посвящено значительное количество работ. При этом подходы к управлению такими мобильными роботизированными устройствами существенно отличаются.

Прежде всего, отметим, что большинство конструкций мобильного диагностического робота (МДР) включают в себя три опорных колесных модуля (КМ), расположенных в плоскостях, отстоящих на 120 градусов друг от друга. Эти КМ прижимаются к внутренней поверхности трубы и обеспечивают положение приблизительно на ее оси для основной части (корпуса) МДР. При этом тянущими могут быть как три, так и два КМ. В ряде работ предлагается прохождение сложных участков трубопровода (тройников, поворотов и пр.) за счет специального рулевого механизма, включающего двойной активный сустав (DAUJ – Double Active Universal Joint) [18]. В [2, 8] применяется оригинальное решение - реверсивное или безударное исполнение робота, состоящего из нескольких секций. Имеются также решения, сочетающие в себе ручное управление и автоматическое управление на основе ПД и ПИД-регуляторов [9, 20]. В [3] реализовано нечеткое регулирование [7, 18] в выносном модуле управления для миниатюрного внутритрубного робота. Кроме того, для управления роботами применяются нечеткие регуляторы в основном контуре [6]. Однако существующие решения не во всех случаях позволяют полностью преодолеть трудности, связанные с прохождением сложных участков трубопроводов. Это делает актуальным разработку новых аппаратных и алгоритмических решений. Задача мобильных роботов – транспортировка диагностического оборудования в трубопроводах сложной конфигурации, что должно обеспечиваться эффективной системой управления роботом, при этом анализ собираемой роботом информации о дефектах может производиться оператором – как во время движения робота, так и после завершения им инспекционного маршрута. В качестве средств диагностики могут использоваться различные устройства и приборы, позволяющие собирать требуемую информацию [10, 13–16, 19].

Постановка задачи управления. Задача управления роботом может быть формализована в виде:

$$\forall R_j \exists U_{j \rightarrow k} : R_j \xrightarrow{MM, \{TS\}, \{N\}} R_k \quad (1)$$

где R_j, R_k – текущий и конечный режимы робота соответственно; $U_{j \rightarrow k}$ – управляющее воздействие, обеспечивающее переход робота из режима R_j в режим R_k ; MM – математическая модель робота; $\{TS\}$ – множество типовых ситуаций (ТС); $\{N\}$ – множество целевых направлений, задаваемых оператором.

Таким образом, необходимо найти управляющее воздействие $U_{j \rightarrow k}$, обеспечивающее переход робота из режима R_j в режим R_k , на основе расчетов по математической модели MM , наличия различных ТС (TS) и целевых направлений (N), задаваемых оператором. При этом вопросы воздействия стохастических факторов, рисков отказов оборудования и пр. мы в рассматриваемую модель не включаем.

Описание процесса управления на основе типовых ситуаций. Управление роботом осуществляется на основе математических моделей подсистемы регуляторного и ситуационного уровней. Управление основывается на типах текущих ТС, обозначаемых как $TS = \{ts_i\}, i = \overline{1,6}$, которые встречаются роботу на маршруте его движения. Исходя из значений TS , производится выбор режимов работы системы управления. Ниже рассмотрены две группы ТС для каждой подсистемы управления:

1) TSr – группа ТС подсистемы регуляторного уровня. Значения: 1 – изменение радиуса газопровода, 2 – изменение радиуса и наклона газопровода, 3 – изменение наклона газопровода, 4 – отсутствие прецедента (прямой газопровод);

2) TSs – группа ТС подсистемы ситуационного уровня. Значения: 1 – тройник, 2 – поворот, 3 – отсутствие прецедента (прямой газопровод).

В соответствии с этими наборами значений для МДР можно выделить двенадцать режимов работы (рис. 1). При этом управление МДР в каждом из режимов осуществляется на основе аналитической модели регуляторного уровня MM_1 и продукционной модели ситуационного уровня MM_2 .

Кроме того, в процессе проведения инспекции газопроводов система управления МДР должна обеспечивать выполнение следующих функций: получение сенсорной (диагностической) информации; организация интерфейса МДР с оператором; расчет управляющих воздействий; реализация действий по управлению.

Структурная схема системы управления. Структурная схема системы управления МДР представлена на рисунке 2.

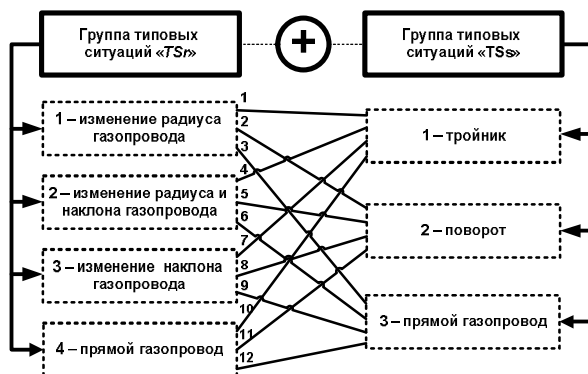


Рисунок 1 – Набор возможных типовых ситуаций при движении робота в газопроводе

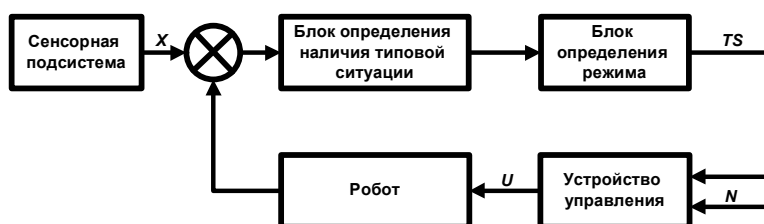


Рисунок 2 – Структурная схема системы управления

Обозначения на рисунке 2: «блок определения наличия типовой ситуации» – в нем на основании данных сенсорной подсистемы производится определение наличия ТС по соответствующему алгоритму; «блок определения режима» – в нем осуществляется определение видов режимов R ; «устройство управления» – в нем производится вычисление набора управляющих воздействий U на основании математической модели, алгоритмов управления и целевого направления, заданного оператором.

Рассмотрим подробнее каждый из блоков системы управления, а также ограничения, накладываемые на действия МДР в ТС.

Геометрические ограничения: в отношении поворотов подробно указаны в работе [18], а для тройников – представлены в [17]. Кроме того, присутствуют ограничения на осевую силу (рассчитываемую в подсистеме регуляторного уровня), обеспечивающую прижатие КМ к стенкам газопровода:

$$0 \leq F_{oc} \leq \frac{mg \cos \gamma}{k_1} (k_2 k_4 \mu + k_3), \quad (2)$$

где F_{oc} – осевая сила, развиваемая центральным двигателем МДР; k_1, k_2, k_3, k_4 – коэффициенты, учитывающие геометрию робота и газопровода [20].

Скорость каждого КМ ограничена той максимальной скоростью, которую может обеспечить двигатель, установленный на КМ. Поскольку вычисление скоростей КМ производится с использованием продукционной модели ситуационного уровня, то в случае изменения параметров двигателя необходима корректировка графиков функций принадлежности и значений в универсальном базовом множестве.

Методика управления и алгоритмическое обеспечение. С учетом выделенных ТС и построенной гибридной модели МДР, была разработана методика управления. Она включает в себя алгоритмы определения текущей ТС и правила формирования управляющих воздействий [4]. Методика представляет собой последовательность этапов, представленную на рисунке 3: *этап 1* – определение наличия ТС; *этап 2* – определение вида ТС; *этап 3* – расчет управляющих воздействий: осевой силы (в соответствии с алгоритмом управления подсистемой регуляторного уровня) и скоростей (в соответствии с алгоритмом вычисления скоростей КМ).

Сенсорная подсистема МДР включает в себя следующее: три лазерных дальномера, неподвижных относительно корпуса робота, установленных на каждом КМ; лазерный дальномер, установленный под углом 45° (угол θ) относительно центральной оси робота, который приводится в движение двигателем и используется для проведения измерений в разных точках всего сечения газопровода (рис. 4а); модуль для определения угла наклона трубопровода относительно вертикали и угла ориентации КМ.

Для измерения расстояний используются лазерные дальномеры с погрешностью измерений ± 1 мм, а углов – модуль измерения угла наклона, включающий гироскоп и акселерометр, что позволяет производить измерения, как на стационарных, так и на движущихся объектах с точностью $\pm 0,5^\circ$. В качестве привода для подвижного дальномера применяется шаговый двигатель с шагом в $3,6^\circ$. Учитывая внутренние размеры трубы и движение робота, для определения радиуса поворота требуется скорость вращения системы с подвижным дальномером не менее 17 об/мин. За один оборот подвижный дальномер производит 100 измерений.

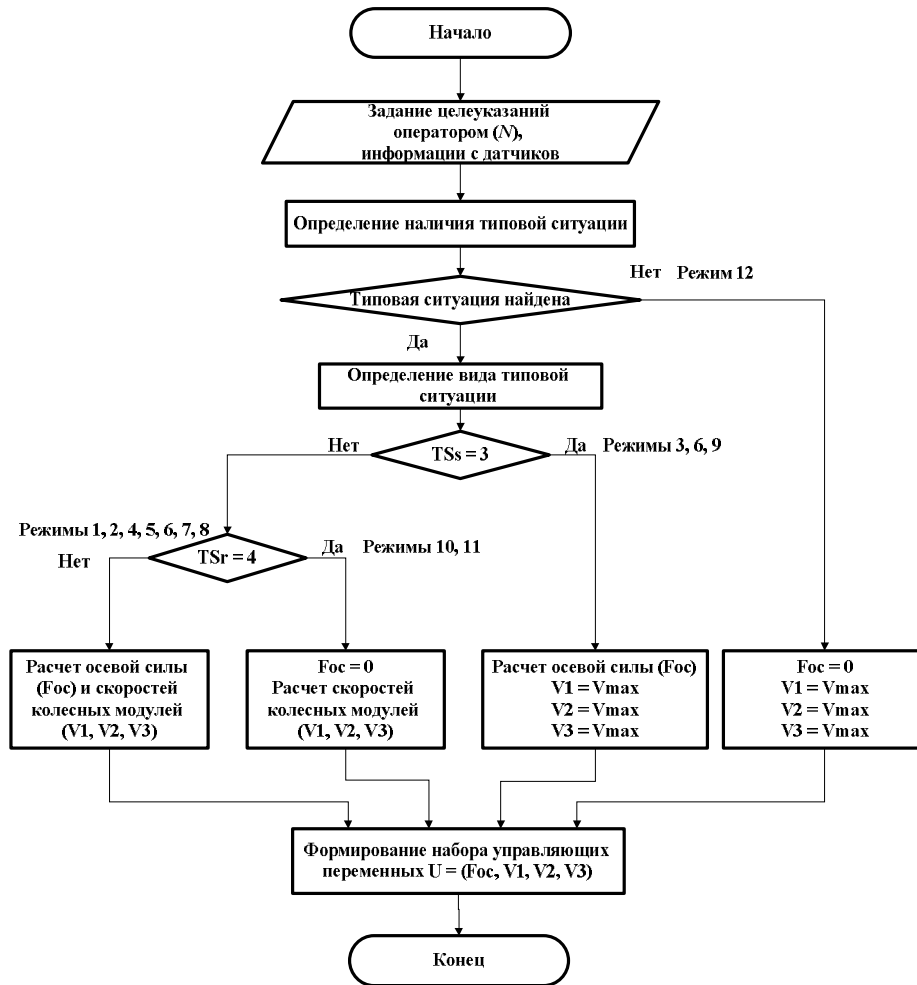


Рисунок 3 – Алгоритм реализации методики управления роботом

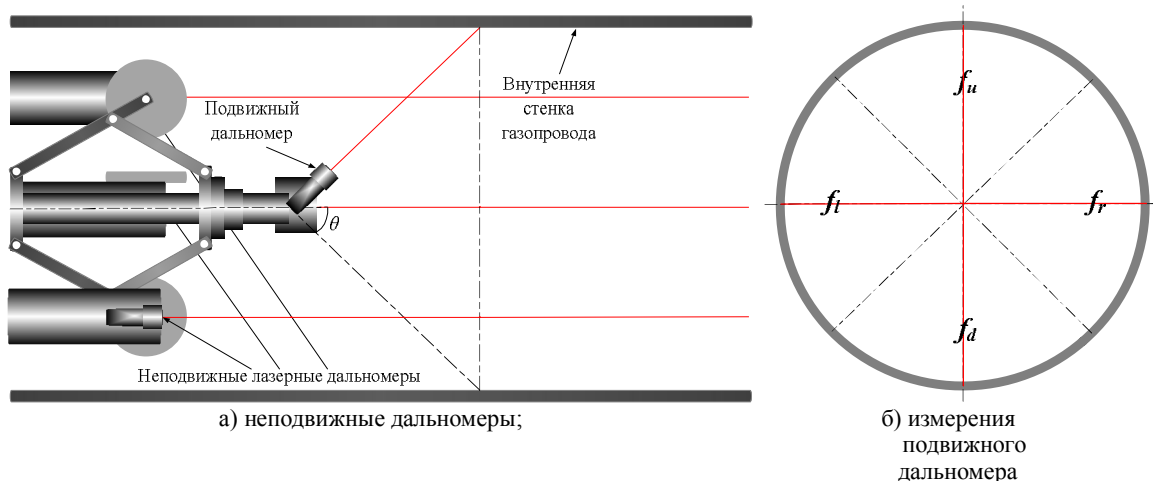


Рисунок 4 – Расположение средств измерения робота

Введем следующие обозначения: d_1, d_2, d_3 – расстояния, измеренные неподвижными дальномерами, установленными соответственно на 1-ом, 2-ом и 3-ем КМ; f_u, f_d, f_r, f_l – множества измерений подвижного дальномера, попадающие в соответствующие секторы, указанные на рисунке 4б.

Алгоритм, позволяющий по данным сенсорной подсистемы определять наличие или отсутствие ТС, представлен на рисунке 5. Если ТС присутствует (обнаруживается), то следующим шагом является определение ее вида. Определение вида ТС для подсистем ситуационного и регуляторного уровней производится на основе тривиальных алгоритмов, основанных на сравнении углов, расстояний и радиусов.

Результаты экспериментального исследования. Исследования режимов работы МДР проводились в среде Simulink системы инженерных расчетов MATLAB для подсистем регуляторного и ситуационного уровней в каждом из возможных режимов функционирования, показанных на рис.1.

Первоначально были исследованы режимы 1 ... 3, для которых $TSr = 1$, а $TSs = 1$ (тройник), $TSs = 2$ (поворот), $TSs = 3$ (горизонтальный газопровод) соответственно. Значения входных параметров представлены в таблице 1, установившиеся значения выходных параметров в таблице 2, а графики изменения во времени выходных параметров приведены на рисунке 6. Затем было проведено исследование режимов 4 ... 6, для которых $TSr = 2$ (табл. 1, 2, рис. 7). Значения параметров и графики их изменения для режимов 7 ... 9 приведены в таблицах 1, 2 и на рисунке 8, а для режимов 10 ... 12 – на рисунке 9. Графические материалы, на которых наглядно обозначены входные параметры, приведены в работе [5].

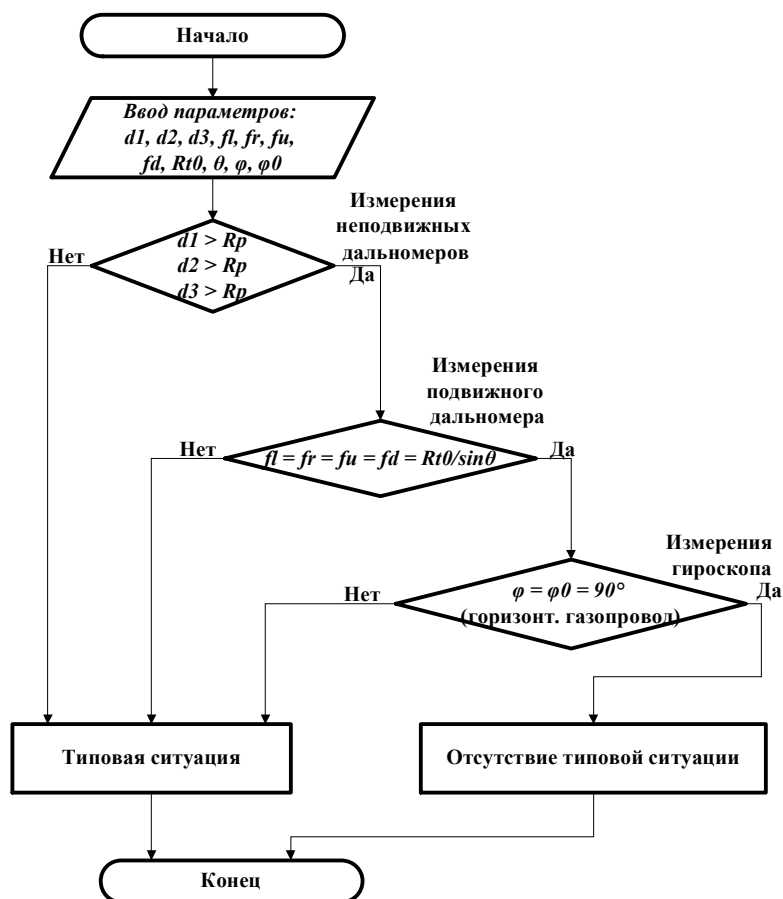
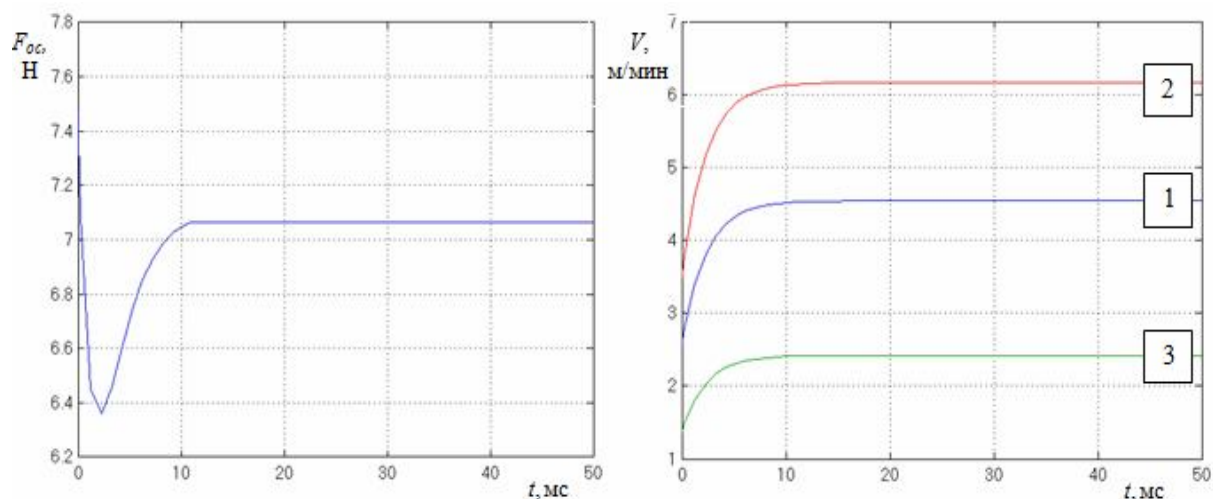


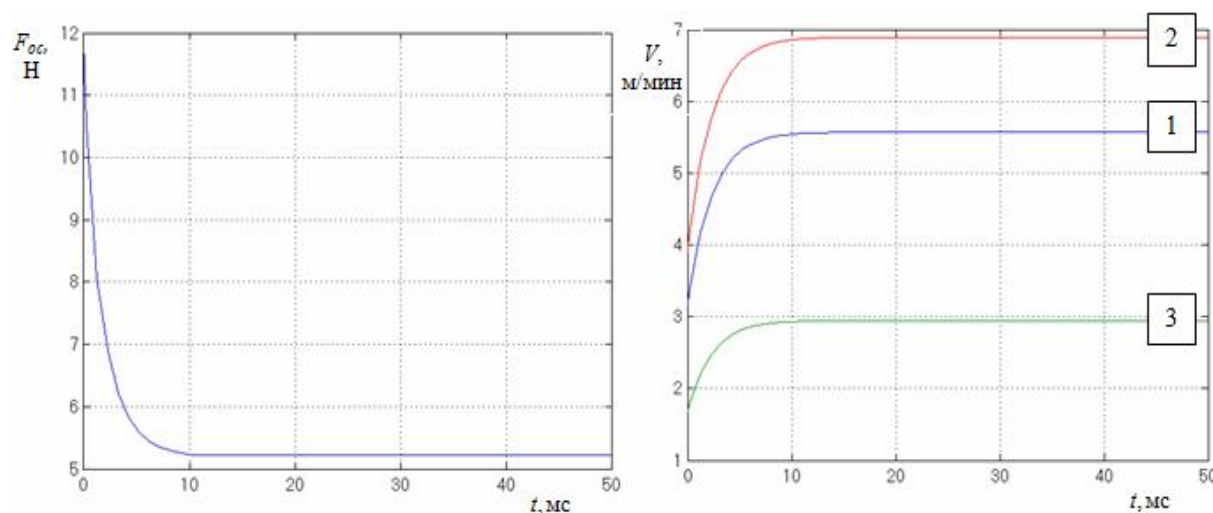
Рисунок 5 – Алгоритм определения наличия типовой ситуации

Таблица 1 – Значения входных параметров

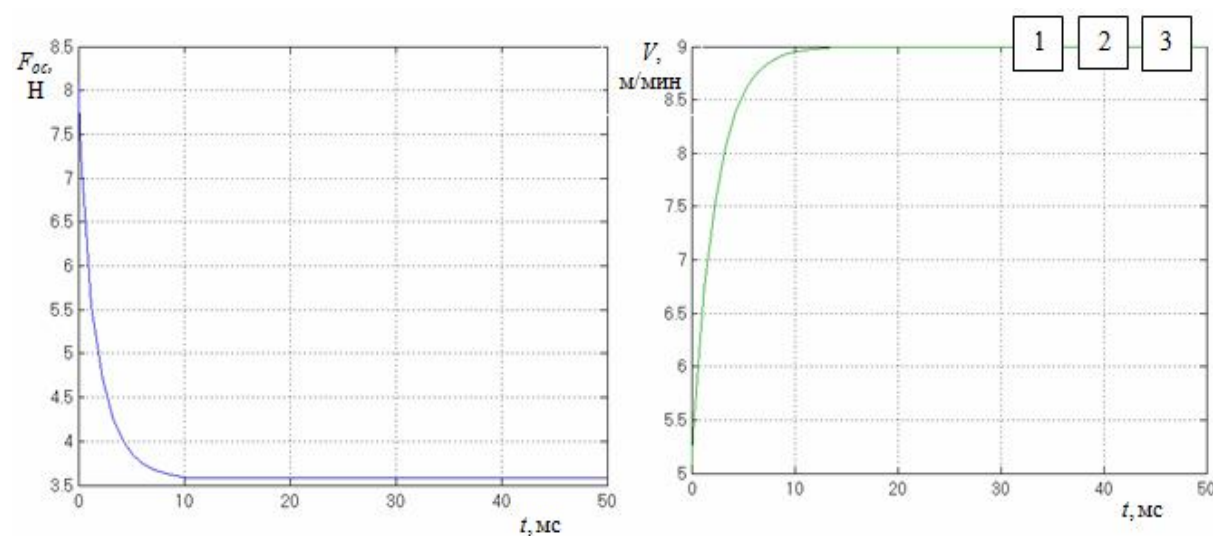
TSs	φ , рад	R_p , мм	γ , рад	N	R_p , мм	β_p , рад	β_1 , рад	β_2 , рад
$TSr = 1$								
1	1,047	45	0,873	4	610	–	5,023	1,071
2	0,342	46	0,395	–	781	4,228	–	–
3	0,192	46	0,843	–	–	–	–	–
$TSr = 2$								
1	0,625	50	1,618	4	961	–	1,072	4,831
2	0,675	43	1,544	–	911	0,349	–	–
3	1,092	46	2,261	–	–	–	–	–
$TSr = 3$								
1	0,257	46	2,494	1	623	–	0,413	3,214
2	1,364	47	0,265	–	408	4,320	–	–
3	0,655	52	0,556	–	–	–	–	–
$TSr = 4$								
1	1,571	49	2,797	2	759	–	2,011	0,298
2	1,571	46	1,378	–	406	2,207	–	–
3	1,571	48	0,627	–	–	–	–	–



а) Режим № 1 ($TSr = 1$, $TSs = 1$);



б) Режим № 2 ($TSr = 1$, $TSs = 2$);



в) Режим № 3 ($TSr = 1$, $TSs = 3$);

Рисунок 6 – Графики изменения выходных параметров

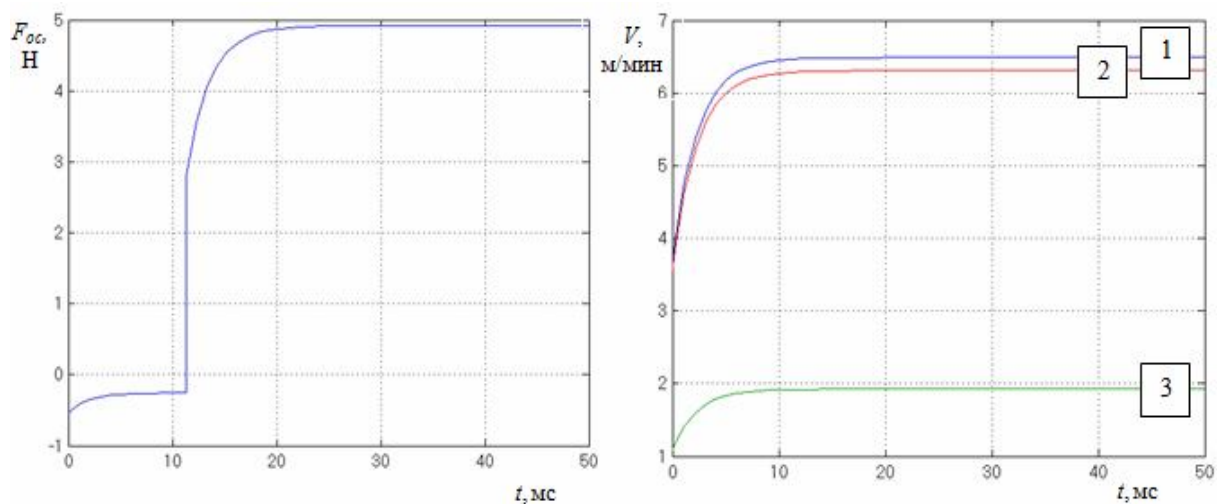
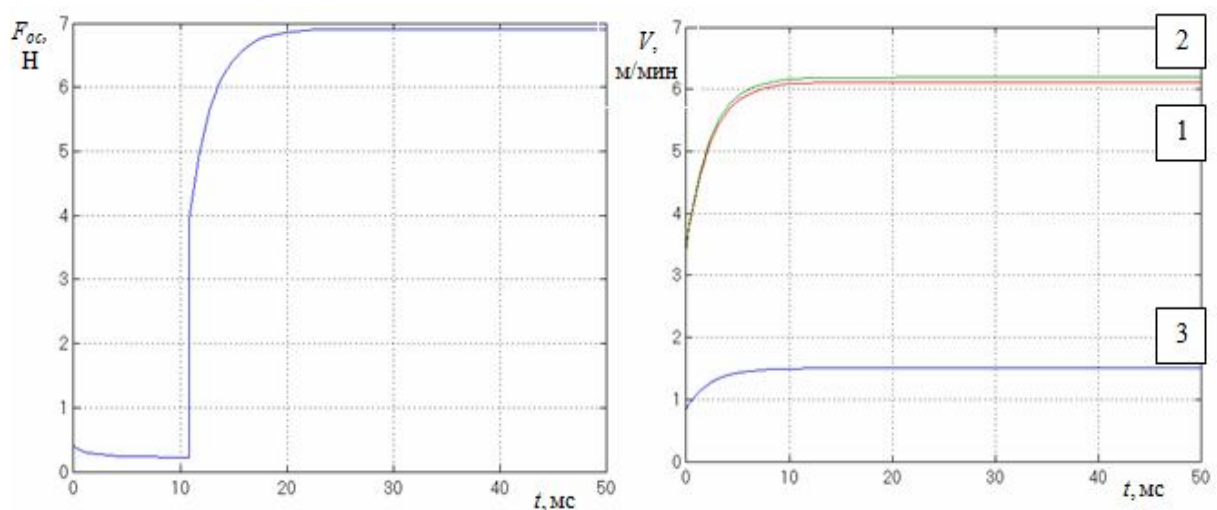
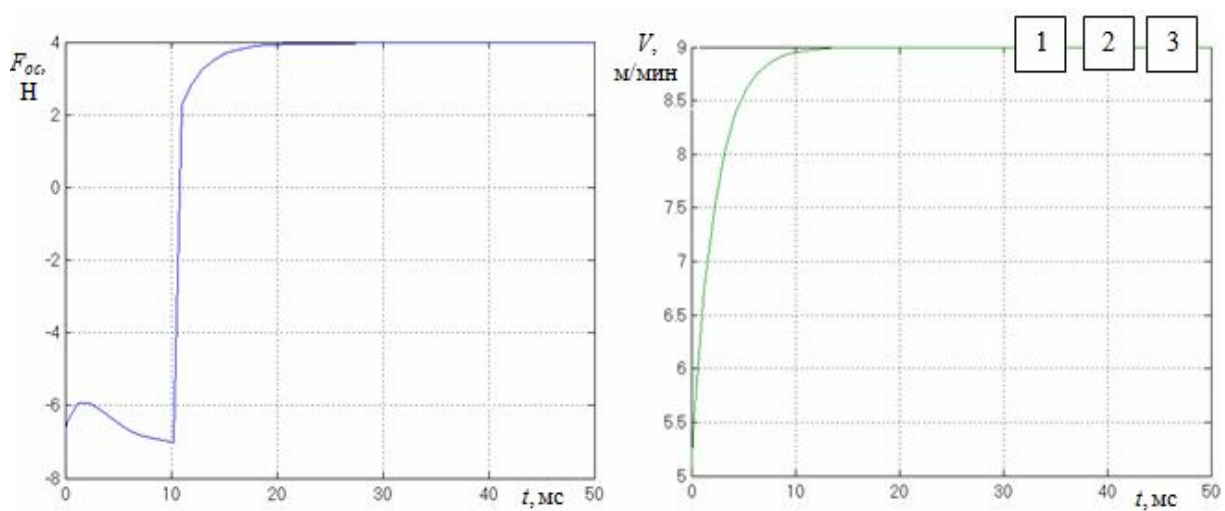
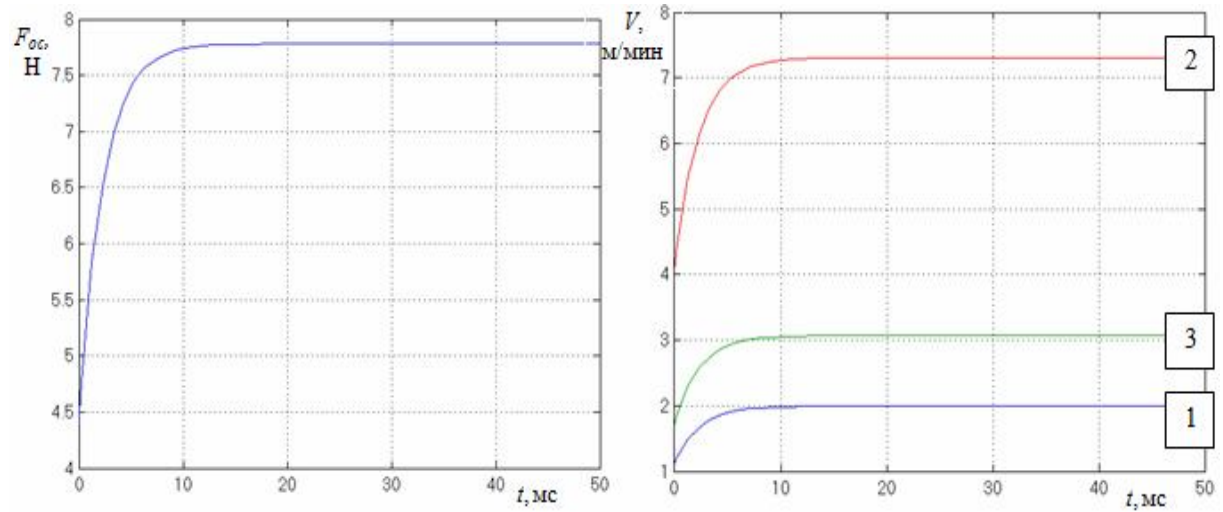
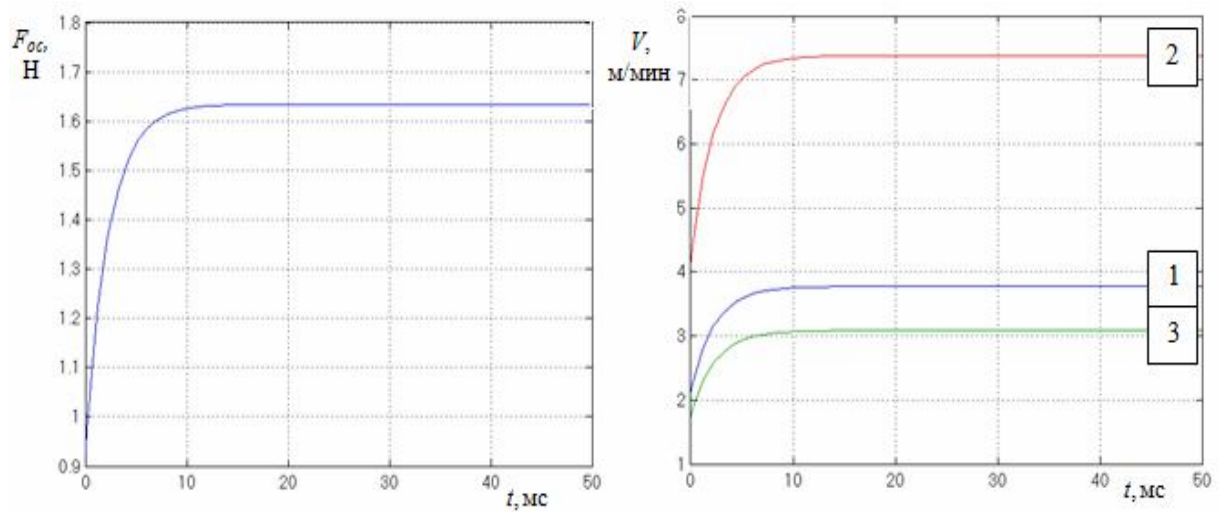
а) Режим № 4 ($TSr = 2$, $TSs = 1$);б) Режим № 5 ($TSr = 2$, $TSs = 2$);в) Режим № 6 ($TSr = 2$, $TSs = 3$);

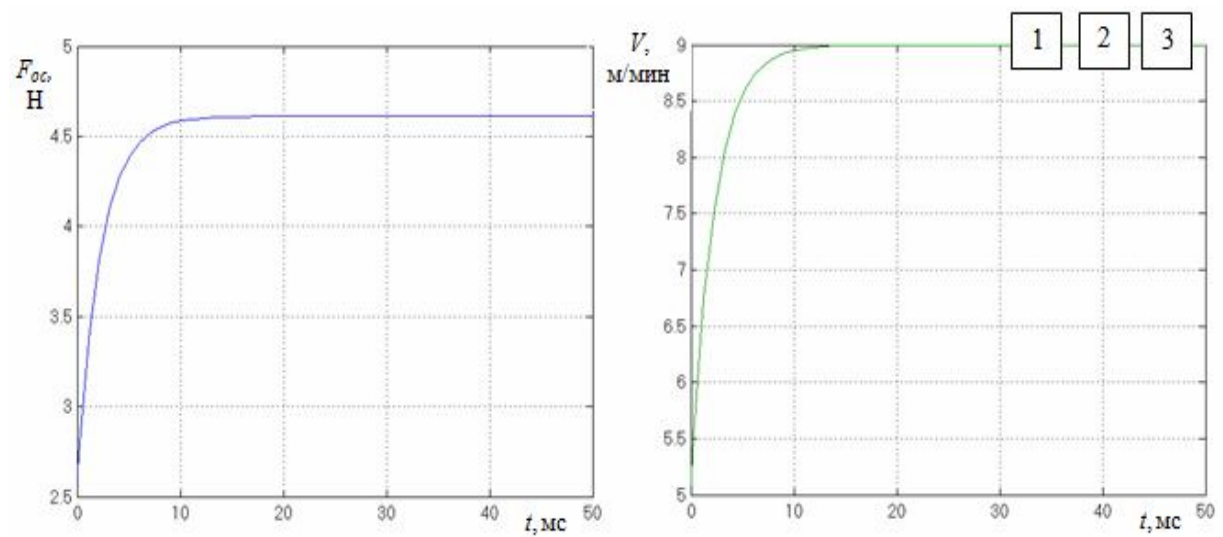
Рисунок 7 – Графики изменения выходных параметров



а) Режим № 7 ($TSr = 3, TSs = 1$);



б) Режим № 8 ($TSr = 3, TSs = 2$);



в) Режим № 9 ($TSr = 3, TSs = 3$);

Рисунок 8 – Графики изменения выходных параметров

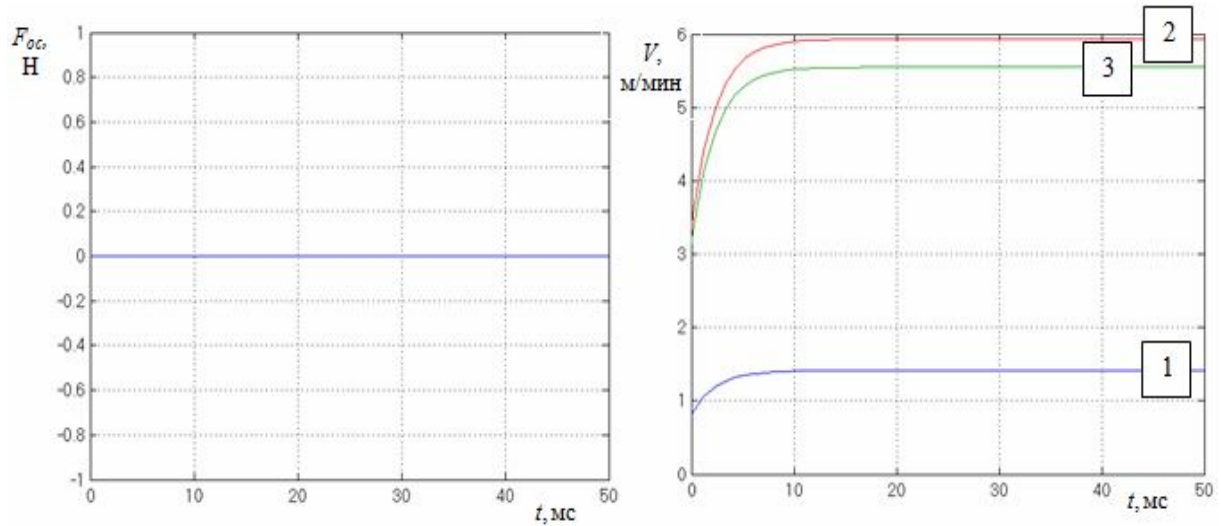
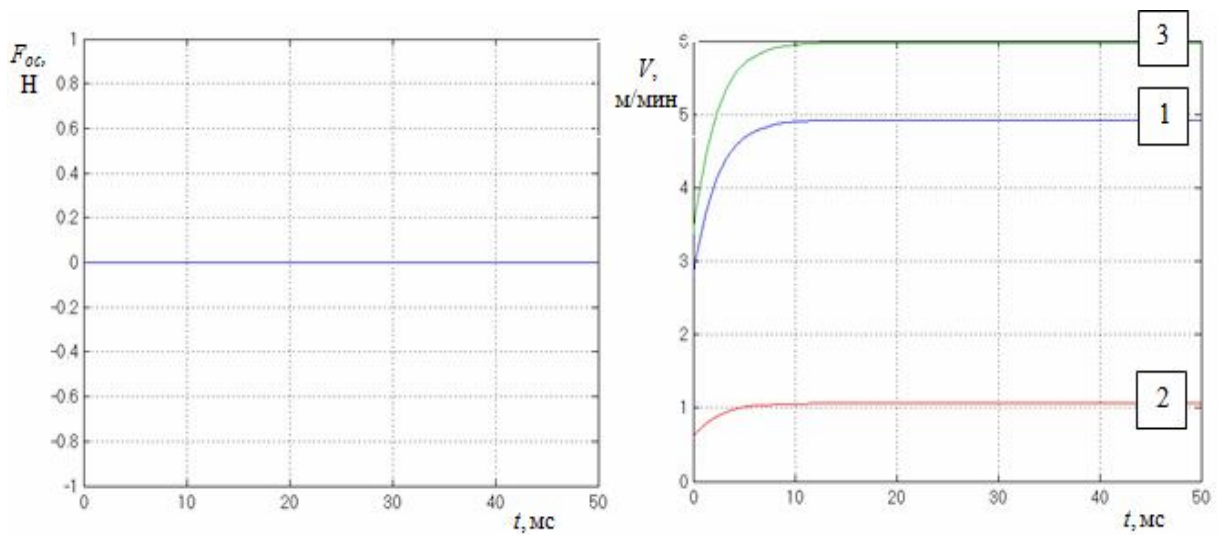
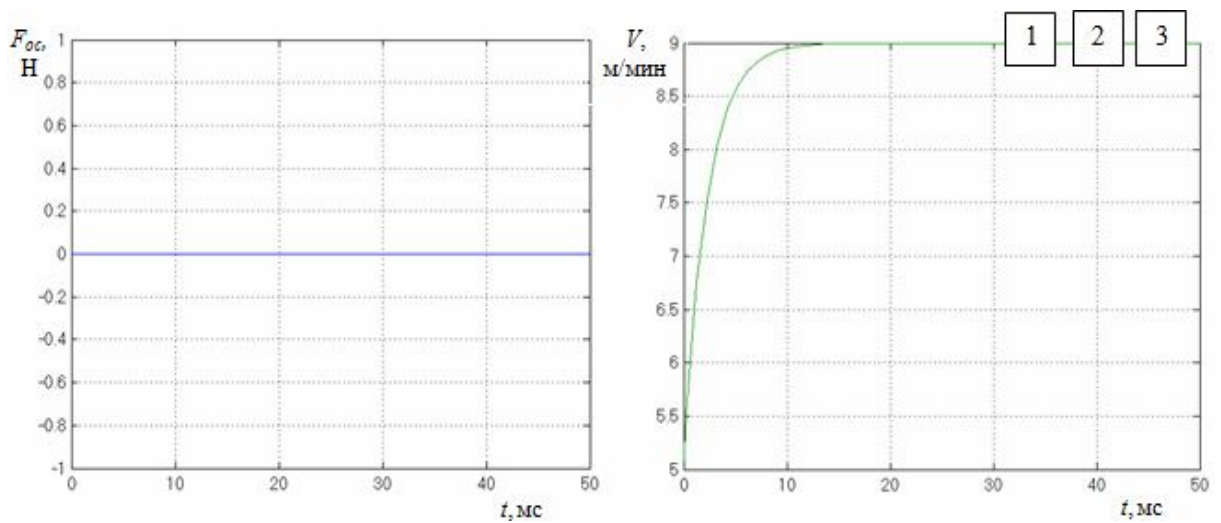
а) Режим № 10 ($TSr = 4$, $TSs = 1$);б) Режим № 11 ($TSr = 4$, $TSs = 2$);в) Режим № 12 ($TSr = 4$, $TSs = 3$);

Рисунок 9 – Графики изменения выходных параметров

Таблица 2 – Установившиеся значения выходных параметров

TSs	$F_{ост}$ Н	V_1 , м/мин	V_2 , м/мин	V_3 , м/мин
TSr=1				
1	7,065	4,539	6,161	2,419
2	5,213	5,571	6,893	2,948
3	3,579	9,00	9,00	9,00
TSr=2				
1	4,919	6,487	6,307	1,924
2	6,911	1,504	6,114	6,189
3	3,971	9,00	9,00	9,00
TSr=3				
1	7,780	1,993	7,308	3,068
2	1,634	3,773	7,380	3,084
3	4,611	9,00	9,00	9,00
TSr=4				
1	0,00	1,413	5,932	5,549
2	0,00	4,927	1,061	5,983
3	0,00	9,00	9,00	9,00

Программное обеспечение системы управления. В среде Visual Studio был разработан интерфейс оператора МДР, представленный на рисунке 10. Этот интерфейс состоит из следующих элементов [11, 12]. (1) Блок текущих входных параметров, относящихся к состоянию робота и газопровода. Эти данные получаются на основании датчиков робота. (2) Блок для ввода оператором информации о маршруте робота включает такие параметры: количество тройников, которые должны быть встречены роботом на его маршруте; направления движения для каждого тройника; общая длина маршрута. (3) Блок, предназначенный для отображения текущих промежуточных и выходных параметров робота. Они вычисляются в системах ситуационного (скорости) и регуляторного (силы) уровня. (4) Изображение с видеокamеры, установленной на роботе. (5) Блок ручного управления роботом. Оно может применяться в критических или нестандартных ситуациях.

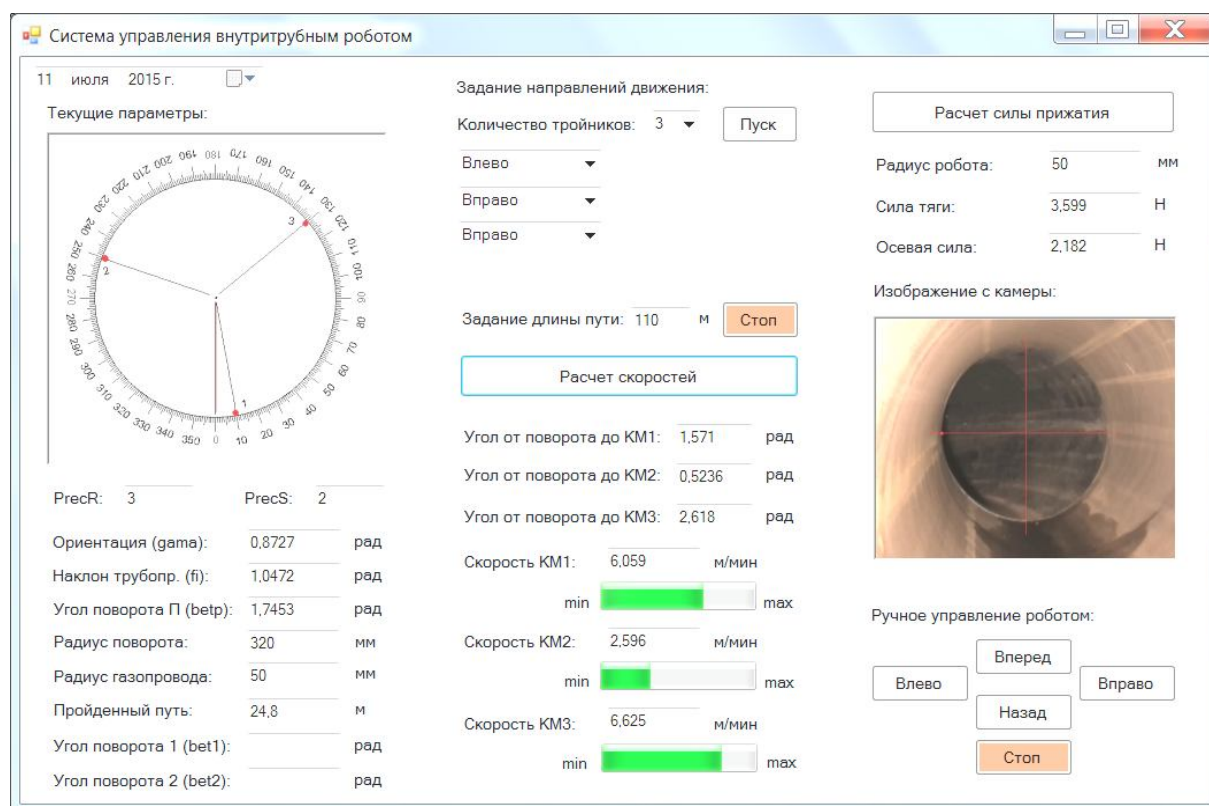


Рисунок 10 – Интерфейс оператора для системы работы с МДР

Заключение. Создана методика управления МДР для внутритрубной инспекции газопроводов. Эта методика позволяет роботу преодолевать все выявленные прецеденты (объекты, встречающиеся по ходу движения). Методика отличается использованием алгоритмов по определению типов прецедентов и правил выбора алгоритмов по формированию управляющих решений в зависимости от текущей ситуации.

Синтезировано следующее алгоритмическое обеспечение системы управления МДР: алгоритм управления подсистемой регуляторного уровня робота, позволяющий управлять его центральным двигателем с целью прижатия КМ к стенкам газопровода; алгоритм функционирования модели подсистемы ситуационного уровня, позволяющий определять требуемые скорости КМ; алгоритмы определения типов прецедентов.

Для оценки эффективности разработки было проведено исследование по диагностике трубопровода с использованием разработанного МДР и традиционного устройства, применяемого для этой цели. В результате было выявлено, что за одно и тоже время при использовании разработанного МДР, количество пройденных участков трубопроводов увеличилось на 40%, а количество участков, где не потребовалось участие оператора, возросло на 20–80%. В данном случае указание диапазона значений вместо единственной величины связано с тем, что исследования проводились на моделях МДР, имеющих разные размеры.

Список литературы

1. Бобырь М. В., Милостная Н. А. Нечеткая модель интеллектуальной системы управления мобильным роботом // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2015. № 3. С. 57-67.
2. Бобырь М.В., Титов В.С., Милостная Н.А., Глобин П.В. Оценка достоверности при моделировании нечетко-логических систем // Промышленные АСУ и контроллеры. 2012. № 7. С. 32-38.
3. Воротников С. А., Никитин Н. И., Чеккарелли М. Система управления миниатюрным внутритрубным роботом // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015. № 8. С. 49-57.
4. Голубкин, И. А. Модификация модели нечеткого ситуационного управления для решения задачи перемещения мобильного робота в газопроводе // Материалы Пятой всероссийской научно-практической конференции «Наука, образование, инновации: пути развития». – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2014, – Ч. I, – С. 31-37.
5. Голубкин, И.А. Математическая модель мобильного робота для внутритрубной диагностики газопроводов / И.А. Голубкин // Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы современного машиностроения». Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – С. 72-76.
6. Егоров И. Н., Матлуб М. М. Управление роботами на основе позиционно-силовых и нечетких визуальных алгоритмов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2010. Вып. 1. С. 158-165.
7. Князьков М. М., Семенов Е. А., Рачков М. Ю. Многозвенные роботы для движения внутри труб малых диаметров // Машиностроение и инженерное образование. 2009. № 1. С. 31-36.
8. Седлер М. Х., Седлер М. И. Разработка робота для проведения диагностических работ внутри трубопроводов сложных конфигураций. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://www.mmf.spbstu.ru/mese/2013/238_246.pdf (дата обращения 05.03.2016).
9. Тачков А. А., Калинин С. В., Малыхин А. Ю., Волков А. Г. Управление поворотом полезной нагрузки робота для движения по трубопроводам малых диаметров // Инженерный вестник. 2014. № 12. С. 646-654.
10. Целых Д.С., Кугузов Д.В. Устройства для анализа и оценки состояния дорожного покрытия // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии, 2012- №4, с.23-30.
11. Щербатов И.А., Голубкин И.А. Мультиробот 1.0 // Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем. 2010. № 7. С. 403.
12. Щербатов И.А., Голубкин И.А. Система управления мобильным колесным роботом для внутритрубной диагностики газопроводов // Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем. 2015. № 7. С. 385.
13. Lopez, J. M. Small pig for inspection pipeline / J. M. Lopez, S. Sadovnychiy // Robotics and Automotive Mechanics Conference, 2007. – CERA 2007, – P. 585-590.
14. Neubauer, W. A spider-like robot that climbs vertically in ducts or pipes / W. Neubauer // In IEEE/RCJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems. – Sep. 1994. – P. 1178-1185.
15. Nishikawa H. In-pipe wireless micro locomotive system / H. Nishikawa, T. Sasaya, T. Shibata, T. Kneko, N. Mitumoto, S. Kawakita, N. Kawahara // In Proceedings of 1999 International Symposium on Micromechatronics and Human Science. – 1999. – P. 141-147.
16. Okamoto, J. Autonomous System For Oil Pipelines Inspection J. Okamoto, J. C. Adamowski, M. S. G. Tsuzuki, F. Buiocchi, C. S. Camerini // Mechatronics, – 1999. –Vol. 9. – P. 731-743.
17. Roh S. G., Choi H. R. Differential-drive in-pipe robot for moving inside urban gas pipelines // IEEE Transactions on Robotics. 2005. Vol. 21. № 1. P. 1–17.
18. Roh S. G., Choi H. R. Strategy for Navigation Inside Pipelines with Differential-drive Inpipe Robot // Proc. in IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2002). 2002. P. 2575-2580.
19. Ryew, S. M. Inpipe Inspection Robot System with Active Steering Mechanism / S. M. Ryew, S. H. Baik, S. W. Ryu, K. M. Jung, S. G. Roh, H. R. Choi // IEEE Int. Conf. on Intelligent Robot and Systems (IROS 2000), 2000. – P. 1652-1657.
20. Zhang Y., Yan G. In-pipe inspection robot with active pipe-diameter adaptability and automatic tractive force adjusting // Mechanism and Machine Theory, № 42. 2007. P. 1618–1631.

References

1. Bobyr M.V., Milostnaja N.A. Nechetkaja model' intellektual'noj sistemy upravlenija mobil'nym robotom [Fuzzy model of intellectual management system mobile robot]. *Problemy mashinostroenija i avtomatizacii* [Problems of mechanical engineering and automation], 2015, no. 3, pp. 57–67.
2. Bobyr M.V., Titov V.S., Milostnaja N.A., Globin P.V. Ocenka dostovernosti pri modelirovanii nechetkologicheskikh sistem [Estimation of reliability in case of simulation of fuzzy and logical systems]. *Promyshlennye ASU i kontroly* [Industrial ACS and controllers], 2012, no. 7, pp. 32–38.
3. Vorotnikov S. A., Nikitin N. I., Chekkarelli M. Sistema upravlenija miniaturnym vnutritrubnym robotom [Control system of miniature inpipe robot]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij* [News of higher educational institutions]. Mashinostroenie, 2015, no. 8, pp. 49–57.
4. Golubkin, I. A. Modifikacija modeli nechetkogo situacionnogo upravlenija dlja reshenija zadachi peremeshenija mobil'nogo robota v gazoprovode [Modification of model of fuzzy situation-dependent control for the solution of the task of relocation of the mobile robot in a gas pipeline]. *Materialy Pjatoj vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Nauka, obrazovanie, innovacii: puti razvitija»* [Science, education, innovations: ways of development], Petropavlovsk-Kamchatskij, KamchatGTU, 2014, part I. pp. 31–37.
5. Golubkin I. A. Matematicheskaja model' mobil'nogo robota dlja vnutritrubnoj diagnostiki gazoprovodov [A mathematical model of mobile wheeled robot for in-pipe defectoscopy of gas pipeline]. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Aktual'nye problemy sovremennogo mashinostroenija»* [Actual Problems of the Modern Mechanical Engineering]. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politehnicheskogo universiteta, 2015, pp. 72–76.
6. Egorov I. N., Matlub M. M. Upravlenie robotami na osnove pozicionno-silovyh i nechetkih vizual'nyh algoritmov [Robot control based on the position-force and fuzzy visual algorithms]. *Izvestija TulGU* [News of TULGU]. Tehniceskie nauki, 2010, issue 1, pp. 158–165.
7. Knjaz'kov M. M., Semenov E. A., Rachkov M. Ju. Mnogozvennye roboty dlja dvizhenija vnutri trub malyh diametrov [Spline robots for movement in pipes of small diameters]. *Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie* [Mechanical engineering and engineering education], 2009, no. 1, pp. 31–36.
8. Sedler M. H., Sedler M. I. *Razrabotka robota dlja provedenija diagnosticheskikh rabot vnutri truboprovodov slozhnyh konfiguracij* [Development of the robot for carrying out diagnostic operations in pipelines of difficult configurations]. [Electronic resource]. Available at: http://www.mmf.spbstu.ru/mese/2013/238_246.pdf (date: 05.03.2016).
9. Tachkov A. A., Kalinichenko S. V., Malyhin A. Ju., Volkov A. G. Upravlenie povоротом poleznoj nagruzki robota dlja dvizhenija po truboprovodam malyh diametrov [Control of turn of payload capacity of the robot for movement on pipelines of small diameters]. *Inzhenernyj vestnik* [Engineering Vestnik], 2014, no. 12. pp. 646–654.
10. Celyh D.S., Kutuzov D.V. Ustrojstva dlja analiza i ocenki sostojanija dorozhnogo pokrytija [Devices for the analysis and an assessment of a condition of a road carpet]. *Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tehnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2012, no. 4, pp. 23–30.
11. Shcherbatov I.A., Golubkin I.A. Mul'tirobot 1.0 [Multirobot 1.0]. Programmy dlja JeVM. Bazy dannyh. Topologii integral'nyh mikroshem [Computer programs. Databases. Topology of integrated microcircuits], 2010, no. 7, pp. 403.
12. Shcherbatov I.A., Golubkin I.A. Sistema upravlenija mobil'nym kolesnym robotom dlja vnutritrubnoj diagnostiki gazoprovodov [Control system the mobile wheel robot for internal diagnostics of gas pipelines]. *Programmy dlja JeVM. Bazy dannyh. Topologii integral'nyh mikroshem* [Computer programs. Databases. Topology of integrated microcircuits], 2015, no. 7, pp. 385.
13. Lopez, J. M., Sadovnychiy S. Small pig for inspection pipeline. *Robotics and Automotive Mechanics Conference, CERA 2007*, pp. 585–590.
14. Neubauer W. A spider-like robot that climbs vertically in ducts or pipes. *In IEEE/RCJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Sep. 1994, pp. 1178–1185.
15. Nishikawa H., Sasaya T., Shibata T., Kneko T., Mitumoto N., Kawakita S., Kawahara N. In-pipe wireless micro locomotive system. *Proceedings of 1999 International Symposium on Micromechatronics and Human Science*, 1999, pp 141–147.
16. Okamoto J., Adamowski J. C., Tsuzuki M. S. G., Buiocchi F., Camerini C. S. *Autonomous System For Oil Pipelines Inspection. Mechatronics*, 1999, vol. 9, pp. 731–743.
17. Roh S. G., Choi H. R. Differential-drive in-pipe robot for moving inside urban gas pipelines. *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, vol. 21, no. 1, pp. 1–17.
18. Roh S. G., Choi H. R. Strategy for Navigation Inside Pipelines with Differential-drive Inpipe Robot. *Proc. in IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2002)*, 2002, pp. 2575–2580.
19. Ryew S. M. Inpipe Inspection Robot System with Active Steering Mechanism / S. M. Ryew, S. H. Baik, S. W. Ryu, K. M. Jung, S. G. Roh, H. R. Choi. *IEEE Int. Conf. on Intelligent Robot and Systems (IROS 2000)*, 2000, pp. 1652–1657.
20. Zhang Y., Yan G. In-pipe inspection robot with active pipe-diameter adaptability and automatic tractive force adjusting. *Mechanism and Machine Theory*, 2007, no. 42, pp. 1618–1631.