

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Институт новых материалов и технологий
Кафедра Металлорежущих станков и инструментов

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ ПЕРЕД ГЭК

Зав. кафедрой Кугаевский С.С.

(подпись) (Ф.И.О.)
«_____» _____ 201__ г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

«РАЗРАБОТКА «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ» СИСТЕМ
ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ПОДШИПНИКОВ ШПИНДЕЛЬНОГО
УЗЛА МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО СТАНКА В СРЕДЕ *MATLAB*»

Научный руководитель: Либерман Я.Л.

подпись

доцент, кандидат технических наук

Нормоконтролер:

подпись

Студент группы НМТМ-262503 Гараев Е.С.

подпись

Екатеринбург

2018

ANNOTATION

The aim of the work is to develop systems of thermal stabilization of metal-cutting machine spindle assembly with artificial intelligence in MATLAB environment.

The paper analyzes the existing systems of thermal stabilization of the supports of spindle units of metal-cutting machines and the known methods of compensation of thermal deformations of machines that occur during machining. The advantages and disadvantages of such systems are shown and attention is drawn to the thermal stabilization systems based on fuzzy logic. Two new variants of such systems are considered, which realize control on deviation and combined (on deviation and disturbance). Both systems are implemented programmatically in MATLAB. According to the results of programs in MATLAB, a scientific article was written, which in the international competition US-2017-02 took 3rd place in the direction of “Technical Sciences” in the category “Research project”. Diploma for 3rd place and the text of the article from the collection are attached.

The explanatory note to the project contains 153 sheets and is accompanied by 23 demonstration sheets.

АННОТАЦИЯ

Цель работы – разработка “интеллектуальных” систем термостабилизации шпиндельного узла металлорежущего станка с искусственным интеллектом в среде *MATLAB*.

В работе анализируются существующие системы термостабилизации опор шпиндельных узлов металлорежущих станков и известные способы компенсации тепловых деформаций станков, возникающих при обработке резанием. Показываются достоинства и недостатки таких систем и обращается внимание на системы термостабилизации, построенные на основе нечеткой логики. Рассматриваются два новых варианта таких систем, которые разработаны аппаратно и реализующие управление по отклонению и комбинированное (по отклонению и возмущению). Обе системы реализуются программно в *MATLAB*. По результатам создания программ в *MATLAB*, была написана научная статья, которая в международном конкурсе *US-2017-02* заняла 3-е место по направлению “Технические науки” в номинации “Исследовательский проект”. Диплом за 3-е место и текст статьи из сборника прикреплены в приложении.

Пояснительная записка к проекту содержит 153 листа и сопровождается 23 демонстрационными листами.

РЕФЕРАТ

В начале работы мы выявили факторы, влияющие на точность станков, и роль температурных деформаций в обеспечении точности механообработки. Отметим, что большое влияние на точность станков оказывают температурные деформации. Затем познакомились с современными способами уменьшения температурных деформаций узлов станков и с техническими средствами их реализации. Проанализировав существующие системы, мы сформулировали задачу разработки систем термостабилизации с искусственным интеллектом в *MATLAB*. Сначала мы разработали систему термостабилизации шпиндельного узла с управлением по отклонению в среде *MATLAB*, а затем, обозначив достоинства и целесообразность комбинированного управления, разработали более совершенную «интеллектуальную» систему термостабилизации шпиндельного узла с комбинированным управлением в среде *MATLAB*. Указали достоинства в создании таких систем в *MATLAB*.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	8
ГЛАВА 1. ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ТОЧНОСТЬ СТАНКОВ И РОЛЬ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ТОЧНОСТИ МЕХАНООБРАБОТКИ.....	8
1.1 Элементы, определяющие эксплуатационную точность станков и степень их влияния на суммарную погрешность обработки	9
1.2 Источники температурных деформаций узлов станков и сравнительная оценка их значимости	12
ГЛАВА 2. СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ УЗЛОВ СТАНКОВ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ИХ РЕАЛИЗАЦИИ.....	17
2.1 Охлаждение узлов в функции частоты вращения шпинделя или силы резания.....	17
2.2 Прогнозирование температурных деформаций и автоматическая компенсация температурных погрешностей станка	21
2.2.1 Автоматизация прогнозирования температурных перемещений исполнительных органов станка	21
2.2.2 Прогнозирование теплового состояния станка с помощью нейросетевого подхода.....	23
2.3 Стабилизация температуры шпиндельного узла станка, достоинства и недостатки известных систем стабилизации.....	27
2.3.1 Стабилизация температуры в прецизионных станках с помощью полупроводниковых охлаждающих устройств.....	27
2.3.2 Автоматическая компенсация тепловых деформаций на отделочно- расточном станке	31
2.3.4 Система термостабилизации шпиндельного узла по патенту Я.Л.Либермана №102553	36
2.3.5 Система термостабилизации шпиндельного узла по патенту Я.Л.Либермана №116387	41
2.4 Выводы и постановка задач работы (обоснование систем термостабилизации с искусственным интеллектом).....	46

ГЛАВА 3. НЕЧЕТКАЯ ЛОГИКА КАК БАЗА ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ С ИСКУССТВЕННЫМ ИНТЕЛЛЕКТОМ.....	48
3.1 Сущность математического аппарата нечеткой логики и его возможности	48
3.1.1 Основы фаззи-логики	48
3.1.2 Системы нечеткого вывода	49
3.2 Принципы построения систем управления на основе нечеткой логики	58
3.3 Возможные варианты применения нечеткой логики для построения «интеллектуальных» систем термостабилизации шпиндельного узла	61
ГЛАВА 4. СИСТЕМА <i>MATLAB</i> КАК АППАРАТ ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ПОДШИПНИКОВ СТАНОЧНОГО ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ.....	64
4.1. Общие сведения о программе	64
4.2. Процесс разработки системы нечёткого вывода в системе	64
4.3. Редактор систем нечёткого вывода <i>FIS</i>	65
4.4. Редактор функций принадлежности	67
4.5. Редактор правил систем нечёткого вывода	69
4.6. Программа просмотра правил системы нечёткого вывода	71
4.7. Программа просмотра поверхности системы нечёткого вывода.....	72
ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ» СИСТЕМЫ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА С УПРАВЛЕНИЕМ ПО ОТКЛОНЕНИЮ В СРЕДЕ <i>MATLAB</i>	74
4.1 Формирование принципа построения системы и базы правил	74
4.2 Разработка алгоритма функционирования системы и синтез фаззи-регулятора	80
4.3 Описание устройства и работы системы и пример ее функционирования	84
4.4 Конструктивная проработка высокоскоростного шпиндельного узла с применением «интеллектуальной» системы термостабилизации с управлением по отклонению	88
ГЛАВА 6. РАЗРАБОТКА «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ» СИСТЕМЫ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА С КОМБИНИРОВАННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ.....	94

6.1 Достоинства комбинированного управления по сравнению с управлением по отклонению и целесообразность разработки системы с комбинированным управлением	94
6.2 Формирование принципа построения системы и базы правил	94
6.3 Разработка алгоритма функционирования системы и синтез фаззи-регулятора	103
6.4 Описание устройства и работы системы и пример ее функционирования	107
6.5 Конструктивная проработка высокоскоростного шпиндельного узла с применением «интеллектуальной» системы термостабилизации с комбинированным управлением	112
6.5.1 Электрошпиндель шлифовального станка	112
6.5.2 Динамометрический шпиндельный узел фрезерного станка	114
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	117
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	118
ПРИЛОЖЕНИЯ	119

ВВЕДЕНИЕ

Металлорежущие станки являются основным видом машиностроительного оборудования, предназначенным для производства современных машин, приборов, инструментов и других изделий.

Известно, что при эксплуатации металлорежущих станков вследствие различных температурных деформаций возникают погрешности обработки деталей. Для их уменьшения разработаны различные методы и системы термостабилизации, в том числе реализованные аппаратно системы термостабилизации подшипников мотор-шпинделя станка, основанные на базе нечеткой логики.

Разработанные “интеллектуальные” системы термостабилизации подшипников станочного мотор-шпинделя на базе нечеткой логики нацелены на реализацию в станках, быстроходность мотор-шпинделя в которых достигает $n = (2 - 3) \cdot 10^4$ об/мин. Такие системы имеют точность и быстродействие, достаточные для осуществления процесса термостабилизации подшипников, однако их трудно адаптировать к конкретным условиям их использования на разных станках.

Для того, чтобы повысить гибкость системы, упростить и расширить возможности их изменения, их целесообразно реализовать программно, причем в системе *MATLAB*, которая дает возможность не только повысить упомянутую гибкость, но и наглядно следить за состоянием подшипников в каждый текущий момент времени.

Таким образом, целью данной работы является разработка систем термостабилизации шпиндельного узла металлорежущего станка с искусственным интеллектом в среде *MATLAB*.

ГЛАВА 1. ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ТОЧНОСТЬ СТАНКОВ И РОЛЬ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ТОЧНОСТИ МЕХАНООБРАБОТКИ

1.1 Элементы, определяющие эксплуатационную точность станков и степень их влияния на суммарную погрешность обработки

В связи с общей тенденцией к повышению точности механической обработки с целью повышения нагрузочной способности деталей машин и их долговечности значительно возросли требования к точности обработки деталей [1].

Например, при растачивании корпусных деталей точность взаимного расположения и точность геометрической формы отверстий зависят в первую очередь от эксплуатационной точности станка. Так, на точность межосевых расстояний влияет точность перемещения шпиндельной бабки и верхних салазок на заданную величину; на отклонение от параллельности осей влияют точность взаимного расположения узлов, жесткость системы, тепловые деформации станка и другие факторы. В свою очередь, точность перемещения подвижного узла на заданную величину зависит от точности измерительных устройств станка и плавности перемещения, а жесткость системы – от собственной жесткости базовых деталей и контактной жесткости стыков (в первую очередь от контактной жесткости направляющих).

На рис.1 приведена схема взаимосвязи элементов, определяющих эксплуатационную точность станка, и указаны факторы, влияющие на эту точность. При составлении схемы предполагалось, что эксплуатационная точность станка складывается из точности позиционирования, стабильности положения подвижного узла и точности формообразования. В свою очередь, точность позиционирования складывается из точности перемещения и точности положения, причем точность перемещения определяется отклонением фактической величины перемещения точки индексации

подвижного узла от величины ее перемещения, заданной относительно измерительной шкалы, а точность положения – отклонением фактического положения узла в пространстве от заданного положения осей OX , OY и OZ (перекос) и изменением положения узла в пространстве при реверсе движения (переориентация). Стабильность положения подвижного узла характеризуется величиной отклонения его положения в процессе резания по отношению к положению, достигнутому при позиционировании, а точность формообразования – сохранением заданной формы и расположения траектории движения режущего инструмента относительно изделия.

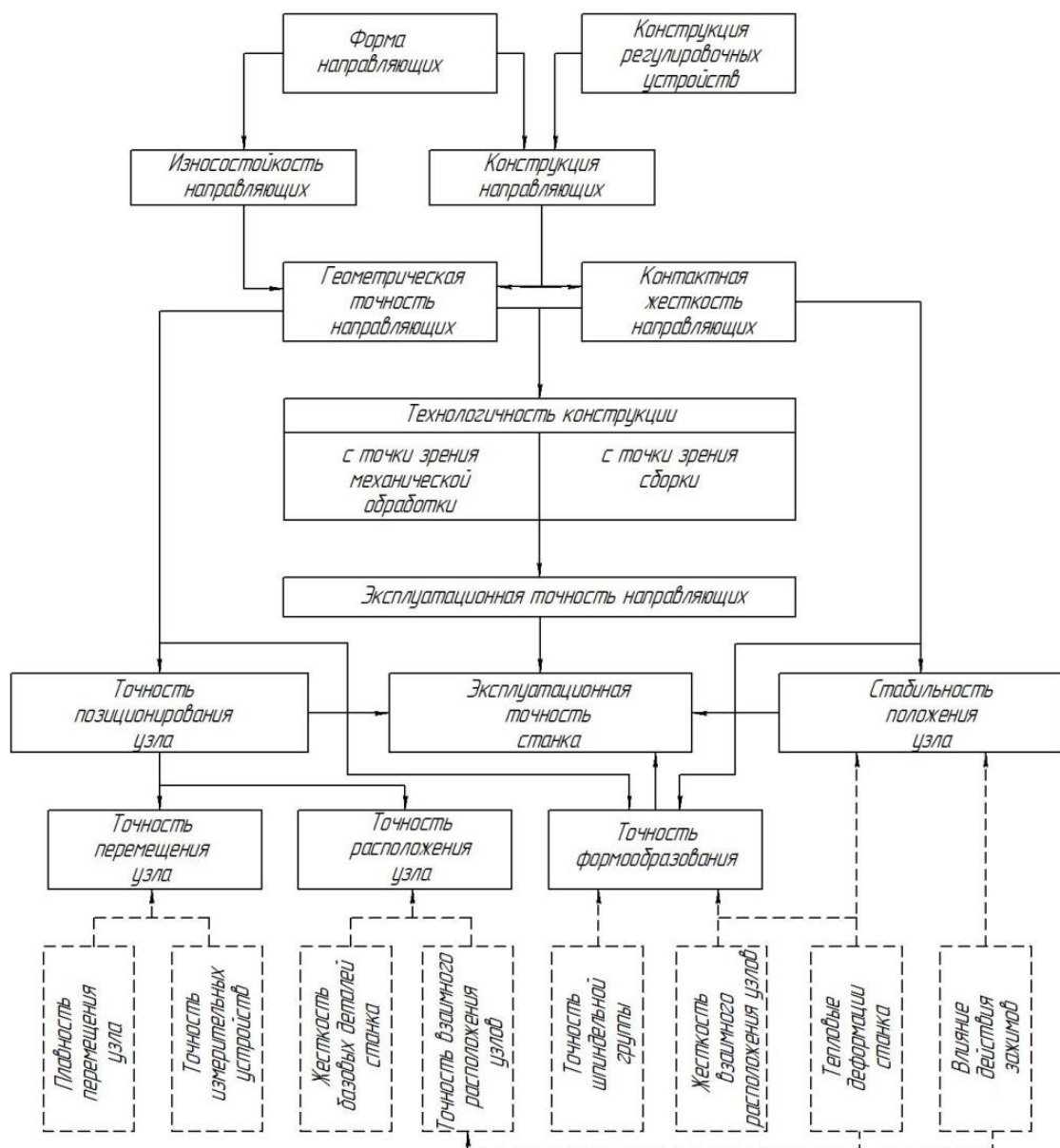


Рис.1. Факторы, влияющие на точность станков

Рассмотрим каждый из факторов в отдельности.

Качество измерений характеризуется точностью измерений. Точность измерительного прибора определяется погрешностью измерения, в пределах которой можно обеспечить использование данного измерительного прибора.

Основное требование, предъявляемое к базовым деталям станков с ЧПУ, - обеспечить в течение длительного времени правильное взаимное расположение и перемещение исполнительных органов, смонтированных на них. Базовой частью станка является станина, на которую монтируют узлы, механизмы и детали. Для увеличения жесткости станин их выполняют коробчатой формы с ребрами жесткости. Станина должна обладать виброустойчивостью, обеспечивать удобный отвод стружки и СОЖ.

Точность взаимного расположения поверхностей - соосность, радиальное и торцовое биение, параллельность, перпендикулярность - должна выполняться в соответствии с допустимыми отклонениями, которые указываются на чертеже. Точность взаимного расположения узлов станка обеспечивает надежную работу при его эксплуатации. Для сохранения стабильности положения узлов используют зажимные приспособления.

Шпиндельный узел – главный узел станка, от которого зависит точность обработки, поэтому к нему предъявляются особые требования: точность размеров, точность формы поверхности, точность расположения поверхностей, качество поверхностей, для высокоскоростных шпинделей – допустимый дисбаланс.

Под жесткостью тела или системы тел подразумевают их способность сопротивляться упругим перемещениям при действии приложенной к ним нагрузки. Чем меньше величина перемещений при прочих равных условиях, тем выше жесткость. Недостаточная жесткость узлов станка может привести, вследствие колебания усилий резания или появления автоколебательного процесса, к вибрациям станка.

В процессе резания механическая энергия расходуется на деформирование срезаемого слоя металла и на преодоление сил трения, возникающих при контакте сходящей стружки изделия с режущим инструментом. В результате превращения механической энергии в тепловую выделяется большое количество тепла, поглощаемого стружкой, обрабатываемой заготовкой, режущим инструментом и окружающей средой. При этом температура рабочей поверхности резцов в зоне резания составляет $800 \dots 1000^{\circ}\text{C}$ и выше.

Повышение температуры обрабатываемой заготовки и инструмента приводит к температурным деформациям, вызывающим соответствующие погрешности обработки. Например, нагрев проходного резца средней величины на 20°C приводит к увеличению его длины на $0,01$ мм, что вызывает уменьшение диаметра обрабатываемой заготовки на $0,02$ мм.

Зажимные механизмы и приспособления служат для закрепления заготовки таким образом, чтобы во время рабочего цикла обработки она не меняла своего положения относительно базы крепления. Усилия закрепления заготовок, также как и усилия резания, вызывают их упругие деформации, которые в свою очередь порождают погрешности формы при обработке. При постоянстве размеров заготовок и усилия зажима эти погрешности являются систематическими и могут быть вычислены по соответствующим формулам и учтены.

Из рис.1 видно, что количество разнообразных факторов, влияющих на эксплуатационную точность станка, весьма велико.

1.2 Источники температурных деформаций узлов станков и сравнительная оценка их значимости

Работа станков сопровождается теплообразованием, вызываемым процессом резания, потерями в электродвигателях, гидроприводах и механизмах. Кроме того, станки подвергаются внешним тепловым воздействиям, связанным с изменением температуры в цехе.

Изменение температуры деталей станков, инструмента и заготовок приводят к следующим неблагоприятным явлениям: понижению точности обработки вследствие обратимых температурных деформаций элементов системы; понижению точности измерений; ухудшению условий работы трущихся пар в связи с понижением несущей способности масляных слоев, температурными изменениями зазоров, уменьшением коэффициента трения, структурными изменениями трущихся поверхностей во фрикционных парах и понижению стойкости инструмента.

Рассмотрим источники температурных деформаций в порядке уменьшения их значимости.

В процессе работы станка его детали перемещаются друг относительно друга, при этом возникает сила трения. Ее работа превращается в теплоту. Поэтому температура деталей станков в процессе работы постепенно возрастает. Если до начала работы станка температура его деталей равна температуре цеха ($16—20^{\circ}$), то в дальнейшем она может повыситься до 60° и даже больше. При повышении температуры детали станка (корпуса бабок, шпиндели и другие) расширяются. Изменяется положение оси шпинделя и обрабатываемой детали (рис.2) относительно образующей режущей кромки инструмента, чем вносится погрешность в размер диаметра обтачиваемой детали: первоначально установленный диаметр D_1 уменьшится и примет новое значение D_2 .

Величина температурных деформаций зависит от режима работы станка, продолжительности работы, конструкции его узлов и других причин. Обычно она незначительна, но на станках, предназначенных для обработки деталей с высокой точностью, влияние ее может быть весьма существенным. Так, на бесцентровом станке 3А182 величина температурного смещения оси режущего круга в направлении приближения его к детали достигает 0,12 мм. На таком станке обычно обрабатывают детали по второму классу точности с допуском 0,01—0,04 мм, и величина смещения 0,12 мм будет весьма

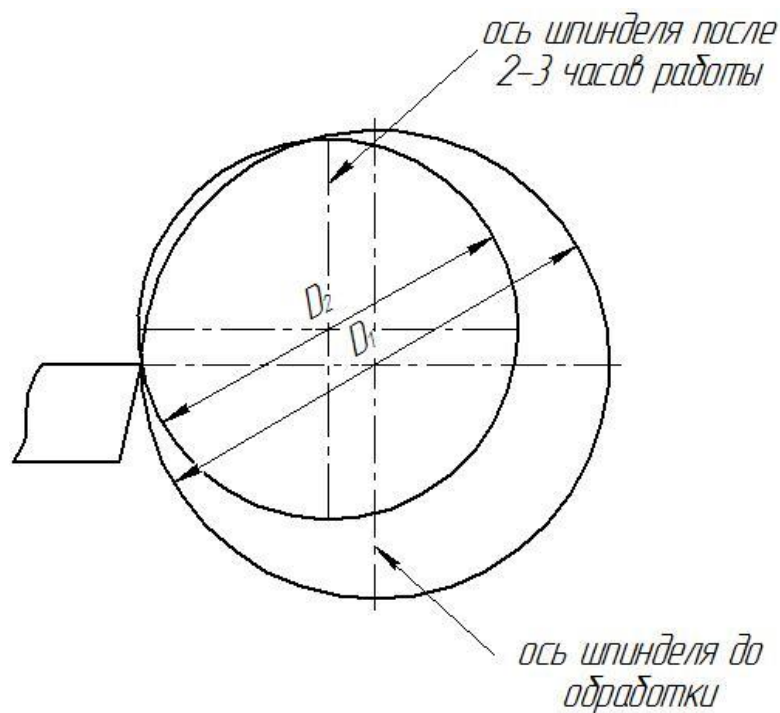


Рис.2. Погрешности обработки, возникающие в связи
с тепловой деформацией шпинделя

существенной. В первые часы работы станка, пока температура его деталей не приняла постоянного значения, смещением оси шпинделя может быть обусловлено уменьшение размеров деталей. На гидрокопировальных станках вследствие нагрева масла и деталей станка наблюдаются погрешности копирования, выражающиеся в постепенном уменьшении размеров обрабатываемой детали после настройки и начала работы.

Нагрев самой детали в процессе ее обработки также является причиной появления погрешности обработки, так как при этом линейные размеры и диаметры увеличиваются. Если, например, чистовое точение вала или его шлифование следует тотчас после черновой обработки без предварительного охлаждения, то диаметр вала получается заниженным. Тонкостенные детали — трубы, гильзы, планки и другие — в процессе обработки нагреваются до

более высокой температуры, и поэтому влияние температурных деформаций на точность обработки таких деталей сказывается в большей степени.

Режущий инструмент нагревается в процессе обработки детали, поэтому изменяются его линейные размеры и положение, что также вызывает погрешность обработки. Например, первоначально установленный диаметр вала D_1 , (рис.3) вследствие теплового удлинения резца в процессе резания будет постепенно уменьшаться и к концу обточки достигнет размера $D_2 = D_1 - 2\varepsilon$. Если диаметр D_1 был равен наименьшему из допускаемых размеров или близок к нему, то диаметр D_2 выйдет за допускаемые пределы.

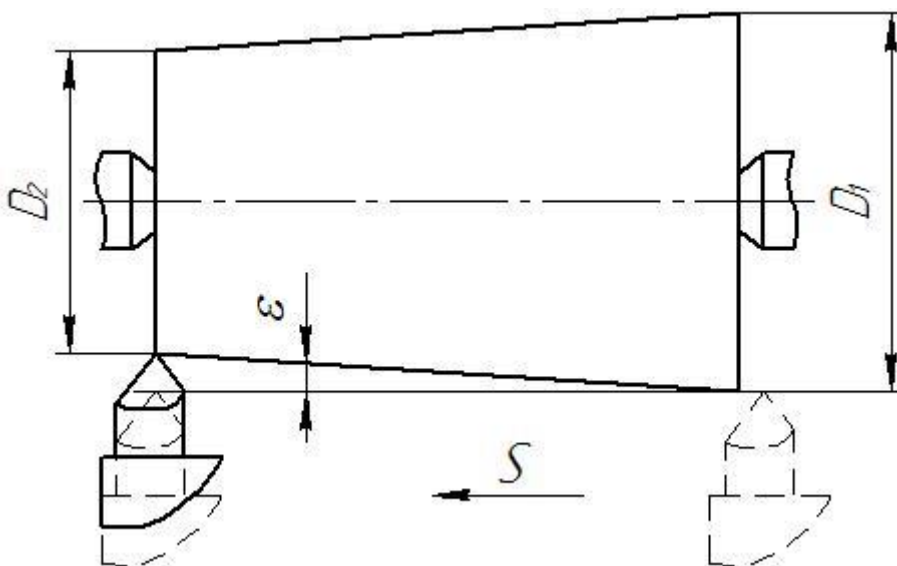


Рис.3. Погрешность обработки, возникающая при точении в связи с термическим удлинением резца

Температура инструмента и величина температурных деформаций его зависят от скорости и глубины резания, величины подачи, размеров инструмента, условий теплоотвода, степени затупления инструмента и от других причин. Чем выше режимы резания, меньше поперечное сечение резца, больше его вылет и степень затупления, тем больше температурные

деформации. При износе резца по задней грани, равном например 0,8 мм, удлинение его в течение первых семи минут резания равно 55 мкм. Тот же резец, но заточенный, удлиняется за это же время лишь на 22 мкм.

Исследования показывают, что тепловые деформации деталей станка возрастают в течение первых двух-трех часов работы. Затем наступает тепловое равновесие, и они становятся постоянными, не оказывая после этого существенного влияния на точность обработки. Тепловые деформации режущих инструментов стабилизируются в более короткие сроки: 10—25 мин. Чтобы избежать погрешности обработки, вносимой температурными деформациями деталей станка, в особенности при обработке деталей с высокой степенью точности, следует учитывать время стабилизации деформаций. В течение этого времени необходимо чаще контролировать размеры обрабатываемых деталей и соответственно корректировать настройку станка.

В настоящее время приоритетной задачей металлообрабатывающей отрасли является достижение высокой производительности обработки материалов со строгим соблюдением уровня качества продукции. Перспективным направлением здесь является использование режущих инструментов, которые изготовлены из сверхтвердых материалов. Применение такого инструмента послужило основой для появления станков, работающих на больших частотах вращения. Но у высокоскоростной обработки наблюдается существенный недостаток – сильный нагрев передней опоры шпинделя и, соответственно, появление значительных тепловых деформаций. Для достижения необходимой точности обработки разрабатывают различные системы термостабилизации.

ГЛАВА 2. СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ УЗЛОВ СТАНКОВ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ИХ РЕАЛИЗАЦИИ

2.1 Охлаждение узлов в функции частоты вращения шпинделя или силы резания

Смазка имеет большое значение для обеспечения работоспособности и долговечности станка, способствует уменьшению потерь на трение, повышению допустимых скоростей за счет отвода тепла из зоны тепловыделения и уменьшению износа трущихся поверхностей.

При проектировании возникает вопрос о выборе масла, системы смазки и соответствующей аппаратуры [2].

Приводы главного движения металлорежущих станков отличаются наличием большого количества трущихся пар, работающих при различных скоростях и нагрузках.

Указанные факторы являются основными при выборе смазочного материала. Чем выше скорость относительно скольжения при прочих условиях, тем меньшей вязкости должно быть масло.

Смазочные материалы подразделяются на жидкие (масла) и пластичные (консистентные). Для смазки трущихся элементов коробок скоростей и шпиндельных узлов применяют масла, для подшипниковых опор шпиндельных узлов – консистентные смазки.

При выборе способа смазки учитывают расположение валов в коробке (горизонтальное или вертикальное), величину максимальной окружной скорости зубчатой передачи, возможность смазки подшипниковых опор и т.д. В качестве основного способа смазки привода главного движения может быть смазка разбрызгиванием, поливанием без давления или поливанием под давлением, маслотоварная смазка.

Смазка разбрызгиванием применяется лишь для коробок с горизонтальным расположением валов. При таком методе смазки одно из вращающихся колес частично погружают в масляную ванну. Погруженные в масло зубья захватывают масло и несут его на себе при вращении до момента контакта с зубьями парного колеса. Кроме того, зубья колеса ударяют о масло, разбивают его в виде капель по всему внутреннему пространству коробки. Образующийся при этом масляный туман смазывает размещенные внутри коробки подшипники и передачи. При разбрызгивании масло попадает также в карманы, расположенные в верхней части корпуса, откуда оно может поступать по трубам к отдельным точкам.

Коробка при этом способе должна быть герметичной, иметь контрольные устройства для определения уровня масла в ванне и устройство для слива масла.

Шпиндельные опоры при смазке коробки разбрызгиванием часто имеют индивидуальную систему смазки.

При способе смазки разбрызгиваемое масло часто теряет первоначальные свойства.

Централизованная смазка поливанием без давления и под давлением используется в коробках как с горизонтальным, так и с вертикальным расположением валов. Является наиболее совершенной системой смазки, обеспечивающей интенсивное охлаждение трущихся поверхностей и незначительную потерю масла. Предусматривает наличие в системе насоса. Насос приводится в действие от отдельного электродвигателя или от промежуточного валика коробки.

Подвод масла к трущимся поверхностям может быть осуществлен двумя способами. В первом случае смазочная жидкость нагнетается насосом в центральный маслосборник, откуда оно свободно стекает под действием собственного веса по трубопроводам к отдельным точкам. Этот способ

смазки называется поливанием без давления или смазка стеканием. Вторым способ известен как смазка поливанием под давлением. Отличается от первого тем, что масло нагнетается насосом непосредственно смазываемым объектам под некоторым избыточным давлением.

При этих способах смазки имеет место длительная циркуляция масла, поэтому необходимо обеспечить очистку масла в процессе работы.

Должно быть предусмотрено также применение в маслопроводной сети контрольных устройств для наблюдения за уровнем масла в резервуаре, за поступлением масла в распределитель, за потоком масла в маслопроводе и за подачей масла к наиболее ответственным трущимся парам, например, подшипникам шпинделя.

Если масляный насос имеет привод от отдельного двигателя, например, в токарных станках, имеющих единую систему смазки на все узлы, последний блокируется с электродвигателем привода главного движения таким образом, что вращение шпинделя возможно только при работе насоса.

В настоящее время широкое применение получила масловоздушная система смазки как альтернатива смазке масляным туманом и смазке распылением, поскольку при масловоздушной смазке непрерывный поток масла допускает более точное дозирование, система не вызывает загрязнения окружающей среды масляными испарениями, и конструктивно реализация такого вида смазки несложна.

При масловоздушной смазке малые объемы масла дозированно вводятся в смесительный клапан, где они смешиваются с воздухом, а затем высокоскоростным воздушным потоком подаются в подшипники.

Централизованная смазка может осуществляться насосами, различными по конструкции и форме (рис. 4).

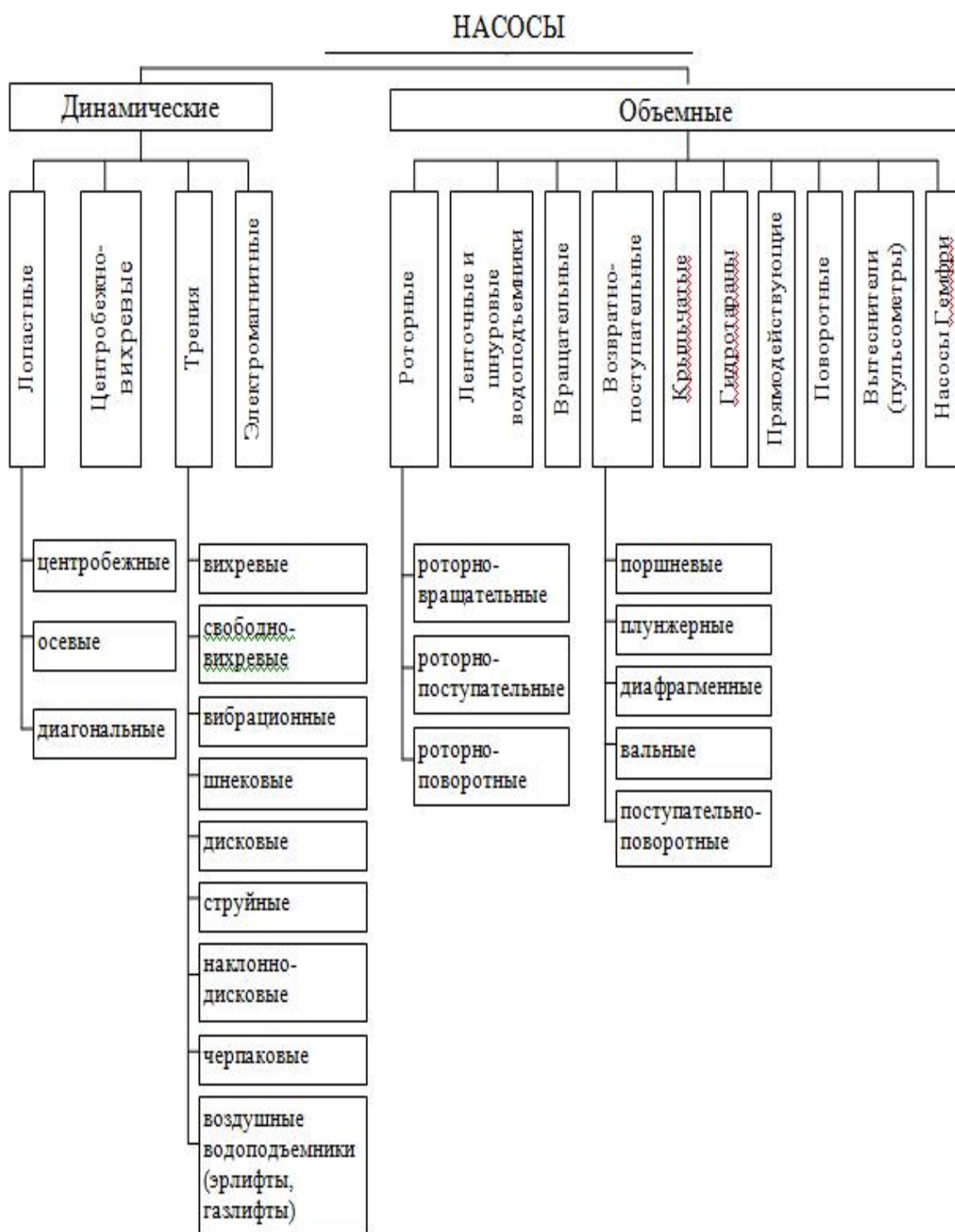


Рис. 4. Классификация насосов

Таким образом, осуществляя подачу смазывающе-охлаждающей жидкости, мы стабилизируем температуру шпиндельного узла и, соответственно, увеличиваем его долговечность и работоспособность.

2.2 Прогнозирование температурных деформаций и автоматическая компенсация температурных погрешностей станка

2.2.1 Автоматизация прогнозирования температурных перемещений исполнительных органов станка

Экспериментальные данные фирм – производителей станков показывают, что температурные перемещения исполнительных органов в современных прецизионных металлорежущих станках могут превышать 100 мкм, определяя до 70% значения общей погрешности механообработки.

Для достижения стабильной размерной точности механообработки в пределах 10 мкм станки оснащают системами компенсации температурной погрешности, которые строятся на двух альтернативных методах: прямого измерения температурной погрешности на станке и прогнозирования температурной погрешности.

Первый метод обладает высокой точностью, но требует оснащения станка дополнительным измерительным оборудованием, что приводит к существенному увеличению стоимости станка (не менее, чем на 30%).

Точность второго метода полностью определяется качеством реализуемых моделей прогнозирования тепловых характеристик. Метод прогнозирования температурной погрешности описан в [3]. В данной диссертации рассмотрен метод прогнозирования тепловых характеристик станков, работающих в условиях переменных тепловых режимов и алгоритм, представленный на рис. 5, который отражает основные этапы разработанного метода и последовательность их выполнения.

На первом этапе проводят серию тепловых испытаний станка в условиях непрерывного режима на холостом ходу типа «нагревание - остывание» на фиксированных частотах вращения шпинделя. Для построения тепловых характеристик на промежуточных частотах выполняют построение аппроксимирующих зависимостей вида $\delta(n, t)$. В соответствии с технологическим процессом механообработки формируют соответствующую

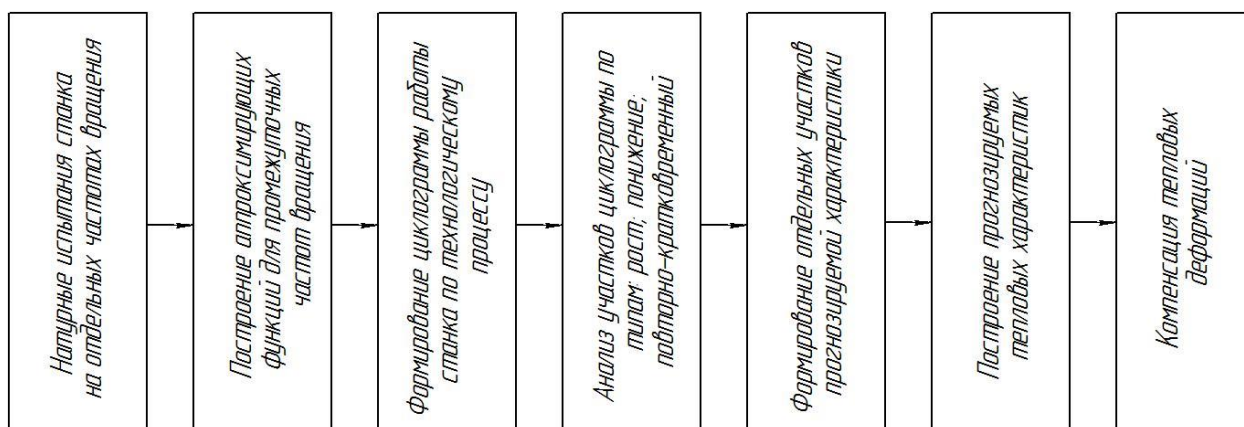


Рис. 5. Алгоритм компенсации тепловых деформаций на основе прогнозирования тепловых характеристик станка
(по материалам кандидатской диссертации К.В.Марусича)

циклограмму для станка. Эти три этапа формируют необходимые исходные данные для построения прогнозируемых характеристик. Следующие три этапа завершают построение прогнозируемых характеристик. На последнем этапе, в результате всей проведенной работы, мы получаем компенсацию тепловых деформаций.

Таким образом, средства управления исполнительными органами станка по снижению его температурных погрешностей с использованием прогнозируемых тепловых характеристик, обеспечивают тепловые смещения вдоль оси шпинделя в пределах 10 мкм. Недостатками данного метода являются необходимость проведения большого количества испытаний для построения циклограммы работы станка и возможность неточности

прогнозирования, т.к. прогноз – это вероятностное суждение о будущем состоянии температурной характеристики.

2.2.2 Прогнозирование теплового состояния станка с помощью нейросетевого подхода

В настоящее время при построении тепловых моделей станков распространены методы, основанные на решении задачи теплопроводности, что связано с детальной проработкой геометрического представления конструкции станка и задания условий однозначности. Альтернативным подходом в тепловом моделировании станков является использование нейронных сетей.

Искусственные нейронные сети представляют собой устройства параллельных вычислений, состоящие из множества взаимодействующих простых элементов – нейронов [4]. В состав нейрона входят умножители (синапсы), сумматор и нелинейный преобразователь. Синапсы осуществляют связь между нейронами и умножают входной сигнал на число, характеризующие силу связи. Сумматор выполняет сложение внутренних и внешних входных сигналов. Нелинейный преобразователь реализует нелинейную функцию одного аргумента – выход сумматора. Эта функция называется передаточной функцией нейрона.

Нейронные сети имеют две особенности: во-первых, они нелинейные по своей природе; во-вторых, они способны обучаться. Сеть обучается на одном или нескольких примерах из множеств базы данных, а на другом проверяет свои результаты. Пользователь нейронной сети подбирает представительные данные, а затем запускает алгоритм обучения, который автоматически воспринимает структуру данных.

Наиболее разработанной в настоящее время типовой задачей, решаемой с помощью нейронных сетей, является прогнозирование временного ряда, т.е. прогноз будущих значений переменной, зависящей от

времени, на основе предыдущих значений ее или других переменных. На основе нейросетей можно выполнять прогноз на любое число шагов. После того как вычислено очередное предполагаемое значение, оно подставляется в ряд и с его помощью получается следующий прогноз – это называется проекцией временного ряда.

Для решения задачи прогнозирования временного ряда используется нейросетевой пакет ST Neural Networks, позволяющий реализовать нейронные сети, предназначенный для разработки прикладных нейросетевых алгоритмов.

Алгоритм решения задачи прогнозирования температуры временного ряда, с помощью многослойного персептрона представлен на рис. 6.

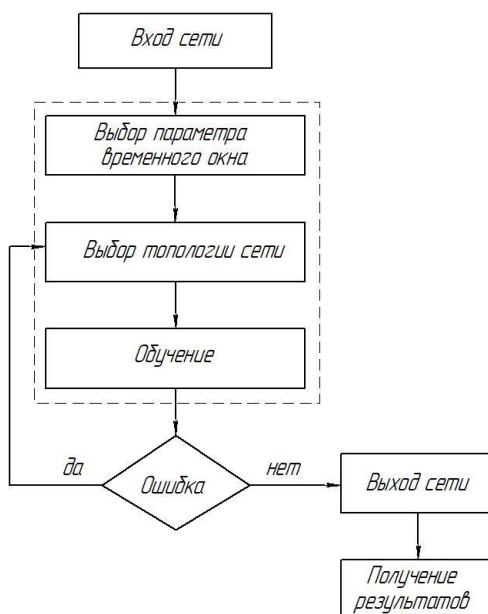


Рис. 6. Алгоритм прогнозирования тепловых характеристик станка с использованием нейронных сетей

На вход нейронной сети подаются изменяющиеся во времени экспериментальные значения температур. Во втором блоке определяются количество k - экспериментальных значений температуры, определяющих

входной вектор, и представляющих ряд значений $\{y(t_1), y(t_2), \dots, y(t_k)\}$, по которому прогнозируется последующие значения $y(t_{k+1})$ в момент времени t_{k+1} . Третий блок – выбор топологии сети. Из теории нейронных сетей известно, что для решения задачи прогнозирования наибольшей эффективностью обладает многослойный персептрон, который показывает хорошие результаты при экстраполяции функций. Блок четвертый. Для задачи экстраполяции процедура обучения, фактически, определяет выбор параметров сети, при котором сеть лучше всего справляется с поставленной проблемой. Обучение сети осуществляется методом Левенберга-Маркара. Блок пятый – расчет ошибки сети. Применение алгоритма Левенберга-Маркара связано с одной особенностью: оценивая очередной вариант сети, алгоритм отвергает его, если увеличилась ошибка, изменение ошибки в процессе обучения иллюстрируется графиком. Если ошибка обучения не удовлетворяет или при обучении сеть попадает в локальные минимумы, то необходимо вернуться к блоку четвертому и изменить значения весов. Блок шестой представляет собой выход нейронной сети, т.е. спрогнозированные температурные характеристики станка. В седьмом блоке выполняется анализ полученных результатов, включающий оценки: погрешностей экспериментальных и прогнозируемых данных; прогнозируемого роста температур; время температурной стабилизации.

Основой построения алгоритмов прогнозирования любых функциональных зависимостей с использованием нейросетей является использование разных типов сетей. Их многообразие приводит к необходимости разработки алгоритма принятия решения о выборе некоторого типа сети применительно к конкретной предметной области. Поэтому выбор типа сети для эффективного прогнозирования тепловых перемещений является актуальной задачей разработки системы автоматической компенсации тепловых погрешностей станков. Рассмотрим эффективность прогнозирования экспериментальных перемещений станка на

основе сетей трех типов: многослойного персептрона, линейной и радиальной базисной функции (RBF) [5]. Алгоритм решения задачи прогнозирования экспериментальных температурных деформаций представлен на рис. 7.

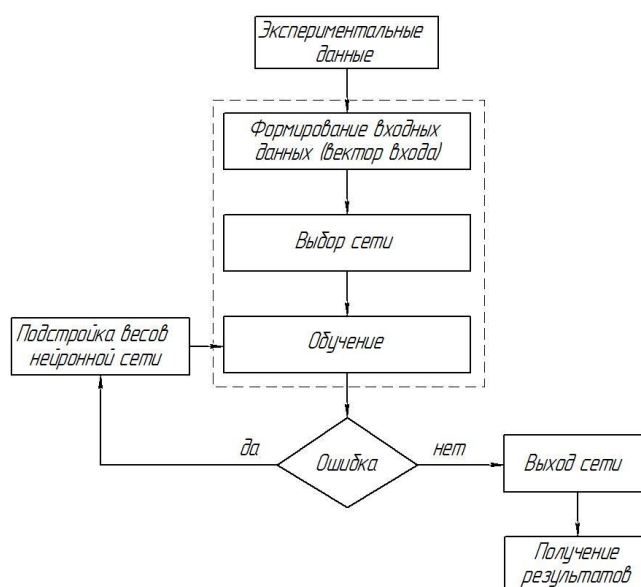


Рис. 7. Алгоритм прогнозирования температурных деформаций станков

На первом этапе машинных экспериментов прогнозирование температурных перемещений осуществлялось с помощью многослойного персептрона. Персептрон состоит из одного слоя искусственных нейронов, соединенных с помощью весовых коэффициентов с множеством входов, он представляет собой элемент, в котором осуществляется суммирование взвешенных входов. Если сумма Σ больше заданного порогового значения, то выход равен единице, в противном случае - нулю. При построении нейронных сетей используются два алгоритма обучения: методом Левенберга-Маркара и алгоритмом обратного распространения.

На втором этапе рассмотрена нейронная сеть на радиальных базисных функциях (RBF). Архитектура RBF нейронной сети имеет три слоя.

Обучение RBF нейронных сетей осуществляется при помощи комбинированных методов.

В заключении рассмотрен вариант применения линейных нейронных сетей. Линейная сеть в пакете ST Neural Networks имеет всего два слоя: входной и выходной имеющие линейные функции активации. Линейная нейронная сеть оптимизируется непосредственно с помощью метода псевдообратных матриц.

Таким образом, зная входные значения температуры, мы можем с использованием нейронных сетей спрогнозировать выходные температурные характеристики станка и спроектировать соответствующую систему стабилизации. Недостатком нейросетевого подхода является, также как и у предыдущей системы, получение вероятностного значения выходной тепловой характеристики станка.

2.3 Стабилизация температуры шпиндельного узла станка, достоинства и недостатки известных систем стабилизации

2.3.1 Стабилизация температуры в прецизионных станках с помощью полупроводниковых охлаждающих устройств

Система автоматической стабилизации температуры станка за счет отвода тепла из зоны его выделения была разработана в [6].

Экспериментальные исследования проводились в термостатированной лаборатории на станке мод. 16Б16П. В связи с тем, что температурные деформации влияют на точность обработки, главным образом на финишных операциях (когда силы резания малы), станок исследовался на холостом ходу. Превышение температуры в различных точках станка над температурой окружающей среды при скорости шпинделя $n = 890$ об/мин без системы термостабилизации представлено на рис. 8.

Температурные деформации δ шпинделя без системы стабилизации температуры, измеренные по схеме рис. 9, а показаны:

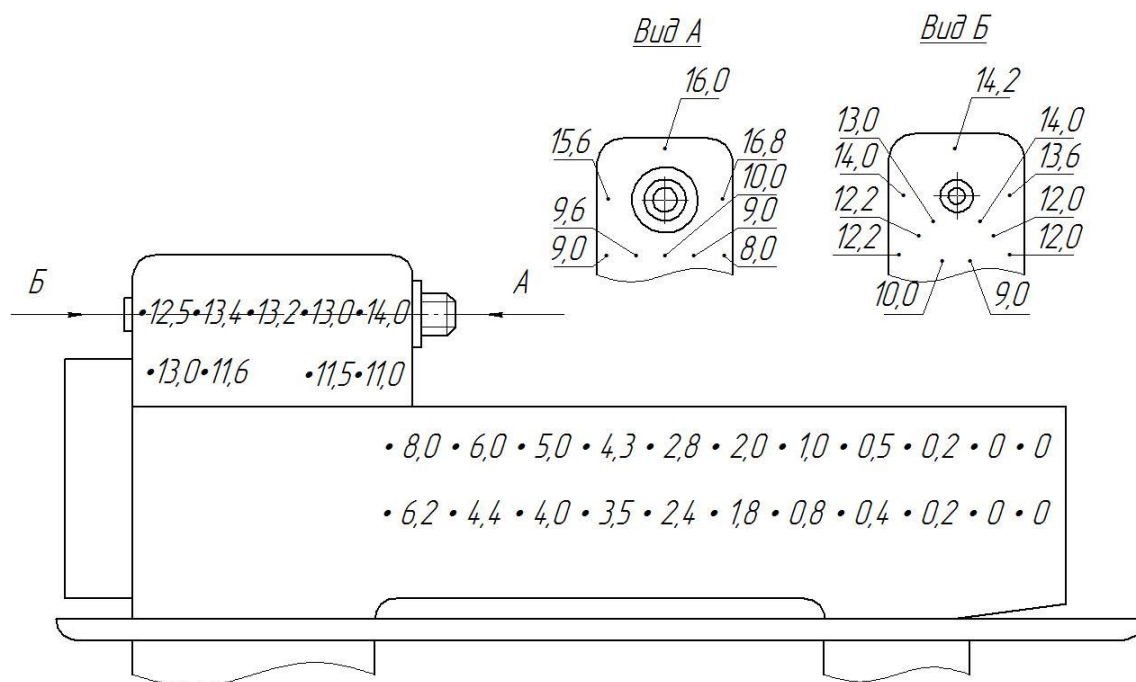


Рис. 8. Избыточные температуры при финишной обработке на станке модели 16Б16П при $n = 890$ об/мин

на рис. 9, б при; на рис. 9, в при $n = 1600$ об/мин; на рис. 9, г при $n = 890$ об/мин.

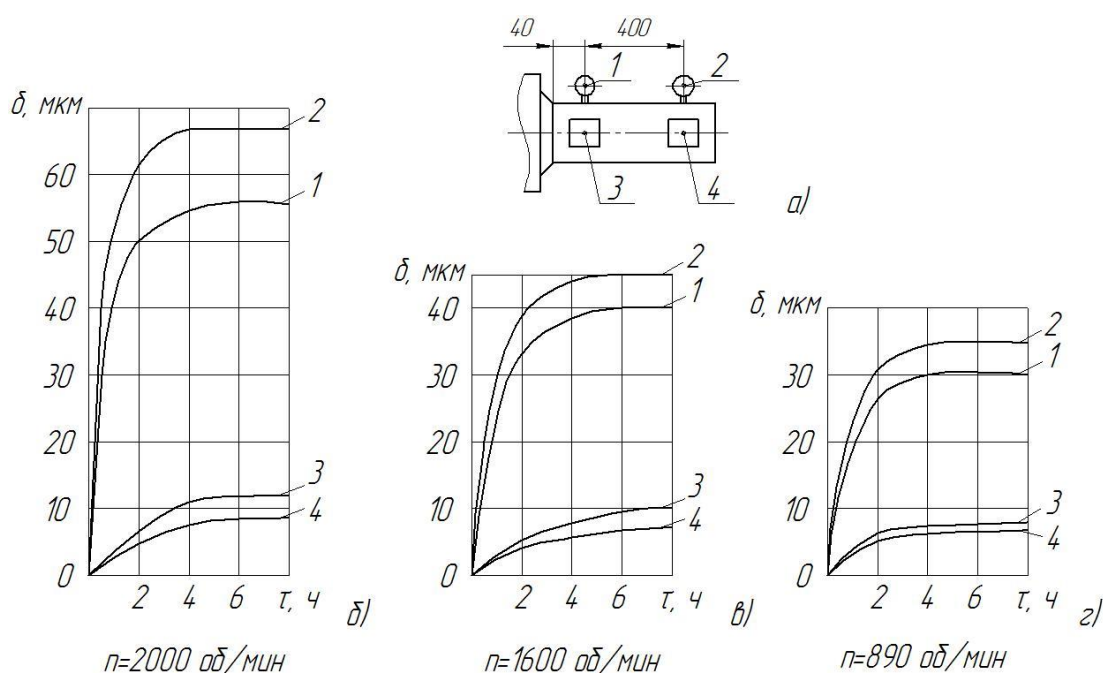


Рис. 9. Температурные деформации шпинделя

Экспериментальные исследования показали, что полное исключение температурных деформаций при использовании масла в качестве теплоотводящей среды невозможно из-за резкого возрастания вязкости масла при снижении его температуры. Это приводит к повышенному выделению тепла в результате внутреннего трения между слоями масла при перемешивании. Наиболее эффективным для термостабилизации являются полупроводниковые охлаждающие батареи, устанавливаемые непосредственно на корпусные детали станка.

Функциональная схема системы автоматической стабилизации температуры представлена на рис. 10. При повышении температуры шпиндельной бабки станка изменяется сопротивление термистора 3, установленного вблизи переднего подшипника шпинделя и являющегося одним из плеч измерительного моста 5, питающегося от источника 6. Возникающий при этом сигнал разбаланса моста после преобразования в усилителе 7 включает с помощью реле и контактора 8 блок БП питания двух полупроводниковых охлаждающих ребристых батарей 1, встроенных в бак 2 смазки шпиндельной бабки.

Одновременно включается вентиль 4, пропускающий воду через горячие спаи батареи. Масло в баке охлаждается и поступает на шпindelную бабку, а тепло от спаев батарей, большая площадь которых обеспечивает интенсивный теплообмен, отводится проточной водой. При достижении заданной температуры сигнал разбаланса моста исчезнет, реле отключает питание батарей, а вентиль 4 перекрывается.

Температурные деформации δ шпинделя при включенной системе стабилизации температуры, измеренные по схеме рис. 11, а показаны: на рис. 11, б при $n = 2000$ об/мин; на рис. 11, в при $n = 1600$ об/мин; на рис. 11, г при $n = 890$ об/мин.

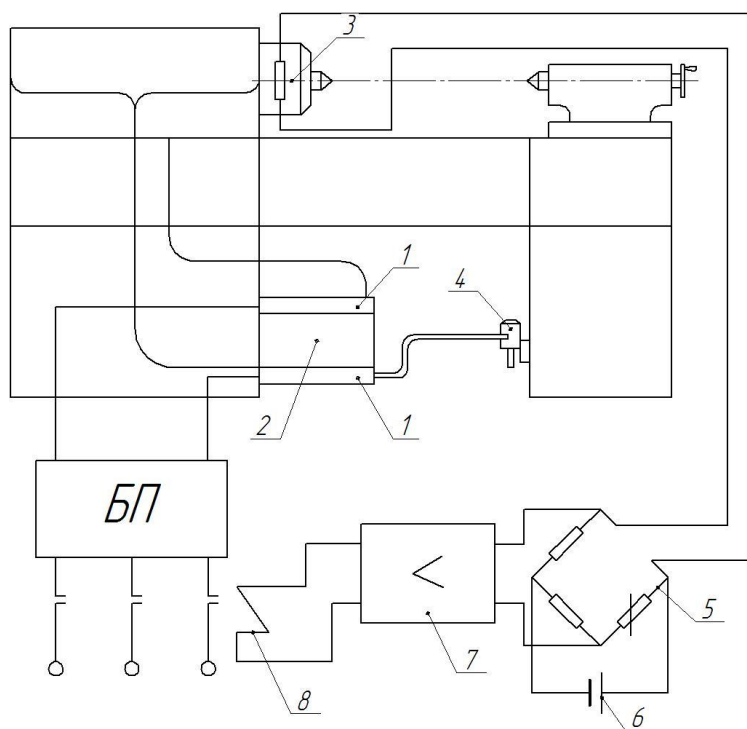


Рис. 10. Система термостабилизации шпиндельного узла по авторскому свидетельству Н.Н.Панова и др. №248435

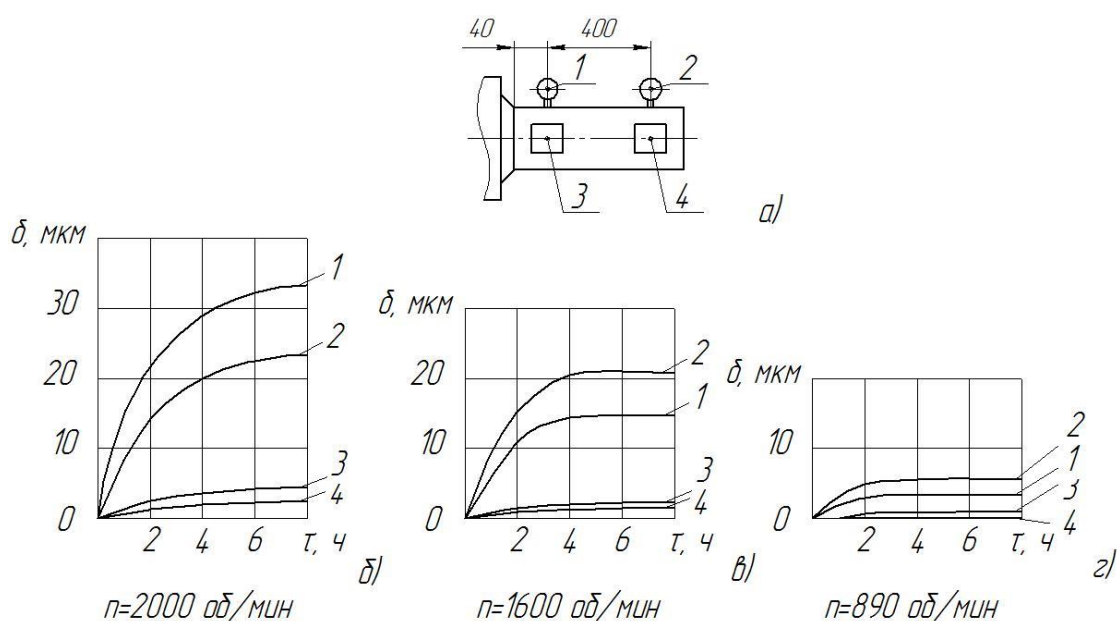


Рис. 11. Температурные деформации шпинделя

Приведенные результаты показывают, что с помощью батарей, установленных непосредственно на шпиндельной бабке станка, удается поддерживать его температуру и снизить температурные деформации до 1 мкм в горизонтальной плоскости и до 4 мкм в вертикальной.

У данной системы есть несколько недостатков. Первым недостатком является усложнение конструкции, удорожание за счет установки полупроводниковых охлаждающих устройств. Вторым недостаток – система стабилизации температуры срабатывает, когда температура шпиндельной бабки достигает установленного порогового значения; т.е. температура не остается всегда постоянной, а наблюдаются скачки температуры, которые могут привести к тепловым деформациям.

2.3.2 Автоматическая компенсация тепловых деформаций на отделочно-расточном станке

Основной причиной, вызывающей деформации, при обработке точных деталей на отделочно-расточных станках является нагрев подшипников шпинделя расточной головки. Корпус расточной головки 1 (рис. 12) при работе подвергается тепловому расширению; при этом увеличивается

расстояние h от оси шпинделя 2 до мостика 3 и, следовательно, расстояние H до рабочей поверхности стола 4, на которой закрепляется обрабатываемая деталь [7].

Распространение тепла от расточной головки приводит к нагреву мостика 3, имеющего П-образную форму, и его стоек значительной высоты. Тепловая деформация стоек и мостика ведет к еще большему увеличению расстояния H . Таким образом, в процессе разогрева станка ось шпинделя смещается от своего первоначального положения, что вносит погрешность в форму и положение обрабатываемых поверхностей относительно базовой поверхности изделия.

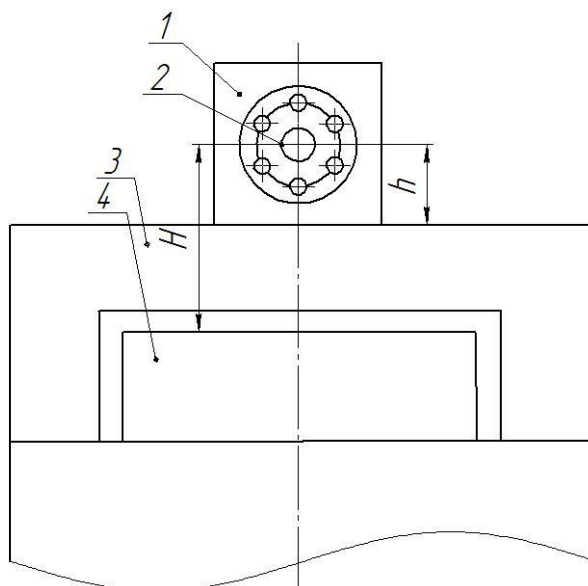


Рис. 12. Традиционная схема установки расточной головки
отделочно-расточного станка

Рассмотренную погрешность можно устранить, введя искусственное охлаждение головок циркулирующей жидкостью. Однако для наиболее распространенных головок на опорах качения это сопряжено со значительным усложнением их конструкции. При замкнутой системе охлаждения появляется необходимость в оснащении станка устройством для

охлаждения и стабилизации температуры жидкости. При разомкнутой системе (охлаждение проточной водой) помимо сложности регулирования расхода воды возникает необходимость в двух дополнительных коммуникациях – для подвода к станку воды и для ее отвода.

Все это заставляет искать другие методы борьбы с тепловыми деформациями и, в частности, методы компенсации. Примером компенсации тепловых деформаций является конструктивное решение отделочно-расточного станка мод. ОС-2063. В этом станке компенсация тепловых деформаций осуществлена посредством новой схемы (рис. 13) установки расточной головки.

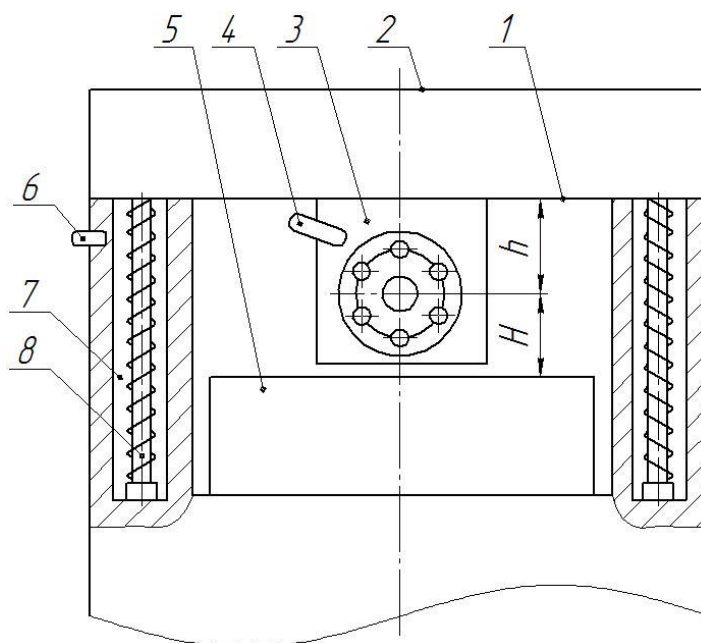


Рис. 13. Новая схема установки расточной головки на мостике

Расточная головка 3, в отличие от общепринятой компоновки (рис. 12), установлена не на верхней плоскости 2 мостика, а на нижней его плоскости 1, обращенной к столу 5. Благодаря этому тепловые деформации расточной головки и мостика не суммируются, как это было показано выше, а вычитаются, так как направлены в разные стороны. Такая компоновка уже

сама по себе обеспечивает большую стабильность относительно положения оси шпинделя и поверхности стола. Для повышения эффективности положительных свойств рассматриваемой компоновки предусмотрено автоматическое регулирование разности температур элементов, определяющих величину H . С этой целью полости 7 в стойках мостика заполнены маслом, температура которого регулируется включением или отключением электрических нагревательных элементов 8, погруженных в масло.

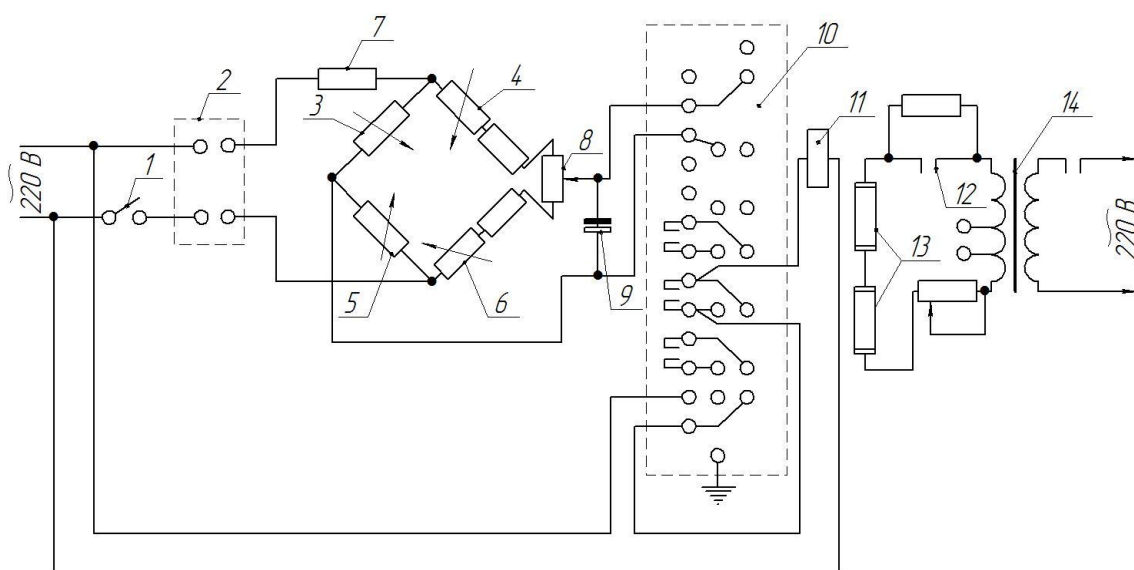


Рис. 14. Схема автоматического электроподогрева стоек мостика

Температуру расточной головки и стоек мостика контролируют датчики 4 и 6, выполненные в виде терморезисторов. Принципиальная схема подключения датчиков и нагревательного элемента показана на рис. 13. Через выключатель 1 и выпрямитель 2 питание подается в диагональ электрического моста, составленного из датчиков 3 и 4 (соответственно 4 и 6 на рис. 13), регистрирующих изменение температуры расточной головки и стоек мостика, и датчиков 5 и 6, регистрирующих изменение температуры окружающей среды. Вторая диагональ электрического моста подключена к электронному потенциометру 10.

В исходном состоянии в момент пуска станка электрический мост уравновешен. При нагревании расточной головки в диагонали моста возникает напряжение рассогласования, поступающее на электронный потенциометр. Последний при некотором уровне этого напряжения включает реле 11 и через контакт 12 подает питание от трансформатора 14 электрическим нагревателем 13 (см. поз. 8 на рис. 13), находящимся в полостях стоек мостика. С помощью сопротивлений 7 и 8 электрический мост настроен таким образом, что при достижении заданной разности между температурой стоек мостика и температурой расточной головки напряжение в диагонали моста уменьшается настолько, что реле 11 отключается и подогрев стоек мостика прекращается до возникновения следующих сигналов рассогласования. Конденсатор 9 сглаживает пульсации в схеме, обеспечивая плавность ее работы.

Чувствительность схемы позволяет поддерживать заданную разность температур головки и мостика с момента пуска до полного разогрева станка. Этим обеспечивается непрерывная компенсация тепловых деформаций. Разность температур приближенно определяют при проектировании и окончательно уточняют при наладке станка. В станке мод. ОС-2063 компенсация достигалась, когда нагрев расточной головки примерно втрое превышал нагрев стоек мостика станка.

Недостатками системы являются возможность неточной наладки станка, затраты на переустановку расточной головки, усложнение конструкции. Так же, как и предыдущая, данная система лишь стабилизирует температуру при достижении определенного порогового значения, не имея возможности поддерживать ее всегда постоянной, а значит, появление тепловых погрешностей неизбежно.

2.3.4 Система термостабилизации шпиндельного узла по патенту

Я.Л.Либермана №102553

Задачей разработки устройства было повышение точности поддержания температуры подшипников на заданном уровне при высокой экономичности масляного туманообразования [8].

Достигается решение поставленной задачи за счет того, что высокоскоростной шпиндельный узел металлорежущего станка, содержащий шпиндель, установленный в корпусе на подшипниках качения, многовходовой блок управления, первый вход которого соединен с датчиком напряжения, электроуправляемый маслораспылитель, выходное сопло которого размещено в корпусе, а управляющий вход связан с выходом блока управления, термодатчик, соприкасающийся с наружным кольцом переднего подшипника шпинделя и соединенный со вторым входом блока управления, и тензодатчик, встроенный в наружное кольцо переднего подшипника шпинделя, дополнительно снабжен формирователем импульсов и сглаживающим фильтром, входы которых соединены с тензодатчиком, частотомером, вход которого подключен к выходу формирователя импульсов, а выход – к третьему входу блока управления, причем выход фильтра соединен с четвертым входом блока управления, а блок управления выполнен в виде сумматора напряжений.

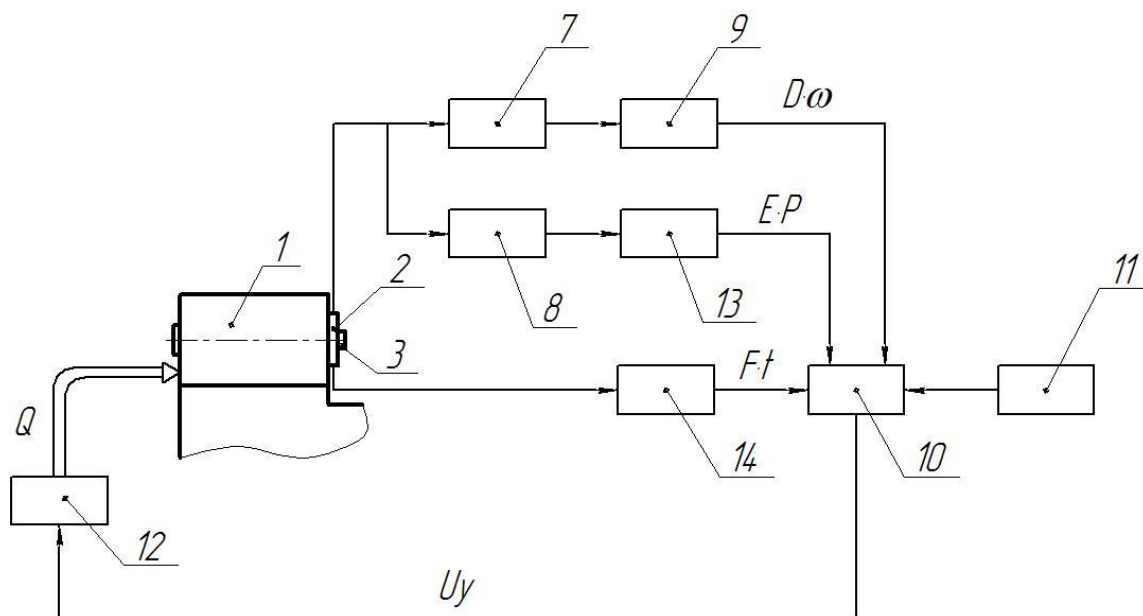


Рис. 15. Система термостабилизации шпиндельного узла

На рис. 15 приведена схема прилагаемого шпиндельного узла, на рис. 16 – схема расположения термодатчика и тензодатчика относительно переднего подшипника шпинделя, на рис. 17 – временная диаграмма сигналов напряжения при вращении шпинделя на выходах тензодатчика, сглаживающего фильтра и формирователя импульсов.

Как видно из рисунков, шпиндельный узел состоит из корпуса 1, в котором на подшипниках качения (на рисунке показан только передний

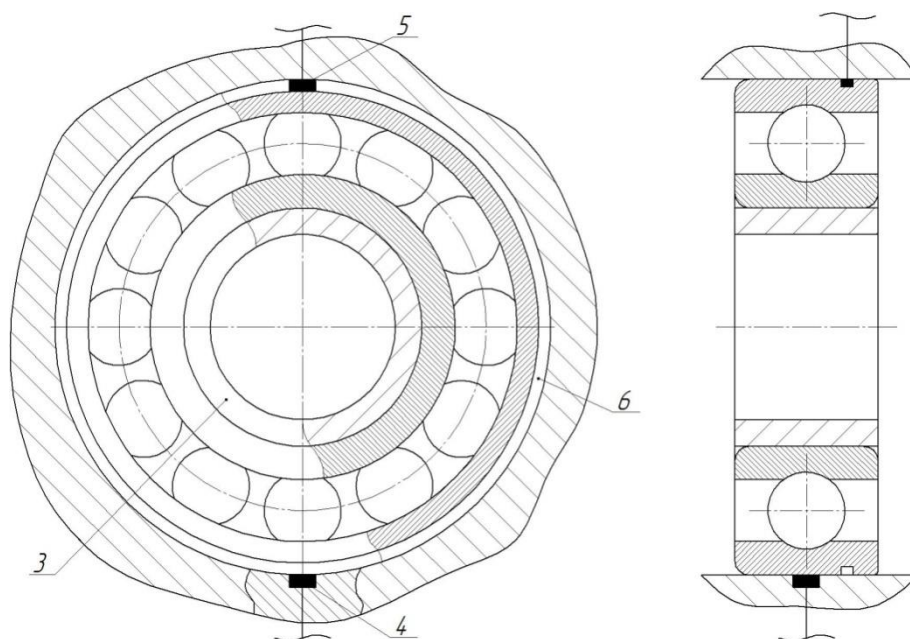


Рис. 16. Схема расположения термодатчика и тензодатчика
относительно переднего подшипника шпинделя

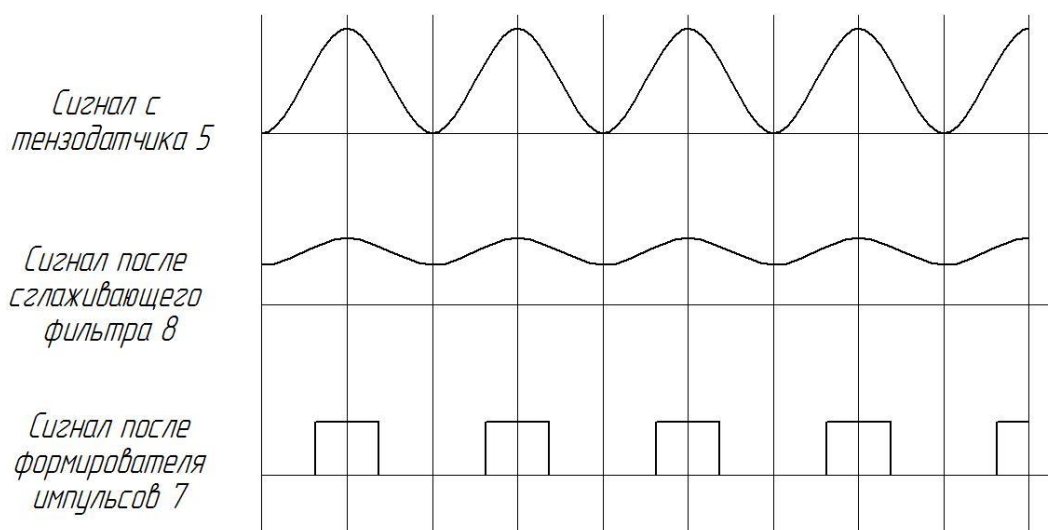


Рис. 17. Временная диаграмма сигналов напряжения при вращении шпинделя на выходах тензодатчика сглаживающего фильтра и формирователя импульсов

подшипник 2) установлен шпиндель 3. В корпусе 1 в соприкосновении с подшипником 2 размещен термодатчик 4, а в наружное кольцо подшипника 2 встроены тензодатчик 5. Последний установлен в кольцевой проточке 6, выполненной в наружном кольце так, как это показано на рис.15, что является типовым способом установки тензодатчиков в подобных случаях. Выход тензодатчика 5 соединен со входами формирователя импульсов 7 и сглаживающего фильтра 8. При этом выход формирователя связан со входами частотомера 9, а выход частотомера, выход фильтра 8 и термодатчика 4 соединены со входами блока управления 10, выполненного в виде четырехвходового сумматора (термодатчик соединен со вторым входом блока 10, частотомер – с третьим входом блока 10, а фильтр – с четвертым

входом блока 10). К первому же входу блока 10 подключен датчик напряжения 11, к выходу блока 10 подключен управляющий вход электроуправляемого маслораспылителя 12, а выходное сопло маслораспылителя подключено к корпусу 1 шпиндельного узла, а именно, размещен в нем. Для настройки устройства (согласования сигналов от частотомера 9, фильтра 8 и термодатчика 4) фильтр и термодатчик могут быть соединены с блоком 10 (сумматором), соответственно, через усилители 13 и 14 с регулируемыми коэффициентами усиления. Однако применение этих усилителей не обязательно – параметры выходных сигналов частотомера, фильтра и термодатчика могут быть согласованы и при изготовлении всего шпиндельного узла.

Работа системы происходит следующим образом. При вращении шпинделя тела вращения (шарики) подшипника создают пульсирующую нагрузку на тензодатчик. Тензодатчик выдает также пульсирующий сигнал напряжения, амплитуда которого пропорциональна нагрузке на подшипник, а частота – скорости его вращения. Проходя через сглаживающий фильтр, этот сигнал усредняется, в результате чего нагрузка P теперь отображается уровнем сигнала $E \cdot P$ на выходе фильтра. Проходя через формирователь импульсов, сигнал от тензодатчика из приблизительно синусоидального пульсирующего преобразуется в последовательность прямоугольных импульсов, частоту которых теперь можно надежно подсчитать. Поступая на частотомер, эти импульсы создают на его выходе сигнал $D \cdot \omega$, уровень которого отображает скорость ω вращения подшипника. Одновременно с этим термодатчик выдает сигнал $F \cdot t$, уровень которого отображает температуру t подшипника (D , E , F - коэффициенты пропорциональности). Все эти сигналы поступают на сумматор и суммируются им. На этот же сумматор подается сигнал U_3 от датчика напряжения, которым задается минимально допустимая производительность маслораспылителя. В результате на выходе сумматора получается сигнал $U_y = D \cdot \omega + E \cdot P + F \cdot t + U_3$.

Сигнал U_y поступает на маслораспылитель и обеспечивает его производительность Q . Чем больше U_y , тем больше Q . А чем больше Q , тем лучше охлаждаются подшипники шпиндельного узла и тем меньше температура t . Иначе говоря, чем больше некоторая величина $C \cdot U_y$, тем меньше t (здесь C – коэффициент пропорциональности, подобный D , E , F). Если учесть, что чем больше ω , тем больше t , и чем больше P , тем также больше t , то в общем виде можно записать $t = A \cdot \omega + B \cdot P - C \cdot U_y$, где A и B – коэффициенты пропорциональности, аналогичные C . Подставив в формулу для t величину U_y , получим

$$t = \frac{(A - C \cdot D) \cdot \omega + (B - C \cdot E) \cdot P - C \cdot U_3}{1 + C \cdot F}.$$

Из этой формулы следует, что при неизменном U_3 и изменении ω на $\Delta\omega$ и P на ΔP , величина t изменится на

$$\Delta t = \frac{(A - C \cdot D) \cdot \Delta\omega + (B - C \cdot E) \cdot \Delta P}{1 + C \cdot F}.$$

То есть, если при работе шпиндельного узла скорость вращения шпинделя или/и нагрузка увеличатся, соответственно, на $\Delta\omega$ или/и на ΔP , то t возрастет на Δt , а если они уменьшатся, то уменьшится на Δt и t .

Величина Δt – есть погрешность стабилизации температуры шпиндельного узла, обеспечиваемая системой.

Достоинством является повышение точности поддержания температуры подшипников на заданном уровне.

Работа системы основана на сравнении температуры – это является существенным недостатком, т.к. тепловые процессы нелинейные, нельзя просто вычитать сигналы. Для более производительной работы надо ставить регулятор. Вместе с тем, еще один недостаток системы – она обладает низким быстродействием.

2.3.5 Система термостабилизации шпиндельного узла по патенту

Я.Л.Либермана №116387

Задачей разработки системы явилось повышение быстродействия системы термостабилизации шпиндельного узла металлорежущего станка при точности стабилизации такой же, как и в предыдущей системе [9].

Достигается решение поставленной задачи за счет того, что система термостабилизации шпиндельного узла металлорежущего станка, содержащая шпиндель, установленный в корпусе на подшипниках качения, сумматор напряжений, первый вход которого соединен с датчиком напряжения, электроуправляемый маслораспылитель, выходное сопло которого размещено в корпусе, а управляющий вход связан с выходом сумматора, термодатчик, соприкасающийся с наружным кольцом переднего подшипника шпинделя и соединенный со вторым входом сумматора, тензодатчик, встроенный в наружное кольцо переднего подшипника шпинделя, формирователь импульсов и сглаживающий фильтр, входы которых соединены с тензодатчиком, частотомер, вход которого подключен к выходу формирователя импульсов, снабжена первым и вторым блоками умножения на два, первой и второй линиями задержки и первым и вторым компараторами, причем выход частотомера соединен со входами первого блока умножения и первой линии задержки, выходы которых соединены со входами первого компаратора, выход сглаживающего фильтра соединен со входами второго блока умножения и второй линии задержки, выходы которых соединены со входами второго компаратора, а выходы компараторов соединены с третьим и четвертым входами сумматора.

сглаживающего фильтра 8. При этом выход формирователя связан со входом частотомера 9, выход термодатчика 4 соединен со вторым входом сумматора 10. К первому же входу блока 10 подключен датчик напряжения 11, к выходу блока 10 подключен управляющий вход электроуправляемого маслораспылителя 12, а выходное сопло маслораспылителя подключено к корпусу 1 шпиндельного узла, а именно, размещено в нем. Для настройки устройства (согласования сигналов от частотомера 9, фильтра 8 и термодатчика 4) фильтр и термодатчик могут быть соединены с блоком 10 (сумматором) соответственно через усилители 13 и 14 с регулируемыми коэффициентами усиления. Однако применение этих усилителей не обязательно – параметры выходных сигналов частотомера, фильтра и термодатчика могут быть согласованы и при изготовлении всей системы термостабилизации.

Помимо описанного, система содержит первый 15 и второй 16 блоки умножения на два, первую 17 и вторую 18 линии задержки, первый 19 и второй 20 компараторы. Выход частотомера 9 соединен со входами блока умножения 15 и линии задержки 17, выходы которых соединены со входами компаратора 19 (выход блока 15 – с суммирующим входом, а выход линии задержки 17 – с вычитающим), выход сглаживающего фильтра 8 соединен со входами блока 16 и линии задержки 18, выходы которых соединены со входами компаратора 20 (выход блока 16 – с суммирующим входом, выход линии задержки 18 – с вычитающим), выход компаратора 19 соединен с третьим входом сумматора 10, а выход компаратора 20 – с его четвертым входом.

Работа предлагаемой системы происходит следующим образом. При вращении шпинделя 3 тела вращения (шарики) подшипника 4 создают пульсирующую нагрузку на тензодатчик 5. Тензодатчик выдает также пульсирующий сигнал напряжения, амплитуда которого пропорциональна нагрузке на подшипник, а частота – скорости его вращения. Проходя через

сглаживающий фильтр 8, этот сигнал усредняется, в результате чего нагрузка P теперь отображается уровнем сигнала $E \cdot P$ на выходе фильтра. Этот сигнал поступает на блок 16 умножения на два, что дает на его выходе сигнал $2 \cdot E \cdot P$ или, что то же самое, $E \cdot P + E \cdot P$. Кроме того, сигнал $E \cdot P$ поступает на линию задержки 18, где задерживается на время $d\tau$. Далее, с выхода линии задержки 18 он поступает на вычитающий вход компаратора 20. На суммирующий вход компаратора 20 поступает же сигнал $E \cdot P + E \cdot P$. Это создает на выходе компаратора 20 сигнал, имеющий смысл $E \cdot P + E \cdot \frac{dP}{d\tau}$, где $\frac{dP}{d\tau}$ - приращение сигнала P за время $d\tau$. Это приращение, по сути, есть первая производная P , то есть скорость его изменения. От компаратора 20 сигнал поступает на четвертый вход сумматора 10. Одновременно с этим, сигнал тензодатчика 5 проходит через формирователь импульсов 7 и дальше на частотомер 9. На выходе частотомера возникает сигнал $D \cdot \omega$, уровень которого отображает скорость ω вращения подшипника 2. Сигнал $D \cdot \omega$ поступает на блок 15 умножения на два и на его выходе появляется сигнал $2 \cdot D \cdot \omega = D \cdot \omega + D \cdot \omega$, который подается на суммирующий вход компаратора 19. Поскольку сигнал $D \cdot \omega$ поступает также на линию задержки 17, и подается на вычитающий вход компаратора 19 с задержкой на время $d\tau$, на выходе компаратора 19 будет сигнал, имеющий смысл $D \cdot \omega + D \cdot \frac{d\omega}{d\tau}$, где $\frac{d\omega}{d\tau}$, по существу, есть скорость изменения ω . Этот сигнал поступает на третий вход сумматора 10. Наряду с описанным, на выходе термодатчика 4 при работе системы имеется сигнал $F \cdot t$, уровень которого отображает температуру t подшипника 2 (D, E, F - коэффициенты пропорциональности). Этот сигнал поступает на второй вход сумматора 10. На этот же сумматор (на его первый вход) подается сигнал U_z от датчика напряжения 11, которым задается минимально допустимая производительность маслораспылителя 12. В результате на выходе сумматора 10 получается сигнал

$$U_y = D \cdot w + D \frac{dw}{d\tau} + E \cdot P + E \cdot \frac{dP}{d\tau} + F \cdot t + U_z.$$

Сигнал U_y поступает на маслораспылитель 12 и обеспечивает его производительность Q . Чем больше U_y , тем больше Q . А чем больше Q , тем лучше охлаждаются подшипники шпиндельного узла и тем меньше температура t . Иначе говоря, чем больше некоторая величина $C \cdot U_y$, тем меньше t (здесь C – коэффициент пропорциональности, подобный D, E, F). Если учесть, что чем больше ω , тем больше t , и чем больше P , тем также больше t , то в общем виде можно записать $t = A \cdot \omega + B \cdot P - C \cdot U_y$, где A и B – коэффициенты пропорциональности, аналогичные C . Подставив в эту формулу величину U_y , получим

$$t = \frac{(A - C \cdot D) \cdot \omega + (B - C \cdot E) \cdot P - C \cdot (D \frac{d\omega}{d\tau} + E \frac{dP}{d\tau}) - C U_z}{1 + C \cdot F}.$$

Из этой формулы следует, что при неизменных U_z , скорости изменения ω (величины $\frac{d\omega}{d\tau}$) и скорости изменения P нагрузки на передний подшипник шпиндельного узла (величины $\frac{dP}{d\tau}$), величина t изменится на

$$\Delta t = \frac{(A - C \cdot D) \Delta \omega + (B - C \cdot E) \Delta P}{1 + C \cdot F},$$

если ω изменится на $\Delta \omega$, а P изменится на ΔP .

Это легко показать следующим образом, полагая, что быстродействие системы есть скорость изменения t при изменении ω и P . Но скорость изменения t есть его первая производная $\gamma = \frac{dt}{d\tau}$. Поэтому, (полагая $U_z = \text{const}$), продифференцировав t для прототипа, получим:

$$\gamma^* = \frac{dt}{d\tau} = \frac{A - C \cdot D}{1 + C \cdot F} \cdot \frac{d\omega}{d\tau} + \frac{B - C \cdot E}{1 + C \cdot F} \cdot \frac{dP}{d\tau}.$$

Та же операция для предлагаемой системы дает:

$$\gamma^{**} = \frac{dt}{d\tau} = \frac{A - C \cdot D}{1 + C \cdot F} \cdot \frac{d\omega}{d\tau} + \frac{B - C \cdot E}{1 + C \cdot F} \cdot \frac{dP}{dt} - \frac{C \cdot (D \frac{d^2\omega}{d\tau^2} + E \frac{d^2P}{d\tau^2})}{1 + C \cdot F}.$$

Разность

$$\Delta\gamma = \gamma^{**} - \gamma^* = - \frac{C \cdot (D \frac{d^2\omega}{d\tau^2} + E \frac{d^2P}{d\tau^2})}{1 + C \cdot F}.$$

Она показывает, что быстродействие предлагаемой системы оказывается действительно выше, чем у предыдущей. Знак «минус» перед правой частью $\Delta\gamma$ при этом говорит о том, что в случае увеличения скорости изменения ω и P скорость увеличения t уменьшается. То есть, предлагаемая система быстрее решает задачу стабилизации температуры, в чем как раз и состоит технический результат разработки. Остальные недостатки у данной системы остались такими же, как и у предыдущей.

2.4 Выводы и постановка задач работы (обоснование систем термостабилизации с искусственным интеллектом)

Системы стабилизации температуры шпиндельных узлов металлорежущих станков, описанные в этой главе, основаны на одном принципе – когда температура шпиндельного узла достигает установленного порогового значения, система срабатывает и начинается охлаждение узла. При снижении температуры до оптимального значения, охлаждение системы прекращается; и процесс повторяется снова. Мы же стремимся создать систему с регулируемой производительностью маслораспределителя, которая поддерживала бы температуру постоянной.

Для этого мы создаем систему с искусственным интеллектом. За основу берем многолетний опыт людей, работающих на металлорежущих станках.

В результате использования такой системы мы будем иметь постоянную температуру подшипников, что повлечет за собой снижение температурных деформаций и повышение точности металлорежущих станков.

ГЛАВА 3. НЕЧЕТКАЯ ЛОГИКА КАК БАЗА ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ С ИСКУССТВЕННЫМ ИНТЕЛЛЕКТОМ

3.1 Сущность математического аппарата нечеткой логики и его возможности

3.1.1 Основы фаззи-логики

Фаззи-логика в переводе с английского – нечеткая, нежесткая, приближенная логика. Родившаяся в 60-е годы прошлого века как развитие теории множеств применительно к информационным системам, она находит сегодня все большее применение в различных технических системах как средство управления [10].

Нечеткая логика предназначена для формализации человеческих способностей к неточным или приближенным рассуждениям, которые позволяют более адекватно описывать ситуации с неопределенностью. Классическая логика по своей сути игнорирует проблему неопределенности, поскольку все высказывания и рассуждения в формальных логических системах могут иметь только значение «истина» (И, 1) или значение «ложь» (Л, 0). В отличие от этого в нечеткой логике истинность рассуждений оценивается в некоторой степени, которая может принимать и другие отличные $\{И, Л\}$ значения.

Чтобы иметь возможность выражать неопределенные знания, необходима такая логическая система, которая позволяет некоторому предложению иметь истинное значение, отличающееся от бинарного И или Л. Один из подходов – расширить множество истинностных значений $\{И, Л\}$ и позволить предложениям принимать некоторые дополнительные значения истинности.

В предложенном Л.Заде варианте нечеткой логики множество истинностных значений высказываний обобщается до интервала

действительных значений $[0, 1]$, что позволяет высказыванию принимать любое значение истинности из этого интервала. Это численное значение является количественной оценкой степени истинности высказывания, относительно которого нельзя с полной уверенностью заключить о его истинности или ложности. Использование в качестве множества истинностных значений интервала $[0, 1]$ позволяет построить логическую схему, в рамках которой оказалось возможным выполнять рассуждения с неопределенностью и оценивать истинность высказываний типа: «Скорость автомобиля довольно высокая», «Давление в системе весьма значительное», и др.

Исходным понятием нечеткой логики является понятие элементарного нечеткого высказывания. В общем случае элементарным нечетким высказыванием называется повествовательное предложение, выражающее законченную мысль, относительно которой мы можем судить об ее истинности или ложности только с некоторой степенью уверенности.

Главным отличием элементарного нечеткого высказывания от элементарного высказывания математической логики является следующий факт. Множество значений истинности элементарных высказываний классической логики состоит из двух элементов: {«истина», «ложь»} при этом значению «истина» соответствует цифра 1 или буква И, а значению «ложь» - цифра 0 или буква Л. В нечеткой логике степень истинности элементарного нечеткого высказывания принимает значение из замкнутого интервала $[0, 1]$, причем 0 и 1 являются предельными значениями степени истинности и совпадают со значениями «ложь» и «истина» соответственно.

3.1.2 Системы нечеткого вывода

Нечеткий вывод занимает центральное место в нечеткой логике и системах нечеткого управления. Процесс нечеткого вывода представляет собой некоторую процедуру или алгоритм получения нечетких заключений на основе нечетких условий или предпосылок с использованием

рассмотренных выше понятий нечеткой логики [10]. Этот процесс соединяет в себе все основные концепции теории нечетких множеств: функции принадлежности, лингвистические переменные, нечеткие логические операции, методы нечеткой импликации и нечеткой композиции.

Системы нечеткого вывода предназначены для реализации процесса нечеткого вывода и служат концептуальным базисом всей современной нечеткой логики. Системы нечеткого вывода позволяют решать задачи автоматического управления, классификации данных, распознавания образов, принятия решений, машинного обучения и многие другие.

Говоря о нечеткой логике, чаще всего имеют в виду системы нечеткого вывода, которые широко используются для управления техническими устройствами и процессами. Разработка и применение систем нечеткого вывода включают в себя ряд этапов, реализация которых выполняется с помощью рассмотренных ранее основных положений нечеткой логики.

Системы нечеткого вывода предназначены для преобразования значений входных переменных процесса управления в выходные переменные на основе использования нечетких правил продукций. Для этого системы нечеткого вывода должны содержать базу правил нечетких продукций и реализовывать нечеткий вывод заключений на основе посылок или условий, представленных в форме нечетких лингвистических высказываний.

Таким образом, основными этапами нечеткого вывода являются:

- формирование базы правил систем нечеткого вывода;
- фаззификация входных переменных;
- агрегирование подусловий в нечетких правилах продукций;
- активизация или композиция подзаключений в нечетких правилах продукций;
- аккумулялирование заключений нечетких правил продукций.

Ниже рассматриваются основные особенности каждого из этих этапов и приводятся простые примеры их выполнения.

База правил систем нечеткого вывода предназначена для формального представления эмпирических знаний или знаний экспертов в той или иной проблемной области. В системах нечеткого вывода используются правила нечетких продукций, в которых условия и заключения сформулированы в терминах нечетких лингвистических высказываний.

Правила составляются с учетом следующих рекомендаций:

- свод правил должен быть достаточно полным для выполнения поставленной задачи управления, не должно быть неучтенных возможных ситуаций с измеряемыми координатами, уводящих процесс из-под контроля;
- желательно, чтобы каждое правило было простым, содержало одно условие и одно заключение;
- для получения более качественного процесса управления не должно оставаться не перекрытых хотя бы двумя правилами фаззи-множеств;
- чем разнообразнее тестовые сигналы в процессе составления алгоритма, тем менее чувствительную к появлению в условиях эксплуатации непредусмотренных возмущающих воздействий систему можно получить.

В контексте нечеткой логики под фаззификацией понимается не только отдельный этап выполнения нечеткого вывода, но и собственно процесс или процедура нахождения значений функций принадлежности нечетких множеств (термов) на основе обычных (не нечетких) исходных данных. Фаззификацию еще называют введением нечеткости.

Целью этапа фаззификации является установление соответствия между конкретным (обычно численным) значением отдельной входной переменной системы нечеткого вывода и значением функции принадлежности

соответствующего ей терма входной лингвистической переменной. После завершения этого этапа для всех входных переменных должны быть определены конкретные значения функций принадлежности по каждому из лингвистических термов, которые используются в подусловиях базы правил системы нечеткого вывода.

Формально процедура фаззификации выполняется следующим образом. До начала этого этапа предполагаются известными конкретные значения всех входных переменных системы нечеткого вывода, т. е. множество значений $V' = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$. В общем случае каждое $a_i \in X_i$, где X_i - универсум лингвистической переменной β_i . Эти значения могут быть получены либо от датчиков, либо некоторым другим, внешним по отношению к системе нечеткого вывода, способом.

Далее рассматривается каждое из подусловий вида " β_i есть a' " правил системы нечеткого вывода, где a' - некоторый терм с известной функцией принадлежности $\mu(x)$. При этом значение a' используется в качестве аргумента $\mu(x)$, тем самым находится количественное значение $b'_i = \mu(a_i)$. Это значение и является результатом фаззификации подусловия " β_i есть a' ".

Этап фаззификации считается законченным, когда будут найдены все значения $b'_i = \mu(a_i)$ для каждого из подусловий всех правил, входящих в рассматриваемую базу правил системы нечеткого вывода. Это множество значений обозначим через $B = \{b'_i\}$.

Агрегирование представляет собой процедуру определения степени истинности условий по каждому из правил системы нечеткого вывода.

Формально процедура агрегирования выполняется следующим образом. До начала этого этапа предполагаются известными значения истинности всех подусловий системы нечеткого вывода, т. е. множество значений $B = \{b'_i\}$. Далее рассматривается каждое из условий правил

системы нечеткого вывода. Если условие правила представляет собой нечеткое высказывание вида «ЕСЛИ ..., ТО ...», то степень его истинности равна соответствующему значению b'_i .

Если же условие состоит из нескольких подусловий вида «ЕСЛИ ... И ..., ТО ...» или «ЕСЛИ ... ИЛИ ..., ТО ...», причем лингвистические переменные в подусловиях попарно не равны друг другу, то определяется степень истинности сложного высказывания на основе известных значений истинности подусловий. При этом для определения результата нечеткой конъюнкции или связки "И" может быть использовано правило минимума $T(A \wedge B) = \min\{T(A), T(B)\}$, а для определения результата нечеткой дизъюнкции или связки "ИЛИ" может быть использовано правило максимума $T(A \vee B) = \max\{T(A), T(B)\}$. При этом значения b'_i используются в качестве аргументов соответствующих логических операций. Тем самым находятся количественные значения истинности всех условий правил системы нечеткого вывода.

Этап агрегирования считается законченным, когда будут найдены все значения b''_k для каждого из правил R_k , входящих в рассматриваемую базу правил P системы нечеткого вывода. Это множество значений обозначим через $B'' = \{b''_1, b''_2, \dots, b''_n\}$.

Активация в системах нечеткого вывода представляет собой процедуру или процесс нахождения степени истинности каждого из подзаключений правил нечетких продукций. При формировании базы правил системы нечеткого вывода задаются весовые коэффициенты F_i для каждого правила (по умолчанию предполагается, если весовой коэффициент не задан явно, то его значение равно 1).

Формально процедура активации выполняется следующим образом. До начала этого этапа предполагаются известными значения истинности всех условий системы нечеткого вывода, т. е. множество значений $B'' =$

$\{b_1'', b_2'', \dots, b_n''\}$ и значения весовых коэффициентов F_i для каждого правила. Далее рассматривается каждое из заключений правил системы нечеткого вывода. Если заключение правила представляет собой нечеткое высказывание вида «ЕСЛИ ..., ТО ...», то степень его истинности равна алгебраическому произведению соответствующего значения b_i'' на весовой коэффициент F_i .

Если же заключение состоит из нескольких подзаключений вида «ЕСЛИ ... И ..., ТО ...» или «ЕСЛИ ... ИЛИ ..., ТО ...», причем лингвистические переменные в подзаключениях попарно не равны друг другу, то степень истинности каждого из подзаключений равна алгебраическому произведению соответствующего значения b_i'' на весовой коэффициент F_i . Таким образом, находятся все значения c_k степеней истинности подзаключений для каждого из правил R_k , входящих в рассматриваемую базу правил P системы нечеткого вывода. Это множество значений обозначим через $C = \{c_1, c_2, \dots, c_q\}$, где q - общее количество подзаключений в базе правил.

После нахождения множества $C = \{c_1, c_2, \dots, c_q\}$ определяются функции принадлежности каждого из подзаключений для рассматриваемых выходных лингвистических переменных.

Этап активации считается законченным, когда для каждой из выходных лингвистических переменных, входящих в отдельные подзаключения правил нечетких продукций, будут определены функции принадлежности нечетких множеств их значений, т.е. совокупность нечетких множеств: C_1, C_2, \dots, C_q , где q - общее количество подзаключений в базе правил системы нечеткого вывода.

Аккумуляция или аккумулялирование в системах нечеткого вывода представляет собой процедуру или процесс нахождения функции

принадлежности для каждой из выходных лингвистических переменных множества $W = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_S\}$.

Цель аккумуляции заключается в том, чтобы объединить или аккумулятировать все степени истинности заключений (подзаключений) для получения функции принадлежности каждой из выходных переменных. Причина необходимости выполнения этого этапа состоит в том, что подзаключения, относящиеся к одной и той же выходной лингвистической переменной, принадлежат различным правилам системы нечеткого вывода.

Формально процедура аккумуляции выполняется следующим образом. До начала этого этапа предполагаются известными значения истинности всех подзаключений для каждого из правил R_k , входящих в рассматриваемую базу правил P системы нечеткого вывода, в форме совокупности нечетких множеств: $C_{j1}, C_{j2}, \dots, C_{jq}$, где q - общее количество подзаключений в базе правил. Далее последовательно рассматривается каждая из выходных лингвистических переменных $\omega_j \in W$ и относящиеся к ней нечеткие множества: $C_{j1}, C_{j2}, \dots, C_{jq}$. Результат аккумуляции для выходной лингвистической переменной ω_j определяется как объединение нечетких множеств $C_{j1}, C_{j2}, \dots, C_{jq}$.

Этап аккумуляции считается законченным, когда для каждой из выходных лингвистических переменных будут определены итоговые функции принадлежности нечетких множеств их значений, т.е. совокупность нечетких множеств: C'_1, C'_2, \dots, C'_S , где s - общее количество выходных лингвистических переменных в базе правил системы нечеткого вывода.

Дефаззификация в системах нечеткого вывода представляет собой процедуру или процесс нахождения обычного (не нечеткого) значения для каждой из выходных лингвистических переменных множества $W = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_S\}$.

Цель дефаззификации заключается в том, чтобы, используя результаты аккумуляции всех выходных лингвистических переменных, получить обычное количественное значение каждой из выходных переменных, которое может быть использовано специальными устройствами, внешними по отношению к системе нечеткого вывода.

Действительно, применяемые в современных системах управления устройства и механизмы способны воспринимать традиционные команды в форме количественных значений соответствующих управляющих переменных. Именно по этой причине необходимо преобразовать нечеткие множества в некоторые конкретные значения переменных. Поэтому дефаззификацию называют также приведением к четкости.

Формально процедура дефаззификации выполняется следующим образом. До начала этого этапа предполагаются известными функции принадлежности всех выходных лингвистических переменных в форме нечетких множеств: C'_1, C'_2, \dots, C'_s , где s - общее количество выходных лингвистических переменных в базе правил системы нечеткого вывода. Далее последовательно рассматривается каждая из выходных лингвистических переменных $\omega_j \in W$ и относящееся к ней нечеткое множество C'_j . Результат дефаззификации для выходной лингвистической переменной ω_j определяется в виде количественного значения $y_i \in R$, получаемого по одной из рассматриваемых ниже формул.

Этап дефаззификации считается законченным, когда для каждой из выходных лингвистических переменных будут определены итоговые количественные значения в форме некоторого действительного числа, т.е. в виде y_1, y_2, \dots, y_s , где s - общее количество выходных лингвистических переменных в базе правил системы нечеткого вывода.

Для выполнения численных расчетов на этапе дефаззификации могут быть использованы следующие формулы, получившие название методов дефаззификации.

Для интегральной оценки одним числом всего множества возможных значений y в фаззи-логике за это число принимают (эвристически) абсциссу центра тяжести площади усеченной части терма. Для одного правила это оказывается значение, соответствующее центру терма.

Практически всегда оказываются активизированными несколько правил, для которых имеет место объединенный терм B , усеченный разными уровнями функций принадлежности. Методом центра тяжести усеченной площади находится интегральное значение η управляющего воздействия:

$$\eta = \frac{\int_{y_{\text{нач}}}^{y_{\text{кон}}} y \mu(y) dy}{\int_{y_{\text{нач}}}^{y_{\text{кон}}} \mu(y) dy}.$$

Данный метод для расчета значения y оказывается сложным, требует много места в памяти управляющего устройства, снижая его быстродействие. Поэтому на практике, вводя некоторые упрощения в данный метод, используют его достаточно несложную модификацию в виде так называемой синглетон-функции:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^4 \mu_i c_i}{\sum_{i=1}^4 \mu_i},$$

где μ_i – значение ФП, присвоенное i – му выходному терму, c_i – центр i – го выходного терма.

В последнее время нечеткое моделирование является одной из наиболее активных и перспективных направлений прикладных исследований в области управления и принятия решений. Нечеткое моделирование оказывается особенно полезным, когда в описании технических систем и

бизнес-процессов присутствует неопределенность, которая затрудняет или даже исключает применение точных количественных методов и подходов.

В области управления техническими системами нечеткое моделирование позволяет получать более адекватные результаты по сравнению с результатами, которые основываются на использовании традиционных аналитических моделей и алгоритмов управления. Диапазон применения нечетких методов с каждым годом расширяется, охватывая такие области, как проектирование промышленных роботов и бытовых электроприборов, управление доменными печами и движением поездов метро, автоматическое распознавание речи и изображений.

Нечеткая логика, которая служит основой для реализации методов нечеткого управления, более естественно описывает характер человеческого мышления и его рассуждений, чем традиционные формально-логические системы. Именно поэтому изучение и использование математических средств для предоставления нечеткой исходной информации позволяет строить модели, которые наиболее адекватно отражают различные аспекты неопределенности, постоянно присутствующей в окружающей нас реальности.

3.2 Принципы построения систем управления на основе нечеткой логики

Если говорить о структуре фаззи-управления, то, как и в любой традиционной системе, в ее составе можно выделить управляющую часть – систему управления, и объект управления. Собственно система фаззи-управления состоит из четырех блоков, выполняющих последовательно в три этапа процедуру формирования алгоритма управления как функции управляющих воздействий u от входных переменных x_1, x_2, \dots, x_n (рис. 18). Блок фаззификации (Ff) преобразует входные физические переменные (x_1, x_2, \dots, x_n) в термы A_i лингвистических переменных и выделяет для

каждого момента времени (для каждого временного такта) значения ФП $\mu_i(x)$ для активизированных правил.

Блок логического заключения (*Inf*) в соответствии с правилами, заложенными предварительно экспертом в блок базы знаний (*RAM*), определяет термы B_j выходной лингвистической переменной и присваивает им согласно принципам фаззи-логики значения функции принадлежности $\mu_j(y)$.

Блок дефаззификации (*Dff*) преобразует термы B_j в управляющий сигнал $y = \eta$. Если фаззи-устройство (ФУ) должно вырабатывать несколько управляющих воздействий, то такое многоканальное ФУ можно рассматривать как несколько параллельно работающих ФУ.

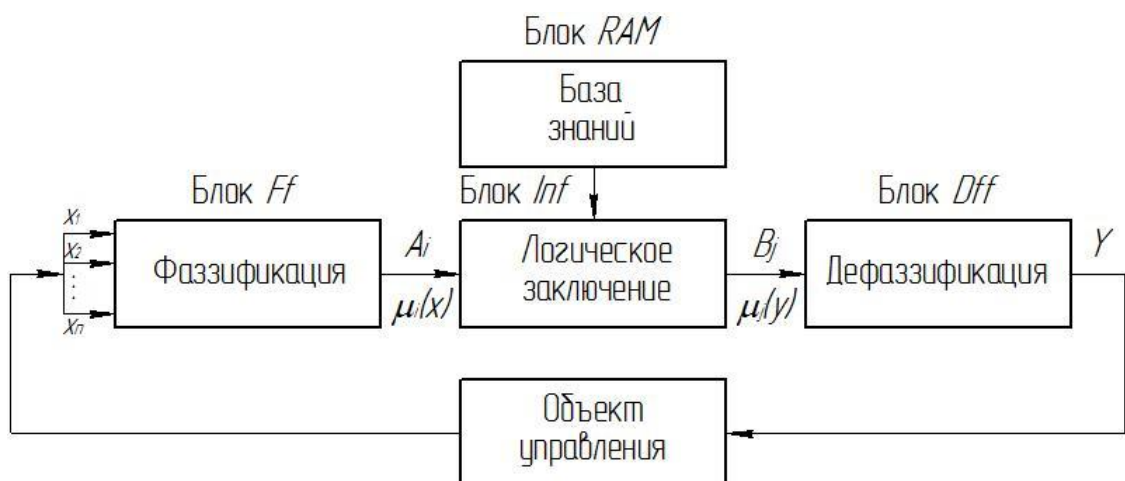


Рис. 18 – Блочная структура системы фаззи-управления

Рассмотрим вопрос формирования алгоритма фаззи-управления в приведенной структуре фаззи-управления.

Основу алгоритма составляет свод правил, который находится в блоке базы знаний. Для n входных переменных, каждая из которых имеет m термов, максимальное число правил m^n . Правила составляются экспертом на основании его понимания задачи управления.

Дополнительно к своду правил в состав алгоритма входят функции принадлежности, определяющие количественную взаимосвязь физических переменных с лингвистическими, т.е. с термами. К форме ФП $\mu(x)$ предъявляются минимальные требования в силу приближенного принципа управления на основе фаззи-логики. Важно, чтобы функция $\mu(x)$ плавно нарастала от нуля при $x=a$ до максимального значения, равного 1 при $x=c$, и плавно снижалась до нуля при $x=b$. Число ФП, приходящихся на каждую физическую переменную, выбирают из соображений качества управления. С увеличением числа ФП качество управления повышается, однако при этом усложняется алгоритм и повышаются требования к его быстродействию. Имеющийся опыт построения систем с фаззи-управлением показал, что трех-пяти ФП для каждой входной переменной и пяти-семи ФП для выходной переменной оказывается достаточно для приемлемого качества решения задач управления в электротехнике.

Процедура формирования управляющего воздействия выполняется в три этапа.

На этапе фаззификации входные физические переменные преобразуются в соответствующие термы.

На этапе логического заключения выходным термам переменной y присваиваются значения ФП входных переменных с общим условием $\mu(y) \leq \mu(x)$ и конкретно для правил с оператором И согласно принципу минимума.

На этапе логического заключения происходит преобразование входных термов в выходные с передачей от входа к выходу значений функций принадлежности по принципу минимума – максимума, получившему название $\min - \max$ -регулятор Мамдани (по имени его автора). В данном логическом заключении заложен некоторый компромисс при принятии решения: минимизация входных фаззи-множеств компенсируется

определенным образом максимизацией выходного фаззи-множества. Полученный результирующий терм B определяет множество возможных значений управляющего воздействия u .

На этапе дефаззификации логическая переменная должна быть преобразована в определенное значение физической переменной – управляющего воздействия.

3.3 Возможные варианты применения нечеткой логики для построения «интеллектуальных» систем термостабилизации шпиндельного узла

Алгоритмы управления с использованием нечеткой логики реализуются в системах термостабилизации программным способом. В программируемых контроллерах предусматриваются модули с инструкциями для пользователей, а в промышленных компьютерах – программные средства с набором стандартных ситуаций.

Нечеткая логика используется для замены традиционных алгоритмов управления и совместно с ними.

В простейшем случае вместо традиционного регулятора применяется фаззи-регулятор (рис. 19).

При построении нечеткого регулятора исходят из предположения, что эксперты в состоянии сформировать базу правил в форме

ЕСЛИ (предпосылка), ТО (вывод)

и базу данных с функциями принадлежности для предпосылок $\mu(e)$ и $\mu(u)$, т.е. определить все необходимые лингвистические правила с лингвистическими переменными и термами.

Проектирование нечеткого регулятора представляет собой циклически протекающий процесс, который лишь после многих интеграций позволяет достигнуть требуемого качества управления.

Однако, поскольку собственное ядро фаззи-регулятора (фазификация, механизм нечетких логических выводов, дефазификация) не обладает внутренней динамикой, то принципиально невозможно обеспечить требуемое динамическое поведение регулятора. Для обеспечения

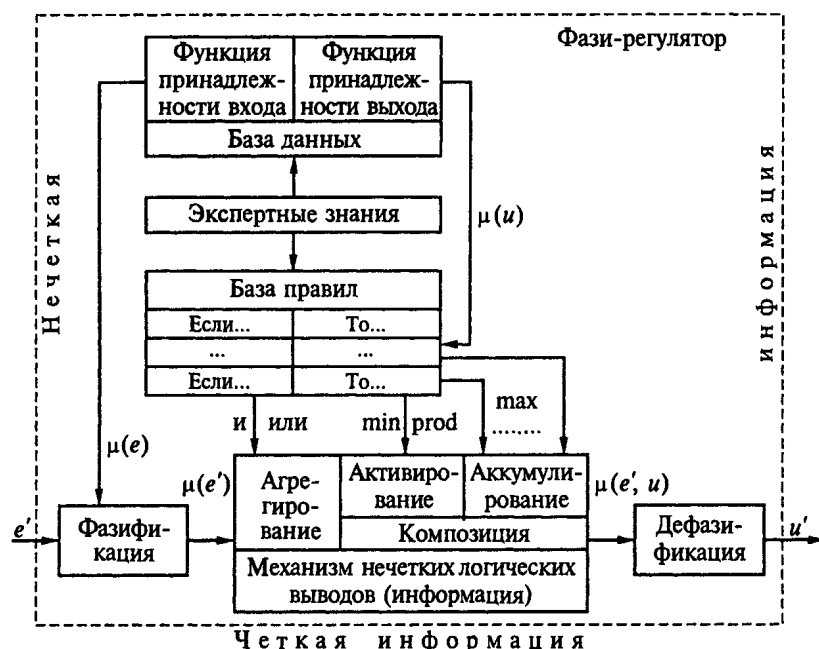


Рис. 19. Фаззи-регулятор

динамического поведения в контур управления блока подготовки контролируемых параметров вводятся данные измерения сигналов с датчиков.

Таким образом, для построения «интеллектуальной» системы термостабилизации шпиндельного узла мы используем фаззи-регулятор, на вход которого поступают сигналы с датчиков (датчик температуры, датчик нагрузки, датчик скорости вращения шпинделя), а на выходе получаем значение сигнала управления маслораспределителя.

При программной реализации таких систем, стоит уделить особое внимание на гибкость, перенастраиваемость данных систем в зависимости от определенных конкретных условий их использования.

Программная среда *MATLAB* позволяет добиться, при создании в ней систем на базе нечеткой логики, универсальности, гибкости, а также позволяет производить быстрый необходимый анализ. Задача последующей работы определяется как создание “интеллектуальных” систем термостабилизации подшипников шпиндельного узла станочного мотор-шпинделя в среде *MATLAB*.

ГЛАВА 4. СИСТЕМА *MATLAB* КАК АППАРАТ ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ПОДШИПНИКОВ СТАНОЧНОГО ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ.

4.1. Общие сведения о программе

Система *MATLAB* (сокращение от англ. *MA*TriX *LAB*oratory- - матричная лаборатория) представляет собой интегрированную программную среду для выполнения численных расчетов, компьютерного моделирования и вычислительных экспериментов, охватывающих в том или ином объеме различные области классической и современной математики, а также широчайший спектр инженерных приложений.

Архитектурно система *MATLAB* состоит из базовой программы и нескольких десятков так называемых пакетов расширения, которые в своей совокупности обеспечивают исключительно широкий диапазон решаемых задач. Интеграция всех этих средств в единой рабочей среде обеспечивает необходимую гибкость использования сотен встроенных функций, реализующих разнообразные математические процедуры и вычислительные алгоритмы. Нечеткое моделирование в среде *MATLAB* осуществляется с использованием пакета расширения *Fuzzy Logic Toolbox*, В котором реализованы десятки функций нечеткой логики и нечёткого вывода. [10]

4.2. Процесс разработки системы нечёткого вывода в системе

Для реализации процесса нечеткого моделирования в среде *MATLAB* предназначен специальный пакет расширения *Fuzzy Logic Toolbox*. В рамках этого пакета пользователь может выполнять необходимые действия по разработке и использованию нечетких моделей в одном из следующих режимов:

- в интерактивном режиме с помощью графических средств редактирования и визуализации всех компонентов систем нечёткого вывода;
- в режиме команд с помощью ввода имён соответствующих функций с необходимыми аргументами непосредственно в окно команд системы *MATLAB*.

Для разработки и дальнейшего применения систем нечёткого вывода в интерактивном режиме могут быть использованы следующие графические средства, входящие в состав пакета *Fuzzy Logic Toolbox*.

- Редактор систем нечеткого вывода *FIS* (*FIS Editor*) или сокращённо – редактор *FIS*.
- Редактор функций принадлежности системы вывода (*Membership Function Editor*) или сокращённо – редактор функций принадлежности.
- Редактор правил системы нечёткого вывода (*Rule Editor*) или сокращенно – редактор правил.
- Программа просмотра правил системы нечёткого вывода (*Rule Editor*) или сокращённо – просмотрщик правил вывода.
- Программа просмотра поверхности системы нечёткого вывода. (*Surface Viewer*) или сокращённо – просмотрщик поверхности вывода.

Рассмотрим особенности каждого из графических средств, которые следует использовать для разработки и исследования систем нечёткого вывода в среде *MATLAB*.

4.3. Редактор систем нечёткого вывода *FIS*

Редактор систем нечёткого вывода *FIS* (или просто редактор *FIS*) является основным средством, которое используется для создания или

редактирования систем нечеткого вывода в графическом режиме. Редактор *FIS* может быть открыт с помощью ввода функции *fuzzy* или *fuzzy* ('*flismat*') в окне команд. Эта функция предоставляет пользователю возможность задавать и редактировать на высоком уровне свойства системы нечеткого вывода, такие как число входных и выходных переменных, тип системы нечеткого вывода, используемый метод дефаззификации и т. д.

Если функция *fuzzy* вызывается без аргументов, то редактор *FIS* вызывается для вновь создаваемой системы нечеткого вывода с именем *Untitled* по умолчанию (рис. 12.1). При этом по умолчанию также задается целый ряд параметров, таких как тип системы нечеткого вывода (Мамдани), нечеткие логические операции, методы импликации, агрегирования и дефаззификации и некоторые другие. Пользователь может согласиться с этими значениями или изменить их.

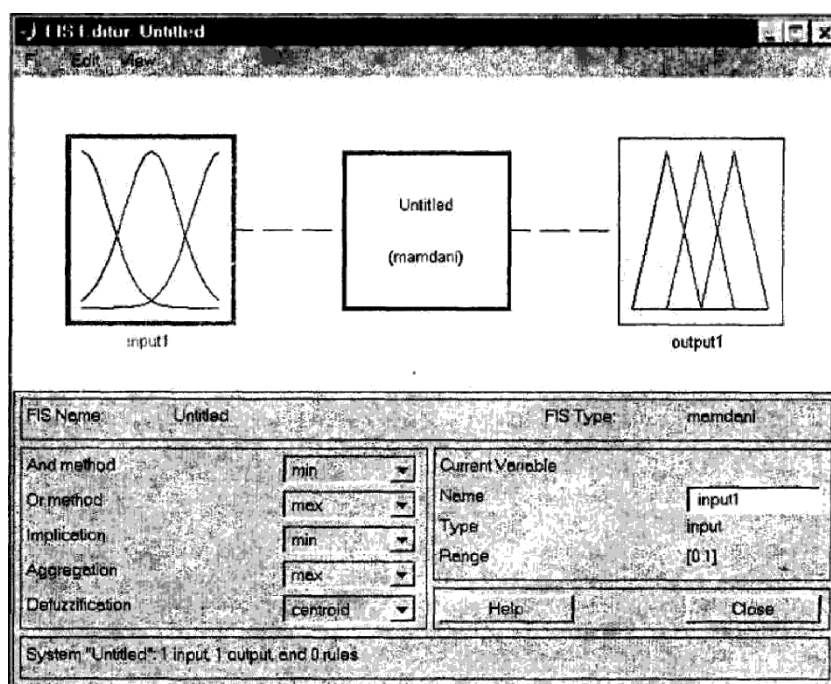


Рис. 12.1. Графический интерфейс редактора *FIS*, вызываемый функцией *fuzzy*.

Графический редактор FIS обладает графическим интерфейсом и позволяет вызывать все другие редакторы и программы просмотра систем нечёткого вывода. Графический интерфейс этого редактора обладает максимальным удобством и гибкостью, необходимой для интерактивной работы с отдельными компонентами системы нечёткого вывода.

В верхней части рабочего интерфейса редактора FIS изображается диаграмма, представляющая в визуальной форме входы и выходы системы нечёткого вывода, в центре которых находится так называемый процессор нечётких правил. Щелчок на прямоугольнике с изображением входа или выхода выделяет соответствующую переменную и делает её текущей. Прямоугольник текущей переменной при этом выделяется красным цветом. Двойной щелчок на прямоугольнике с изображением входной или выходной переменной вызывает редактор функций принадлежности с загруженной в него соответствующей переменной. Двойной щелчок на изображении процессора нечётких правил вызывает редактор правил для соответствующей системы нечёткого вывода. Если некоторая переменная существует в системе нечёткого вывода, но не используется в правилах вывода, то связь её с процессором нечётких правил изображается не сплошной, а пунктирной линией.

4.4. Редактор функций принадлежности

Редактор функций принадлежности, как следует из названия, предназначен для задания и редактирования функций принадлежности отдельных термов системы нечёткого вывода в графическом режиме. Редактор функций принадлежности может быть открыт с помощью ввода функций *mfedit*, а также *mfedit* ('a') или *mfedit* (a), в окне команд либо с помощью главного меню редактора FIS.

Эта функция, записанная в формате *mfedit*, просто вызывает редактор функций принадлежности без загрузки какой бы то ни было системы

нечёткого вывода. Функция в формате *mfedit* ('a') вызывает редактор функций принадлежности, который позволяет пользователю в графическом режиме анализировать и модифицировать все функции принадлежности некоторой структуры FIS, сохраненной во внешнем файле с именем *a.fis*. Функция в формате *mfedit(a)* работает с переменной рабочего пространства *MATLAB*, соответствующей структуре *FIS* с именем *a*. Для каждой функции принадлежности можно изменить ее имя, тип и параметры. Редактор предоставляет пользователю не только возможность выбрать любую из 11 встроенных функций принадлежности, но и задать собственную функцию принадлежности.

Результат вызова редактора функций принадлежности с помощью функции *mfedit* ('tipper') изображен на рис. 12.3.

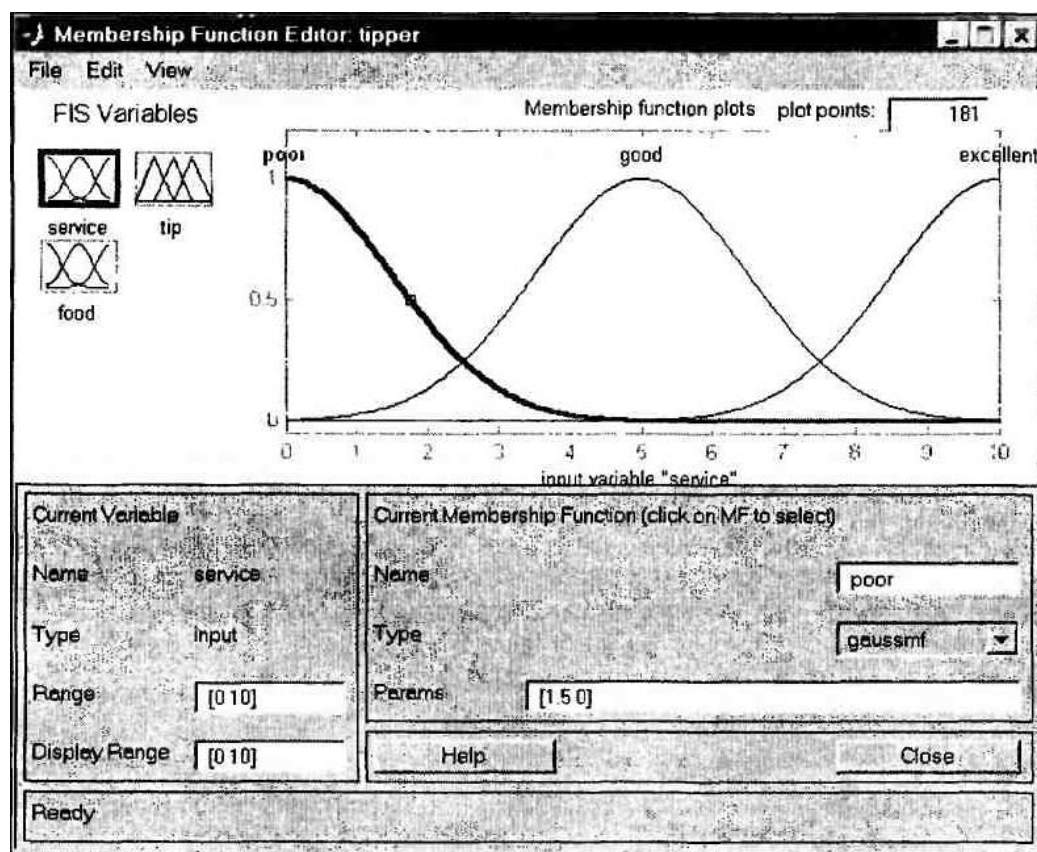


Рис. 12.3. Редактор функций принадлежности, вызываемый функцией *mfedit* ('tipper').

Для отображения графиков функций принадлежности следует выбрать необходимую переменную в левой части графического интерфейса редактора под заголовком *FIS Variables* (Переменные *FIS*). Чтобы выбрать нужную функцию принадлежности, следует щёлкнуть на ней или её метке в основном окне с графиками функций принадлежности.

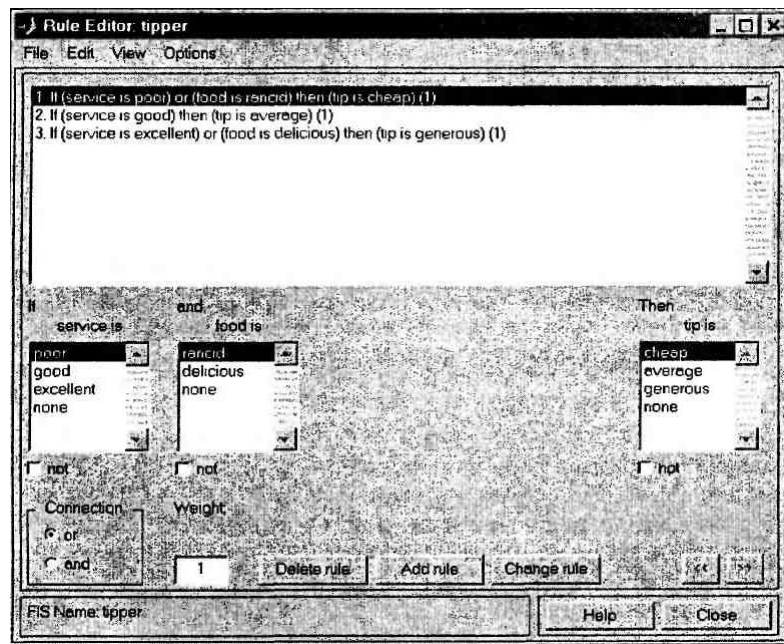
Раскрывающийся список типов функций принадлежности позволяет выбрать одну из 11 встроенных функций принадлежности. Используя соответствующие поля ввода, можно изменить имена термов выбранной переменной в поле ввода *Name*, модифицировать параметры встроенных функций принадлежности в поле ввода *Params*.

4.5. Редактор правил систем нечёткого вывода

Редактор правил систем нечёткого вывода, как следует из его названия, предназначен для задания и редактирования отдельных правил системы нечеткого вывода в графическом режиме. Редактор правил может быть открыт с помощью ввода функции *ruleedit* (' a ') или *ruleedit* (a) в окне команд либо с помощью главного меню редактора FIS (командой меню *Edit>Rules...* или нажатием клавиш <Ctrl>+<3>). Эта функция, записанная в формате *ruleedit* (' a ') , вызывает редактор правил, который позволяет пользователю в графическом режиме анализировать и модифицировать правила продукций системы нечеткого вывода *FIS*, сохраненной во внешнем файле с именем *afis*.

Чтобы использовать данный редактор для создания правил, необходимо предварительно определить все входные и выходные переменные, для чего можно воспользоваться редактором системы нечеткого вывода *FIS* и редактором функций принадлежности. При этом задать правила можно с помощью выбора соответствующих значений термов входных и выходных переменных.

Результат вызова функции *ruleedit* (' tipper ') изображен на рис. 12.4.



12.4. Редактор правил, вызываемый функцией *ruleedit* ('*tipper*')

Функция в формате *ruleedit* (*a*) вызывает редактор правил для переменной рабочего пространства *MATLAB*, соответствующей структуре *FIS* с именем *a*.

Редактор правил имеет главное меню, которое позволяет пользователю вызывать другие графические средства работы с системой нечёткого вывода *FIS*, загружать и сохранять структуру *FIS* во внешних файлах и т. д.

Поля ввода в средней части графического интерфейса редактора правил позволяют задать новое правило в системе нечёткого вывода. Для этого необходимо выделить имя термина соответствующей переменной, которая должна быть предварительно определена с помощью редактора функций принадлежности. Если некоторый терм не входит в правило, то для него следует выбрать значение "*none*". Если в условии правила используется логическое отрицание некоторого термина, то для этого термина следует отметить соответствующий флажок с меткой "*not*".

4.6. Программа просмотра правил системы нечёткого вывода

Главное назначение программы просмотра правил заключается в возможности визуализировать результаты нечеткого вывода и получать значения выходных переменных в зависимости от исходных значений входных переменных. Графический интерфейс программы просмотра правил может быть открыт с помощью ввода функции *ruleview('a')* или *ruleview(a)* в окне команд либо с помощью главного меню редактора *FIS*, редактора функций принадлежности или редактора правил

Функция, записанная в формате *ruleview('a')*, вызывает программу просмотра правил, которая изображает диаграмму нечеткого вывода для структуры *FIS*, сохраненной во внешнем файле с именем *a.fis*. Функция в формате *ruleview(a)* вызывает программу просмотра правил для переменной рабочего пространства *MATLAB*, соответствующей структуре *FIS* с именем *a*.

Графический интерфейс представлен на рис. 12.5.

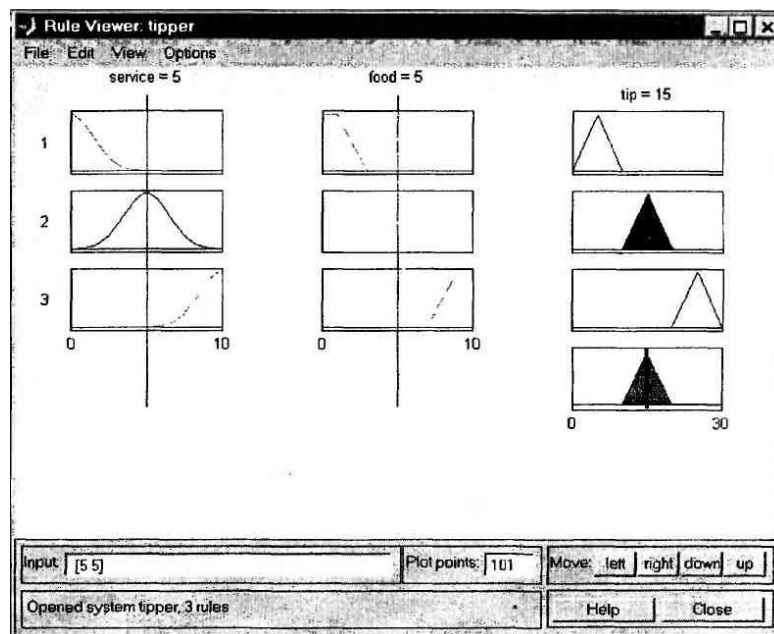


Рис. 12.5. Программа просмотра правил, вызванная функцией *ruleview('tipper')*

В центральной части графического интерфейса программы просмотра правил расположены прямоугольники, соответствующие отдельным входным переменным (функции принадлежности желтого цвета) и выходным переменным (функции принадлежности синего цвета) правил нечеткого вывода. При этом каждому правилу соответствует отдельная строка из этих прямоугольников. Номера правил указаны в левой части графического интерфейса.

В правой нижней части графического интерфейса расположен прямоугольник, изображающий дефазификацию выходной переменной после аккумуляирования всех заключений правил нечеткого вывода. Полученное в результате дефазификации значение выходной переменной указывается в верхней части столбца именем этой выходной переменной (*tip*=15 на рис. 12.5).

4.7. Программа просмотра поверхности системы нечёткого вывода

Программа просмотра поверхности системы нечеткого вывода позволяет просматривать поверхность системы нечеткого вывода и визуализировать графики зависимости выходных переменных от отдельных входных переменных. Графический интерфейс программы просмотра правил может быть открыт с помощью ввода функции *surfview* ('a') или *surfview* (a) в окне команд либо с помощью главного меню редактора FIS, редактора функций принадлежности или редактора правил

Функция, записанная в формате *surfview* ('a') , вызывает программу просмотра поверхности, которая изображает поверхность нечеткого вывода для структуры *FIS*, сохраненной во внешнем файле с именем *a.fis*, для любой одной или двух из ее входных переменных. Функция в формате *surfview* (a) вызывает программу просмотра поверхности вывода для переменной рабочего пространства *MATLAB*, соответствующей структуре *FIS* с именем *a*.

Графический интерфейс программы просмотра поверхности представлен на рис. 12.6.

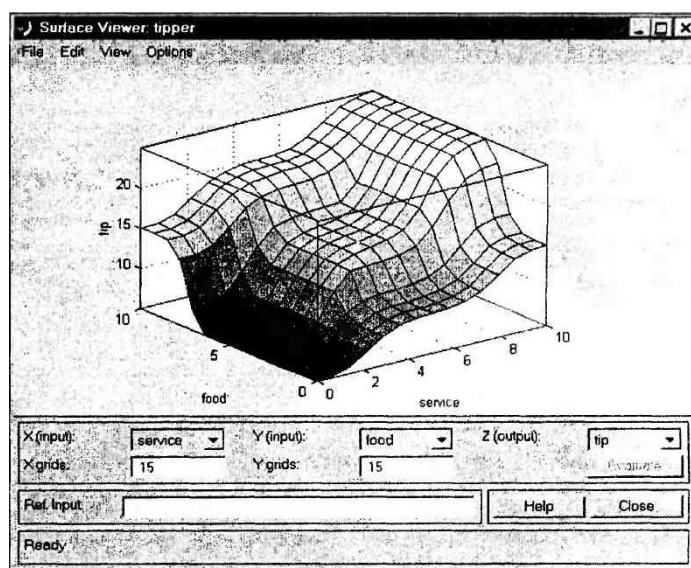


Рис. 12.6. Программа просмотра поверхности вывода, вызываемая функцией *surfview* ('*tipper*')

Программа просмотра поверхности вывода не позволяет вносить изменения в систему нечёткого вывода и соответствующую ей структуру *FIS*. Используя главное меню программы, можно выбрать входные переменные и соответствующие им горизонтальные оси системы координат (X и Y), а также выходную переменную, которой соответствует вертикальная ось координат (Z).

ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ» СИСТЕМЫ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА С УПРАВЛЕНИЕМ ПО ОТКЛОНЕНИЮ В СРЕДЕ *MATLAB*

4.1 Формирование принципа построения системы и базы правил

Главным звеном любой системы управления, базирующейся на фаззи-логике, является фаззи-регулятор, действие которого основано на знаниях экспертов, способных сформулировать базу правил в форме

IF (предпосылка), *THEN* (вывод).

С учетом этих знаний строится база данных с функциями принадлежности для предпосылок (входных переменных) и выводов (выходной переменной) [10]. В данном случае функциями принадлежности для предпосылок могут быть $f(\Delta t)$ и $f(V_t)$, а для выводов $f(Q)$, где Δt – отклонение температуры, V_t – скорость изменения температуры, Q – производительность маслораспылителя.

Самой простой является треугольная функция принадлежности вида

$$f(x, a, b) = |x - a|/b,$$

где x – переменная; a и b – параметры.

Функция обладает достаточной адаптационной способностью, а потому в качестве $f(\Delta t)$, $f(V_t)$ и $f(Q)$ при разработке требуемой системы управления приняли именно ее.

Термы были заданы следующим образом: “*VS*” соответствует значению “Очень маленькая”; “*S*” соответствует значению “маленькая”; “*M*” соответствует значению “средняя”; “*B*” соответствует значению “большая”; “*VB*” соответствует значению “очень большая”.

Для конкретизации параметров кривой применительно к лингвистическим переменным Δt , V_t , Q и их интервалам, обозначенным символическими именами – термами, вначале потребовалось описать знания экспертов в виде эвристических постулатов:

1. Если отклонение температуры маленькое (S) и скорость изменения температуры маленькая (S), то производительность маслораспылителя должна быть очень маленькой (VS);
2. Если отклонение температуры маленькое (S) и скорость изменения температуры средняя (M), то производительность маслораспылителя должна быть маленькой (S);
3. Если отклонение температуры маленькое (S) и скорость изменения температуры большая (B), то производительность маслораспылителя должна быть средней (M);
4. Если отклонение температуры среднее (M) и скорость изменения температуры маленькая (S), то производительность маслораспылителя должна быть маленькой (S);
5. Если отклонение температуры среднее (M) и скорость изменения температуры средняя (M), то производительность маслораспылителя должна быть средней (M);
6. Если отклонение температуры среднее (M) и скорость изменения температуры большая (B), то производительность маслораспылителя должна быть большой (B);
7. Если отклонение температуры большое (B) и скорость изменения температуры маленькая (S), то производительность маслораспылителя должна быть средней (M);
8. Если отклонение температуры большое (B) и скорость изменения температуры средняя (M), то производительность маслораспылителя должна быть большой (B);

9. Если отклонение температуры большое (B) и скорость изменения температуры большая (B), то производительность маслораспылителя должна быть очень большой (VB).

Максимальное значение всякой функции принадлежности, по определению, равно 1. Правоммерно полагать, что значения функций, соответствующих двум соседним термам, в точке их пересечения равны 0,5 (табл. 1). Учитывая это, были получены интерпретации функции принадлежности треугольного типа для трех термов лингвистической переменной Δt , трех термов лингвистической переменной V_t и пяти термов лингвистической переменной Q (рис. 20).

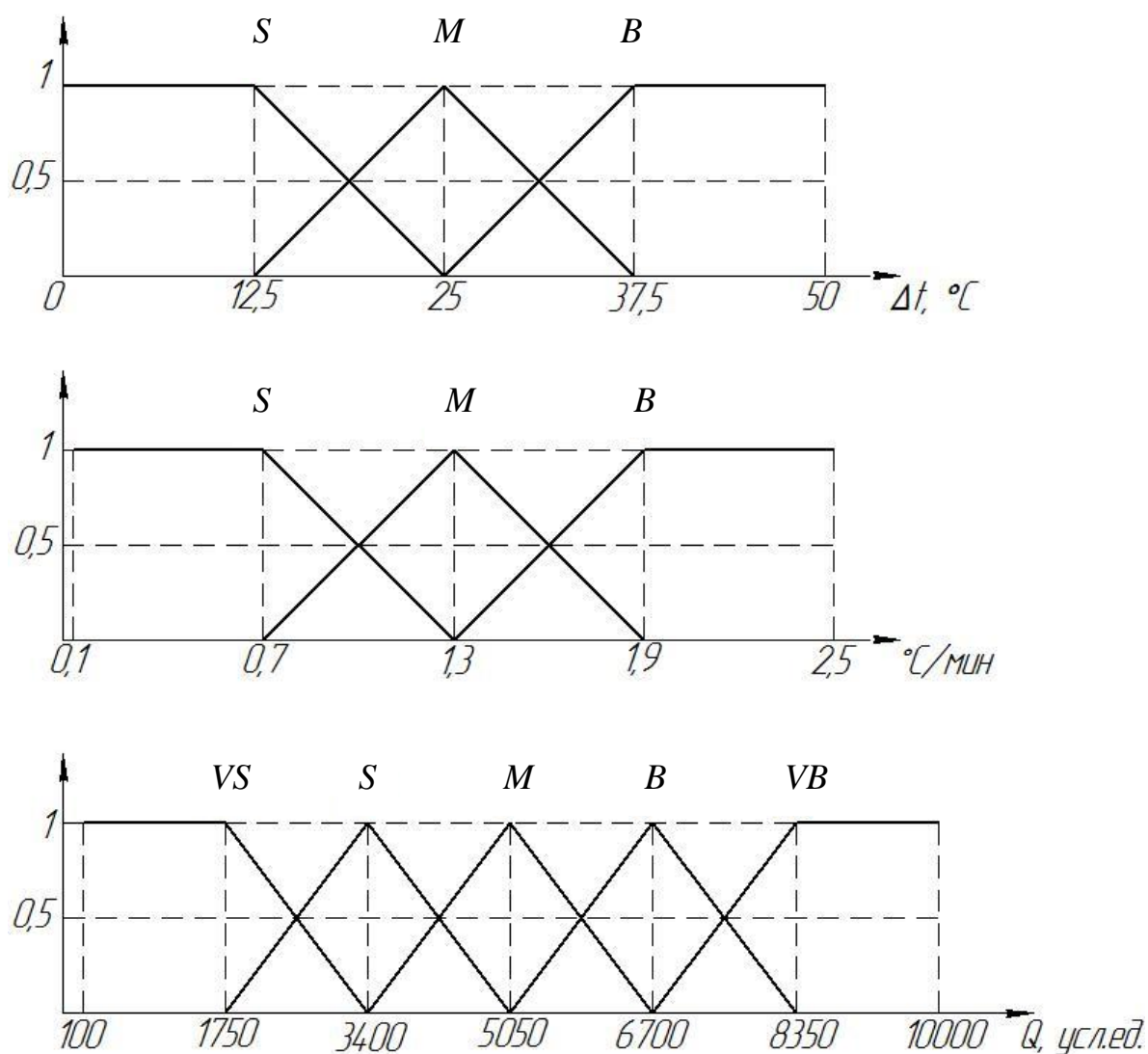


Рис. 20. Графики функций принадлежности

Внесём в программу *MATLAB* графики функций принадлежности посредством заполнения координат точек вершин термов (рис.21, 22). Следует уточнить, что в *MATLAB* именам входных лингвистических переменных (Δt и V_t) были назначены следующим образом:

- Δt_{grad} – изменение температуры (Δt), град;
- $V_{grad/min}$ – скорость изменения температуры (V_t), град/мин.

Название выходной лингвистической переменной Q осталось без изменений.

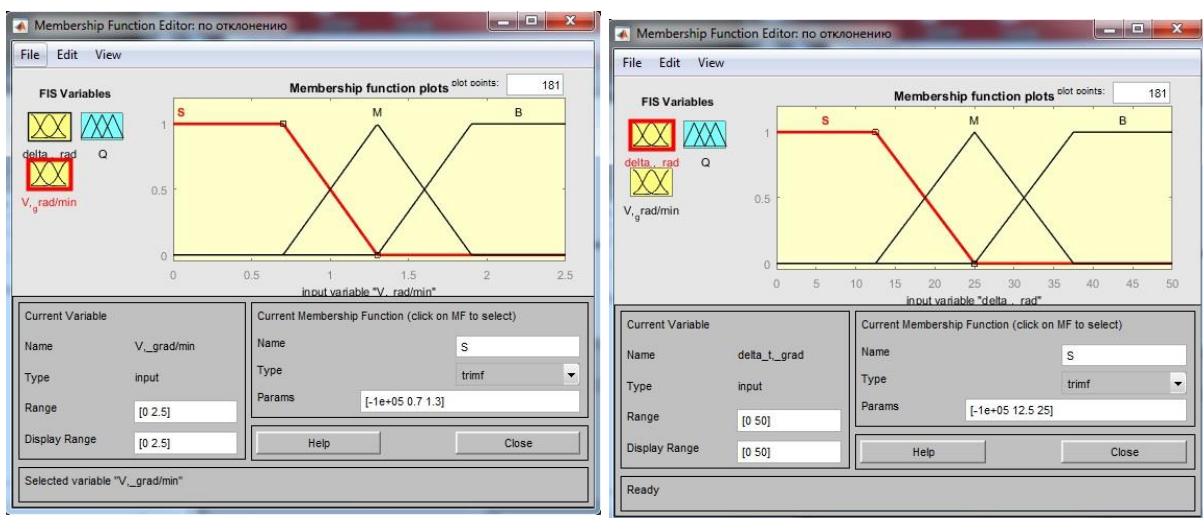


Рис. 21. Графики функций принадлежности для входных лингвистических переменных Δt и V_t в *MATLAB*

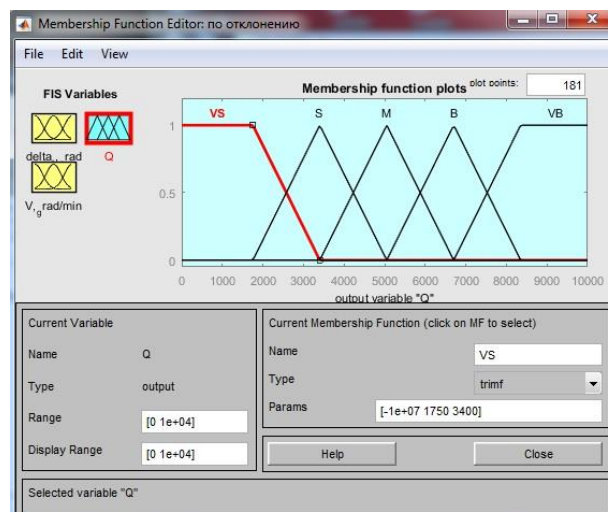


Рис. 22. График функции принадлежности для выходной лингвистической переменной Q в *MATLAB*

Интерпретации функции принадлежности

Лингвистическая переменная	Обозначение терма	Интервал, соответствующий терму	Функция принадлежности, соответствующая терму
Δt	S	$[0; 12,5]$	$f_1(\Delta t) = 1$
		$[12,5; 25]$	$f_1(\Delta t) = (25 - \Delta t)/12,5$
	M	$[12,5; 25]$	$f_2(\Delta t) = (\Delta t - 12,5)/12,5$
		$[25; 37,5]$	$f_2(\Delta t) = (37,5 - \Delta t)/12,5$
	B	$[25; 37,5]$	$f_3(\Delta t) = (\Delta t - 25)/12,5$
		$[37,5; 50]$	$f_3(\Delta t) = 1$
V_t	S	$[0,1; 0,7]$	$f_1(V_t) = 1$
		$[0,7; 1,3]$	$f_1(V_t) = (1,3 - V_t)/0,6$
	M	$[0,7; 1,3]$	$f_2(V_t) = (V_t - 0,7)/0,6$
		$[1,3; 1,9]$	$f_2(V_t) = (1,9 - V_t)/0,6$
	B	$[1,3; 1,9]$	$f_3(V_t) = (V_t - 1,3)/0,6$
		$[1,9; 2,5]$	$f_3(V_t) = 1$
Q	VS	$[100; 1750]$	$f_1(Q) = 1$
		$[1750; 3400]$	$f_1(Q) = (3400 - Q)/1650$
	S	$[1750; 3400]$	$f_2(Q) = (Q - 1750)/1650$
		$[3400; 5050]$	$f_2(Q) = (5050 - Q)/1650$
	M	$[3400; 5050]$	$f_3(Q) = (Q - 3400)/1650$
		$[5050; 6700]$	$f_3(Q) = (6700 - Q)/1650$
	B	$[5050; 6700]$	$f_4(Q) = (Q - 5050)/1650$
		$[6700; 8350]$	$f_4(Q) = (8350 - Q)/1650$
	VB	$[6700; 8350]$	$f_5(Q) = (Q - 6700)/1650$
		$[8350; 10000]$	$f_5(Q) = 1$

Это позволило организовать сформулированные правила в виде матрицы (табл. 2).

Таблица 2

Матрица правил

Отклонение температуры Δt	Скорость изменения температуры V_t		
	S	M	B
S	VS	S	M
M	S	M	B
B	M	B	VS

Далее сформулированные правила необходимо внести в базу правил программы данной системы в MATLAB. (рис. 23)

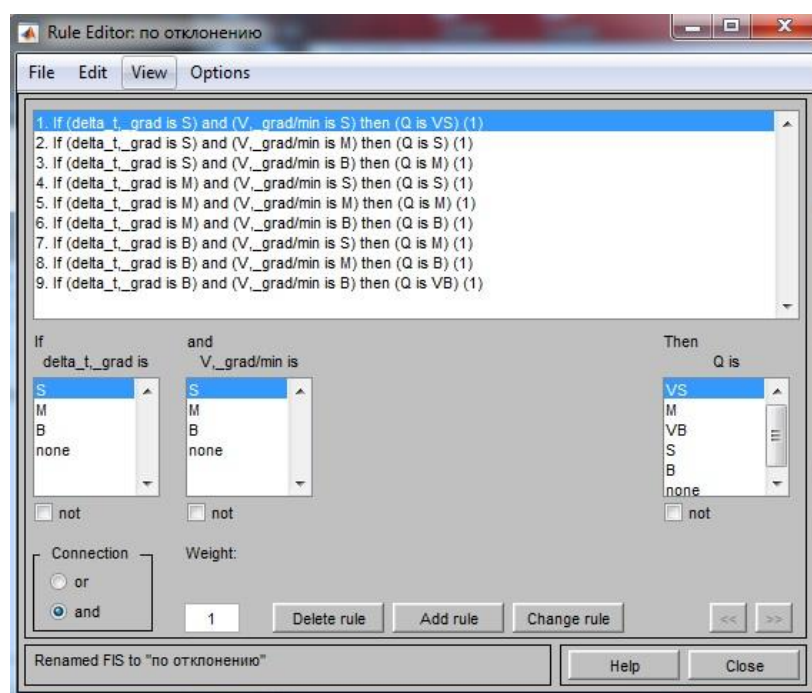


Рис. 23. База правил системы в MATLAB

4.2 Разработка алгоритма функционирования системы и синтез фаззи-регулятора

С помощью составленной матрицы нетрудно производить операцию фаззификации – установление соответствия между конкретным значением отдельной входной переменной и значением функции принадлежности соответствующего ей терма переменной [11]. Поскольку нечеткая логика предполагает возможность частичного наложения термов, в процессе фаззификации не исключено получение нескольких значений функции принадлежности, соответствующих одному значению лингвистической переменной. Для того чтобы остановиться на одном из полученных значений, после фаззификации обычно проводят агрегирование. Эта операция представляет собой процедуру определения степени истинности найденных значений функции принадлежности и установление связи между ними, описываемой чаще всего либо логическим «и», либо логическим «или». В данном случае указанная связь описана как «и».

После агрегирования фаззи-регулятор должен выполнять активирование – операцию, направленную на расширение агрегирования на все правила, описанные матрицей. Эта операция аналогична композиции нечетких отношений и в рассматриваемом случае была выполнена простейшим способом - по условию минимума. Это дало возможность далее достаточно легко (по правилу максимума) осуществить операцию аккумуляирования – процедуру отыскания значения функции принадлежности входного параметра.

Операции агрегирования, активирования и аккумуляирования в совокупности представляют собой механизм нечетких выводов, в результате которых переменной Δt присваивается значение $\Delta t'$, переменной V_t – значение входной переменной V_t' , и обусловленные этим функции $f(\Delta t) = f(\Delta t')$ и $f(V_t) = f(V_t')$ дают вполне определенную функцию $f(\Delta t', V_t', Q)$. Если теперь произвести операцию дефаззификации – отыскание по

$f(\Delta t', V_t', Q)$ величины Q' (удобнее всего для этого применить метод центра тяжести), то нетрудно получить значение требуемой производительности маслораспылителя, отвечающее исходной базе знаний.

Построенный на основе описанных принципов фаззи-регулятор формирует выходной сигнал, задающий производительность маслораспылителя (рис. 24).

Функциональная схема предлагаемой системы управления включает датчик температуры, аналого-цифровой преобразователь, фаззи-регулятор, цифроаналоговый преобразователь и регулируемый маслораспылитель.

Алгоритм работы представлен на рис. 25.

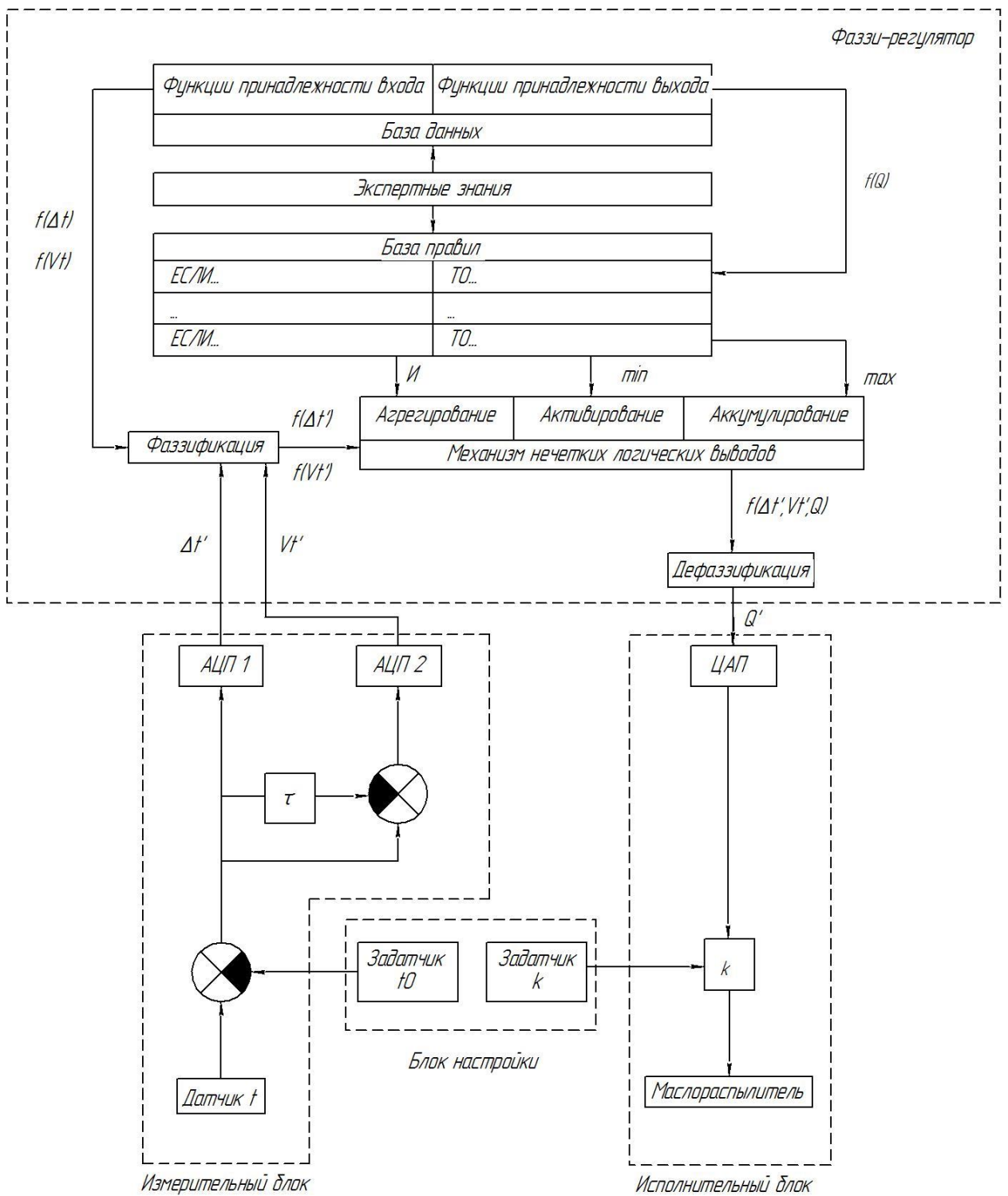


Рис. 24. «Интеллектуальная» система термостабилизации шпиндельного узла с управлением по отклонению

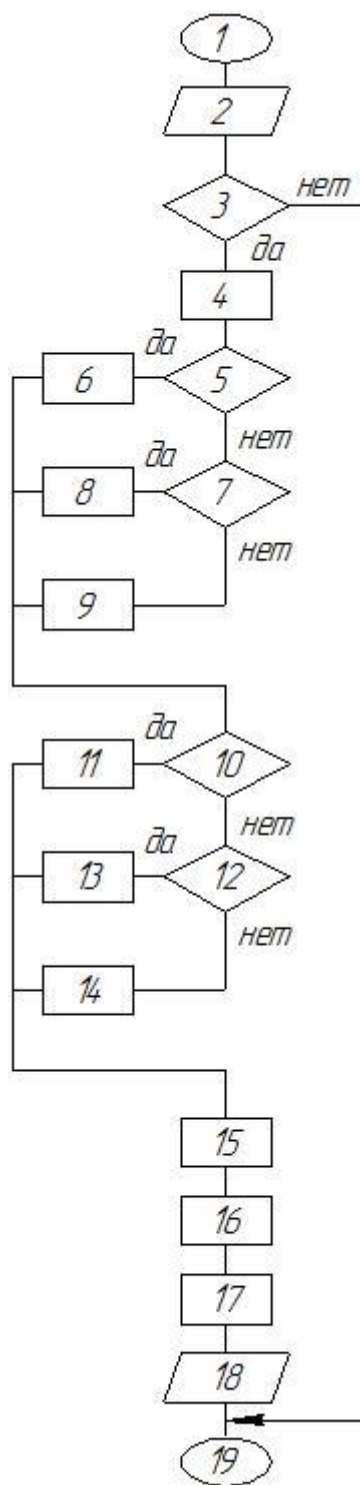


Рис. 25. Алгоритм работы фаззи-регулятора

1 – начало;

2 – ввод отклонения температуры $\Delta t'$ от номинального значения t_0 и скорости изменения температуры V_t' ;

3 – проверка принадлежности значений $\Delta t'$ и V_t' допустимым диапазонам

($\Delta t' \in [0; 50]$; $V_t' \in [0,1; 2,5]$);

4 – фаззификация входных переменных;

5, 7 – проверка принадлежности $\Delta t'$ интервалам $[0; 25]$, $[12,5; 37,5]$, $[25; 50]$;

6, 8, 9 – присвоение функции принадлежности $f(\Delta t)$ значения $f(\Delta t')$, соответствующего интервалу;

10, 12 – проверка принадлежности V_t' интервалам $[0,1; 1,3]$, $[0,7; 1,9]$, $[1,3; 2,5]$;

11, 13, 14 – присвоение функции принадлежности $f(V_t)$ значения $f(V_t')$, соответствующего интервалу;

15 – активирование по условию минимума функций принадлежности $f(\Delta t', V_t', Q)$ с помощью формул типа

$$f_{VS}(\Delta t', V_t', Q) = \min\{f_S(\Delta t'); f_S(V_t')\},$$

$$f_S(\Delta t', V_t', Q) = \min\{f_M(\Delta t'); f_S(V_t')\},$$

$$f_S(\Delta t', V_t', Q) = \min\{f_S(\Delta t'); f_M(V_t')\},$$

$$f_M(\Delta t', V_t', Q) = \min\{f_B(\Delta t'); f_S(V_t')\},$$

.....;

16 – аккумуляция по правилу максимума функций принадлежности $f(\Delta t', V_t', Q)$ по формуле

$$f_i(Q) = f_i(\Delta t', V_t', Q) = \max\{f_i(\Delta t', V_t', Q)_1; f_i(\Delta t', V_t', Q)_2; \dots\};$$

17 – дефазификация выходной переменной производительности маслораспылителя Q' по формуле

$$Q' = \frac{\int_{\leftarrow}^{\rightarrow} u f_Q(u) du}{\int_{\leftarrow}^{\rightarrow} f_Q(u) du};$$

18 – вывод значения Q' ;

19 – конец.

4.3 Описание устройства и работы системы и пример ее функционирования

Система предназначена для формирования сигнала управления маслораспылителем, установленным вблизи опор шпинделя. Она работает на основе изменения температуры передней опоры шпинделя и скорости ее изменения. Входные данные должны вводиться в систему через АЦП, выходной сигнал должен выводиться через ЦАП (эти устройства должны при практической реализации системы дополнять ее).

Система рассчитана на возможное превышение температуры над некоторым допустимым значением не более, чем на 50 град. и на скорость изменения температуры не более, чем на 2,5 град/мин.

Выходной сигнал системы имеет смысл сигнала задания производительности маслораспылителя и выражен в условных единицах в пределах от 100 до 10000.

Ввод и вывод информации при эксплуатации системы должен осуществляться дискретно, с интервалом времени $\tau > \max\{\tau_1, \tau_2\}$, где τ_1, τ_2 – продолжительности циклов преобразования АЦП и ЦАП.

Рассмотрим пример функционирования системы.

Значение отклонения температуры Δt определяется датчиком температуры, сигнал с которого после аналого-цифрового преобразователя поступает в микропроцессорную систему управления в виде целого числа (от 0 до 50). Для перехода к нечетким переменным по отклонению температуры примем стандартную форму функций принадлежности трех термов: малое (S), среднее (M), большое (B).

Чтобы более качественно управлять процессом, вычисляется также скорость изменения температуры V_t , которая может принимать значения от 0,1 до 2,5. Для перехода к нечетким переменным скорости изменения температуры примем стандартную форму функций принадлежности трех термов: малая (S), средняя (M), большая (B).

Для регулирования производительности маслораспылителя используем сигнал Q , который поступает с выхода цифроаналогового преобразователя микропроцессорной системы управления. В лингвистических переменных нечеткой логики управление изменением производительности может быть представлено пятью термами: очень маленькая (VS), маленькая (S), средняя (M), большая (B), очень большая (VB).

В качестве метода дефаззификации примем метод центра тяжести. Рассмотрим, как определяется управление в некоторой точке системы.

Допустим имеет место отклонение температуры, равное 30, оно продолжает увеличиваться со скоростью 1,5. Для ввода входных параметров в программу необходимо войти во вкладку “View” и выбрать “Rules”. После чего появится окно с наглядным отображением входных переменных и выходного параметра. (рис. 26)

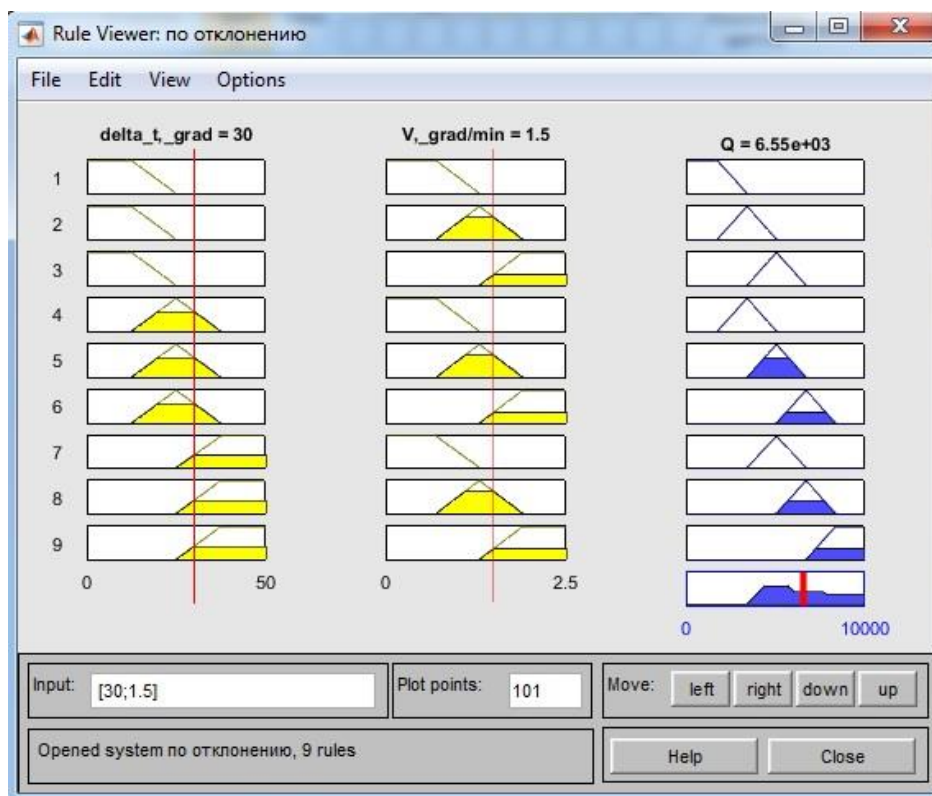


Рис. 26. Графическое представление расчета производительности маслораспылителя в *MATLAB*

Для задания входных данных достаточно заполнить графу “Input” в диалоговом окне. После чего в программе произойдет непосредственно сам расчет выходного параметра производительности маслораспылителя для шпиндельного узла. Для каждого входного параметра определяются степени принадлежности входного значения к тому или иному терму.

Искомое значение производительности маслораспылителя получено при дефаззификации методом “центр тяжести” по формуле:

$$Q' = \frac{\int_u^{\vec{u}} u f_Q(u) du}{\int_u^{\vec{u}} f_Q(u) du}, \text{ где}$$

u - элемент множества, $u \in U$ (U - некоторое нечеткое множество) ;

$f_Q(u)$ - степень принадлежности элемента множества u .

Пакет *MATLAB FuzzyLogicToolbox* вычисляет искомое значение автоматически по требуемому методу дефаззификации. В нашем случае полученное значение производительности маслораспылителя Q равно 6550 усл. ед.

Поверхность отклика зависимости производительности маслораспылителя от входных параметров изображена на рис. 27.

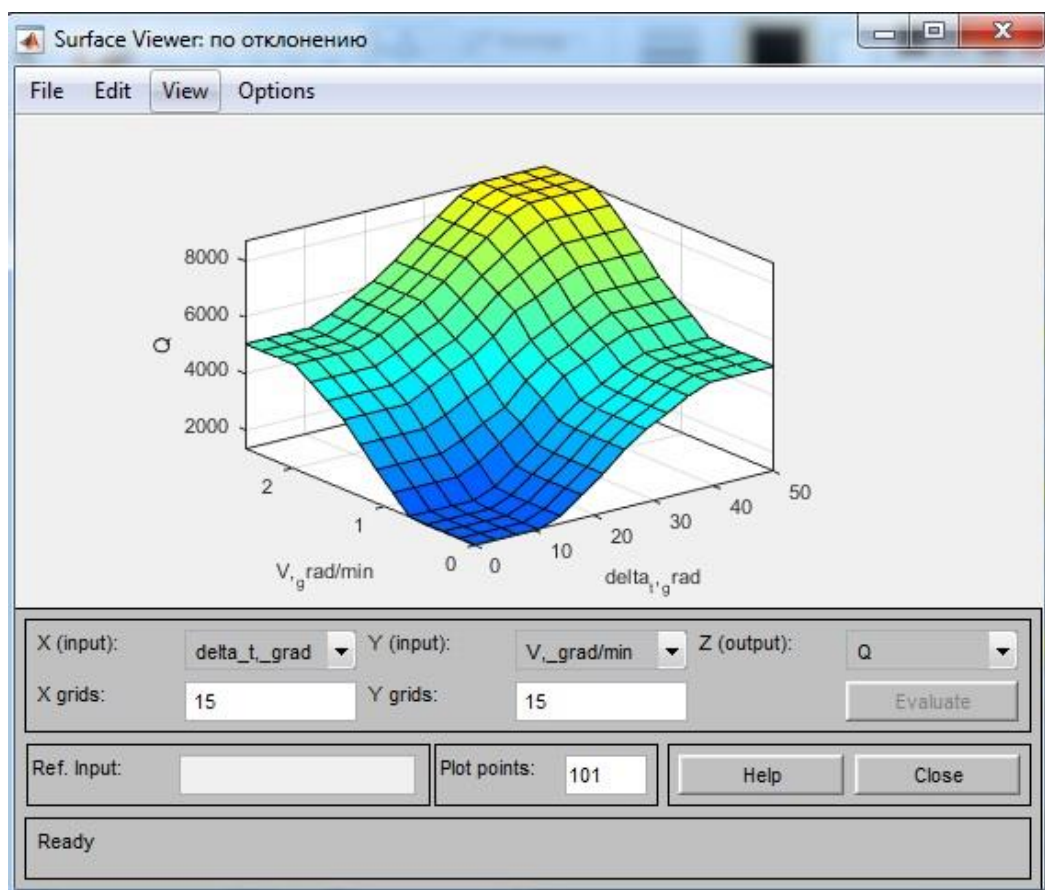


Рис. 27. Поверхность отклика зависимости производительности маслораспылителя от входных параметров

По отображаемым поверхностям отклика можно наблюдать за процессом охлаждения шпиндельного узла в ходе работы станка, это дает возможность иметь наглядное представление о процессе охлаждения подшипников. При недостаточной точности размеров выпускаемой продукции на станке, также можно с помощью поверхностей отклика спрогнозировать ту или иную ситуацию с конкретными величинами входных параметров и легко и быстро переналадить программу, корректируя базу правил и граничных значений лингвистических переменных для данной системы, в свою очередь изменяя координаты точек как показано выше.

4.4 Конструктивная проработка высокоскоростного шпиндельного узла с применением «интеллектуальной» системы термостабилизации с управлением по отклонению

Шпиндельная группа, встроенная в электродвигатель (электрошпиндель), применяется в быстроходных шпиндельных фрезерных и сверлильных головках в портальных раскройно-фрезерных станках (рис. 25), например в фрезерном станке модели РФП – 4 [12].

Ее основные технические параметры следующие: электродвигатель – асинхронный, питается током высокой частоты мощностью 7,5 кВт; частота вращения ротора 18000 и 9000 мин⁻¹.

Вал 7 с насаженным на него ротором вращается на радиально-упорных подшипниках 6 и 8. Передние подшипники 6 закреплены жестко гайкой 1, упорными крышками 2 и винтами 3, 4, 5, а задние установлены в корпус 9 с зазором 0,006-0,008 мм на диаметр и закреплены гайкой 10. Корпус 9 соединен с крышками 15 и 14 болтами 13. Предварительный осевой натяг в подшипниках осуществляется благодаря комплекту пружин 11.

Смазываются подшипниковые опоры масляным туманом, который подают по штуцеру 12. Для создания масляного тумана применяют

велоситовое масло. Подготовка масляного тумана выполняется по схеме, показанной на рис. 26.

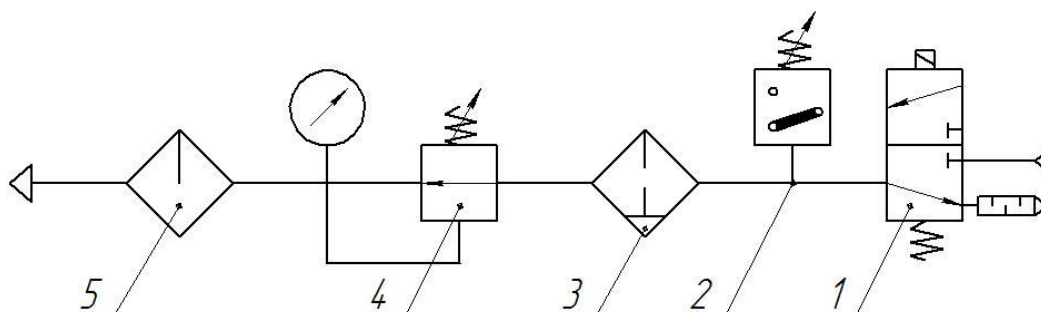


Рис. 28. Схема смазывания масляным туманом

Воздух подается из сети через электропневматический клапан 1 (типа 3В66-52), реле давления 2 и очищается от воды во влагоотделителе 3 (типа В41-13), далее давление воздуха снижается до 0,18 – 0,2 Мпа регулятором давления 4 (типа БВ-57-13) и поступает в маслораспределитель 5 (типа В44-23), который подает 80-100 капель в 1 мин. В маслораспределителе происходит насыщение воздуха парами масла, который затем подается по трубопроводу к штуцеру в корпусе электрошпинделя.

Включение установки подачи масляного тумана осуществляется электропневматическими клапанами одновременно с включением электрошпинделя посредством пусковой кнопки, расположенной на пульте управления. В случае прекращения подачи сжатого воздуха, реле давления В-62-12 отключает установку масляного тумана и шпинделя. Масляный туман через штуцер 12 подается в камеру под крышкой 14 и поступает в подшипники 8, а затем через отверстие в валу 7 – в зону подшипников 6. Отработанное масло выходит через отверстие в корпусе 9 и крышке 14, а также через лабиринты гайки 1 и крышки 2.

Статор охлаждается антикоррозионной жидкостью, которая поступает в полость корпуса 9 из насосной станции. Охлаждающая жидкость, пройдя по кольцевому каналу, сливается в бак насосной станции. Рабочий конец вала

имеет цилиндрическое отверстие для крепления оправки с режущим инструментом.

Для измерения температуры передней опоры шпинделя используем термопреобразователь сопротивления 16 (типа ТСП-1388) (рис. 27, а). Пределы измерения температуры $-50 \dots +120^{\circ}\text{C}$. Термопреобразователь виброустойчивый, вибропрочный, выдерживает $10\dots 60$ Гц с амплитудой смещения $0,20$ мм.

Материал защитной арматуры – Л96 или Л93 (рис. 27, а, б); медь М1 (рис. 27, в, г). Схематическое изображение электрических соединений – 3 по ГОСТ 6651-84. Крепление – накидная гайка $M10\times 1$ (рис. 27, а); накидная

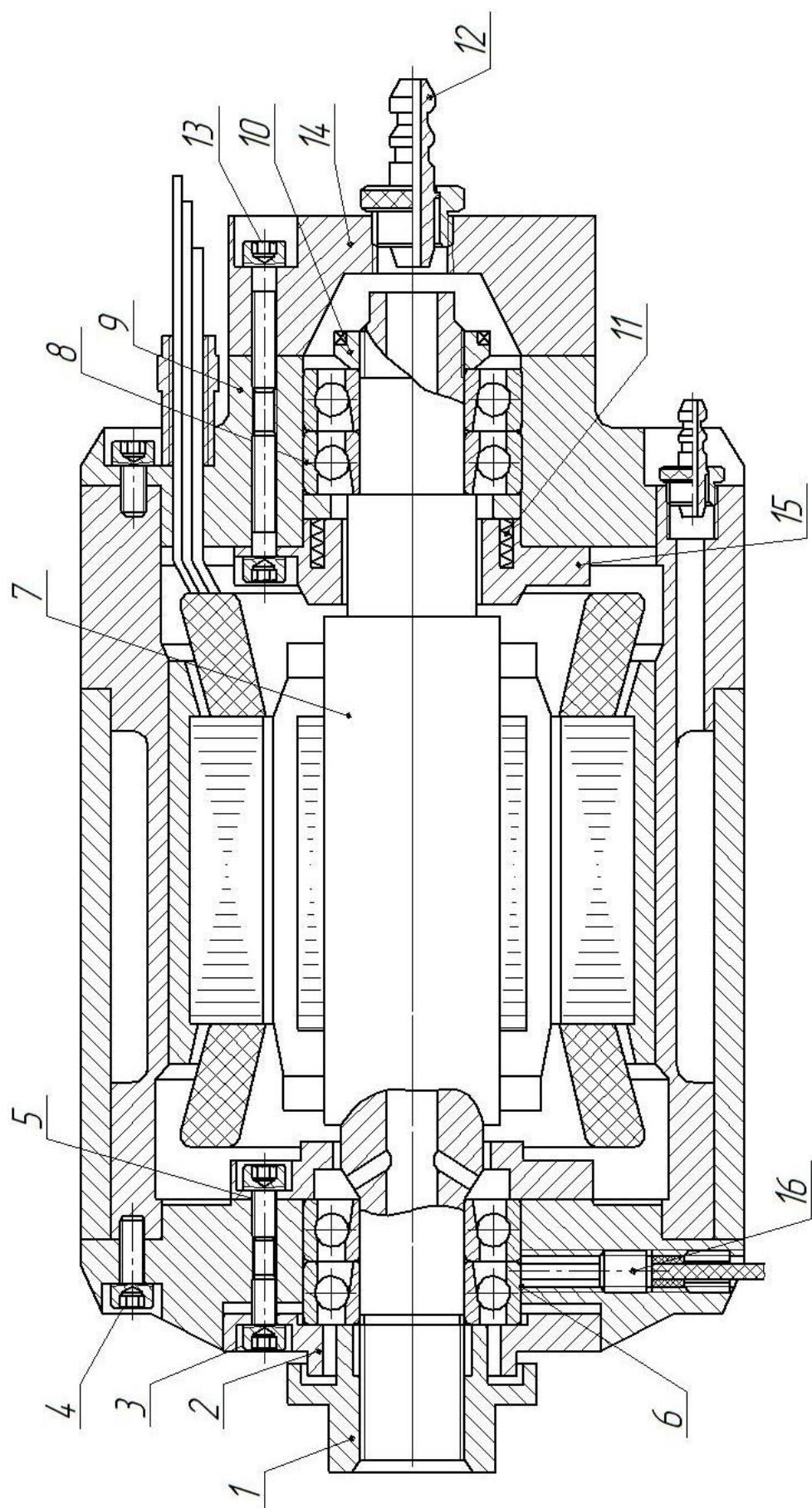


Рис. 29. Шпиндельная группа, встроенная в электродвигатель

гайка М12×1,5 (рис. 27, б); штуцер М20×1,5 (рис. 27, в, г). Остальные технические данные представлены в табл. 3.

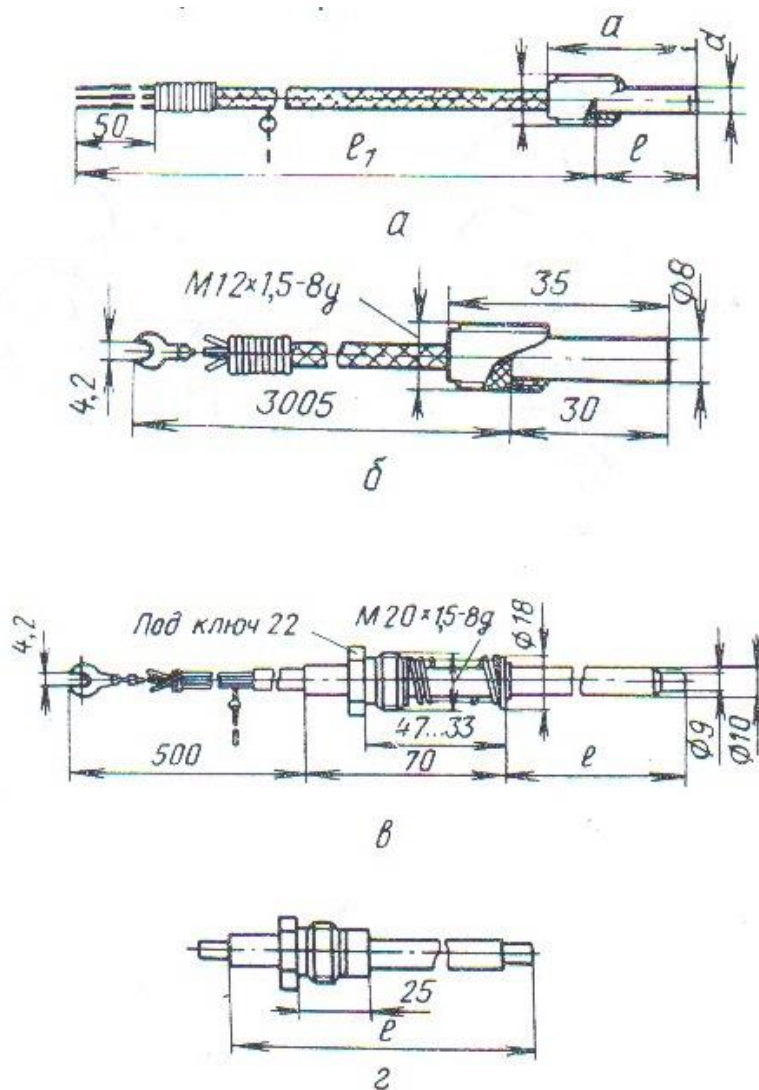


Рис. 30. Термопреобразователь сопротивления типа ТСП-1388

Для нашего случая, исходя из конструктивных особенностей шпиндельного узла, выбираем термопреобразователь сопротивления типа ТСП-1388 М10×1.

Технические данные термопреобразователя сопротивления типа ТСП-1388

Длина, мм		Класс допуска	НСХ преобразования	Позиция рисунка
l	l_1			
20	120	В	50П	27, а
20	500			
20	630			
20	800			
20	1000			
20	1600			
20	1600	В	100П	27, а
30	4970	С	100П	27, б
30	470	С	50П	27, б
30	970			
30	1470			
30	1970			
30	4970			
60	500	С	50П	27, в
80	500			
100	500			
120	500			
160	500			
200	500			
250	500			
320	500			
100	500	С	50П	27, г
120	500			
160	500			
200	500			
250	500			
320	500			
400	500			

ГЛАВА 6. РАЗРАБОТКА «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ» СИСТЕМЫ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА С КОМБИНИРОВАННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

6.1 Достоинства комбинированного управления по сравнению с управлением по отклонению и целесообразность разработки системы с комбинированным управлением

В управлении по отклонению мы с помощью датчика температуры измеряем отклонение температуры Δt от среднего заданного значения и с помощью элемента задержки τ вычисляем скорость изменения температуры V_t ; таким образом, мы рассчитываем производительность маслораспылителя в зависимости только от нагрева передней опоры шпинделя. В свою очередь скорость изменения температуры V_t зависит от частоты вращения шпинделя n и от радиальной нагрузки P . При комбинированном управлении мы с помощью тензорезистора измеряем отклонение температуры Δt , датчиком скорости измеряем скорость вращения шпинделя n и датчиком нагрузки измеряем радиальную нагрузку на шпиндель P . Следовательно, комбинированное управление обеспечивает нам более точное управление производительностью маслораспылителя, что является экономически более выгодным, чем управление по отклонению.

6.2 Формирование принципа построения системы и базы правил

По аналогии с предыдущей главой, главным звеном данной системы управления, является фаззи-регулятор, действие которого основано на знаниях экспертов, способных сформулировать базу правил в форме

IF (предпосылка), THEN (вывод).

С учетом этих знаний строится база данных с функциями принадлежности для предпосылок (входных переменных) и выводов

(выходной переменной) [10]. В данном случае функциями принадлежности для предпосылок могут быть $f(\Delta t)$, $f(n)$ и $f(P)$, а для выводов $f(Q)$, где Δt – отклонение температуры, n – частота вращения шпинделя, P – нагрузка, Q – производительность маслораспылителя.

Функция принадлежности в данном случае выглядит следующим образом:

$$f(x, a, b) = |x - a|/b,$$

где x – переменная; a и b – параметры.

Для конкретизации параметров кривой применительно к лингвистическим переменным Δt , n , P , Q и их интервалам, обозначенным термами, вначале составляются эвристические постулаты:

1. Если отклонение температуры маленькое (S), частота вращения шпинделя маленькая (S) и нагрузка маленькая (S), то производительность маслораспылителя должна быть очень маленькой (VS);
2. Если отклонение температуры маленькое (S), частота вращения шпинделя маленькая (S) и нагрузка средняя (M), то производительность маслораспылителя должна быть очень маленькой (VS);
3. Если отклонение температуры маленькое (S), частота вращения шпинделя маленькая (S) и нагрузка большая (B), то производительность маслораспылителя должна быть маленькой (S);
4. Если отклонение температуры среднее (M), частота вращения шпинделя маленькая (S) и нагрузка маленькая (S), то производительность маслораспылителя должна быть маленькой (S);
5. Если отклонение температуры среднее (M), частота вращения шпинделя маленькая (S) и нагрузка средняя (M), то производительность маслораспылителя должна быть маленькой (S);

6. Если отклонение температуры среднее (M), частота вращения шпинделя маленькая (S) и нагрузка большая (B), то производительность маслораспылителя должна быть средней (M);
7. Если отклонение температуры большое (B), частота вращения шпинделя маленькая (S) и нагрузка маленькая (S), то производительность маслораспылителя должна быть средней (M);
8. Если отклонение температуры большое (B), частота вращения шпинделя маленькая (S) и нагрузка средняя (M), то производительность маслораспылителя должна быть средней (M);
9. Если отклонение температуры большое (B), частота вращения шпинделя маленькая (S) и нагрузка большая (B), то производительность маслораспылителя должна быть большой (B);
10. Если отклонение температуры маленькое (S), частота вращения шпинделя средняя (M) и нагрузка маленькая (S), то производительность маслораспылителя должна быть маленькой (S);
11. Если отклонение температуры маленькое (S), частота вращения шпинделя средняя (M) и нагрузка средняя (M), то производительность маслораспылителя должна быть маленькой (S);
12. Если отклонение температуры маленькое (S), частота вращения шпинделя средняя (M) и нагрузка большая (B), то производительность маслораспылителя должна быть средней (M);
13. Если отклонение температуры среднее (M), частота вращения шпинделя средняя (M) и нагрузка маленькая (S), то производительность маслораспылителя должна быть средней (M);
14. Если отклонение температуры среднее (M), частота вращения шпинделя средняя (M) и нагрузка средняя (M), то производительность маслораспылителя должна быть средней (M);
15. Если отклонение температуры среднее (M), частота вращения шпинделя средняя (M) и нагрузка большая (B), то производительность маслораспылителя должна быть большой (B);

16. Если отклонение температуры большое (B), частота вращения шпинделя средняя (M) и нагрузка маленькая (S), то производительность маслораспылителя должна быть большой (B);
17. Если отклонение температуры большое (B), частота вращения шпинделя средняя (M) и нагрузка средняя (M), то производительность маслораспылителя должна быть большой (B);
18. Если отклонение температуры большое (B), частота вращения шпинделя средняя (M) и нагрузка большая (B), то производительность маслораспылителя должна быть очень большой (VB);
19. Если отклонение температуры маленькое (S), частота вращения шпинделя большая (B) и нагрузка маленькая (S), то производительность маслораспылителя должна быть маленькой (S);
20. Если отклонение температуры маленькое (S), частота вращения шпинделя большая (B) и нагрузка средняя (M), то производительность маслораспылителя должна быть средней (M);
21. Если отклонение температуры маленькое (S), частота вращения шпинделя большая (B) и нагрузка большая (B), то производительность маслораспылителя должна быть средней (M);
22. Если отклонение температуры среднее (M), частота вращения шпинделя большая (B) и нагрузка маленькая (S), то производительность маслораспылителя должна быть средней (M);
23. Если отклонение температуры среднее (M), частота вращения шпинделя большая (B) и нагрузка средняя (M), то производительность маслораспылителя должна быть большой (B);
24. Если отклонение температуры среднее (M), частота вращения шпинделя большая (B) и нагрузка большая (B), то производительность маслораспылителя должна быть большой (B);
25. Если отклонение температуры большое (B), частота вращения шпинделя большая (B) и нагрузка маленькая (S), то производительность маслораспылителя должна быть большой (B);

26.Если отклонение температуры большое (B), частота вращения шпинделя большая (B) и нагрузка средняя (M), то производительность маслораспылителя должна быть очень большой (VB);

27.Если отклонение температуры большое (B), частота вращения шпинделя большая (B) и нагрузка большая (B), то производительность маслораспылителя должна быть очень большой (VB).

Максимальное значение всякой функции принадлежности, по определению, равно 1. Правомерно полагать, что значения функций, соответствующих двум соседним термам, в точке их пересечения равны 0,5 (табл. 4). Учитывая это, были получены интерпретации функции принадлежности треугольного типа для трех термов лингвистической переменной Δt , трех термов лингвистической переменной n , трех термов лингвистической переменной P и пяти термов лингвистической переменной Q (рис. 28).

Таблица 4

Интерпретации функции принадлежности

Лингвистическая переменная	Обозначение терма	Интервал, соответствующий терму	Функция принадлежности, соответствующая терму
Δt	S	$[0; 12,5]$	$f_1(\Delta t) = 1$
		$[12,5; 25]$	$f_1(\Delta t) = (25 - \Delta t)/12,5$
	M	$[12,5; 25]$	$f_2(\Delta t) = (\Delta t - 12,5)/12,5$
		$[25; 37,5]$	$f_2(\Delta t) = (37,5 - \Delta t)/12,5$
	B	$[25; 37,5]$	$f_3(\Delta t) = (\Delta t - 25)/12,5$
		$[37,5; 50]$	$f_3(\Delta t) = 1$
n	S	$[1000; 5750]$	$f_1(n) = 1$
		$[5750; 10500]$	$f_1(n) = (10500 - n)/4750$

	M	[5750; 10500]	$f_2(n) = (n - 5750)/4750$
		[10500; 16250]	$f_2(n) = (16250 - n)/4750$
	B	[10500; 16250]	$f_3(n) = (n - 10500)/4750$
		[16250; 20000]	$f_3(n) = 1$
P	S	[200; 1775]	$f_1(P) = 1$
		[1755; 3350]	$f_1(P) = (3350 - P)/1575$
	M	[1775; 3350]	$f_2(P) = (P - 1775)/1575$
		[3350; 4925]	$f_2(P) = (4925 - P)/1575$
	B	[3350; 4925]	$f_1(P) = (P - 3350)/1575$
		[4925; 6500]	$f_1(P) = 1$
Q	VS	[100; 1750]	$f_1(Q) = 1$
		[1750; 3400]	$f_1(Q) = (3400 - Q)/1650$
	S	[1750; 3400]	$f_2(Q) = (Q - 1750)/1650$
		[3400; 5050]	$f_2(Q) = (5050 - Q)/1650$
	M	[3400; 5050]	$f_3(Q) = (Q - 3400)/1650$
		[5050; 6700]	$f_3(Q) = (6700 - Q)/1650$
	B	[5050; 6700]	$f_4(Q) = (Q - 5050)/1650$
		[6700; 8350]	$f_4(Q) = (8350 - Q)/1650$
	VB	[6700; 8350]	$f_5(Q) = (Q - 6700)/1650$
		[8350; 10000]	$f_5(Q) = 1$

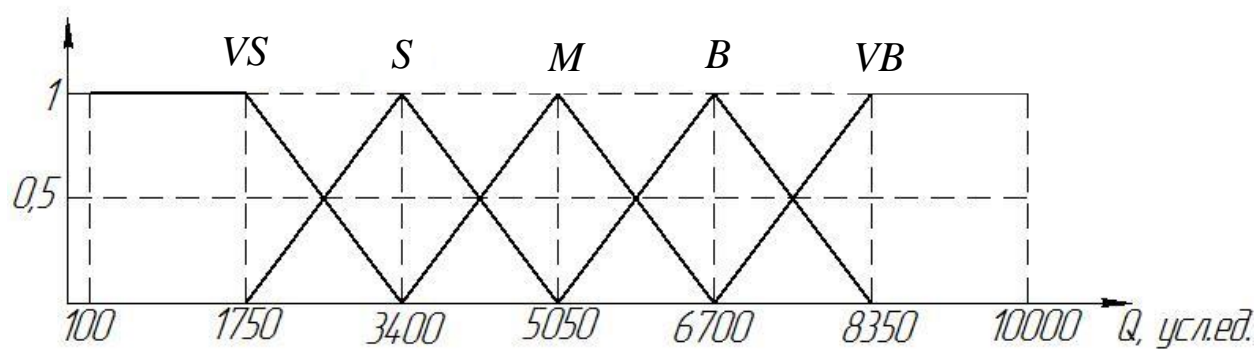
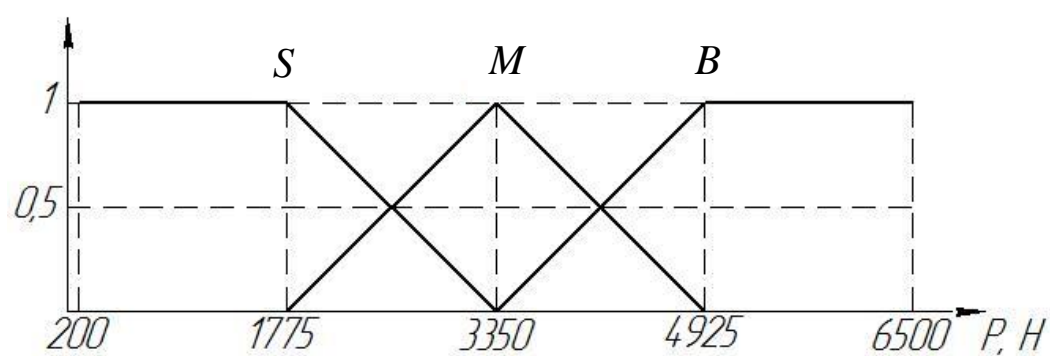
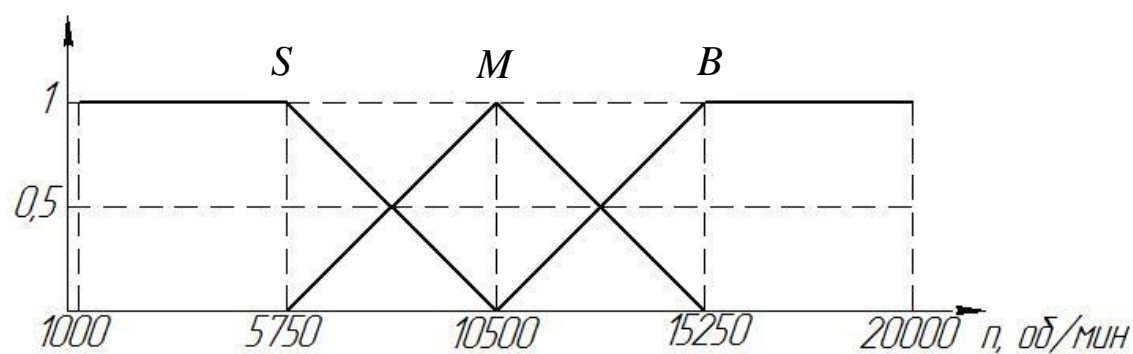
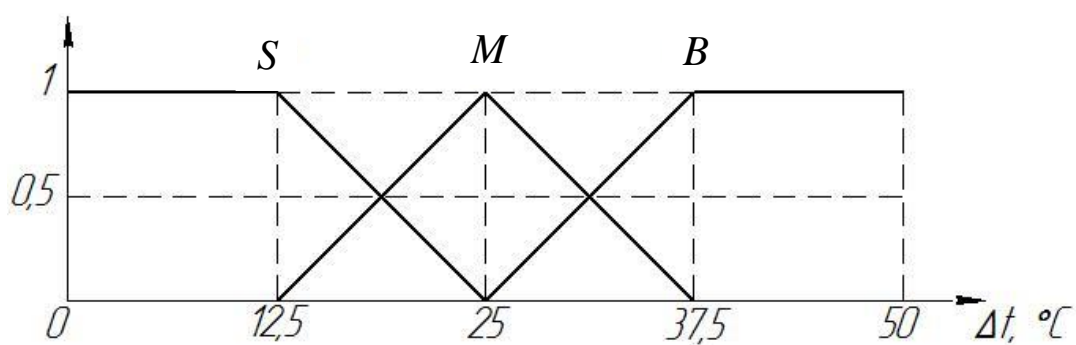


Рис. 31. Графики функций принадлежности

Внесём в программу *MATLAB* графики функций принадлежности посредством заполнения координат точек вершин термов (рис.32, 33).

Термы были заданы следующим образом: “*VS*” соответствует значению “Очень маленькая”; “*S*” соответствует значению “маленькая”; “*M*” соответствует значению “средняя”; “*B*” соответствует значению “большая”; “*VB*” соответствует значению “очень большая”.

Это позволило организовать сформулированные правила в виде матрицы (табл. 5).

Таблица 5

n	n(<i>S</i>)			n(<i>M</i>)			n(<i>B</i>)		
P	P(<i>S</i>)	P(<i>M</i>)	P(<i>B</i>)	P(<i>S</i>)	P(<i>M</i>)	P(<i>B</i>)	P(<i>S</i>)	P(<i>M</i>)	P(<i>B</i>)
$\Delta t(M)$	<i>VS</i>	<i>VS</i>	<i>S</i>	<i>S</i>	<i>S</i>	<i>M</i>	<i>S</i>	<i>M</i>	<i>M</i>
$\Delta t(C)$	<i>S</i>	<i>S</i>	<i>M</i>	<i>M</i>	<i>M</i>	<i>B</i>	<i>M</i>	<i>B</i>	<i>B</i>
$\Delta t(B)$	<i>M</i>	<i>M</i>	<i>VB</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>VB</i>	<i>B</i>	<i>VB</i>	<i>VB</i>

Матрица правил

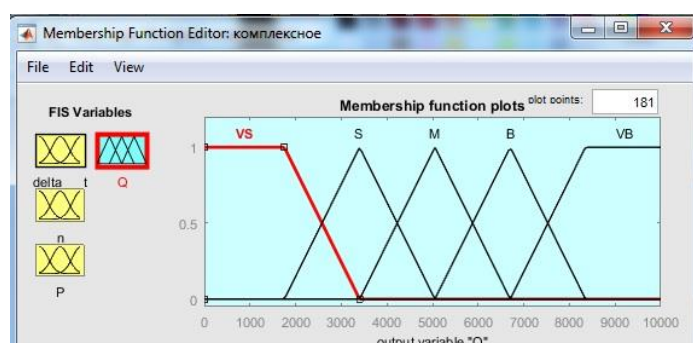
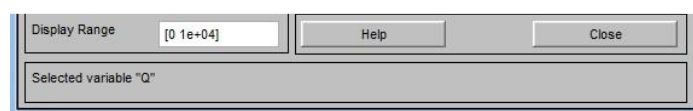


Рис. 32. График функций принадлежности для выходной лингвистической переменной *Q* в *MATLAB*



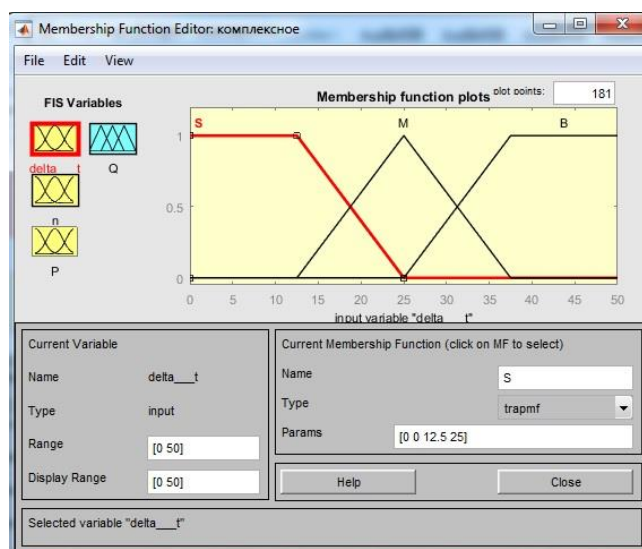
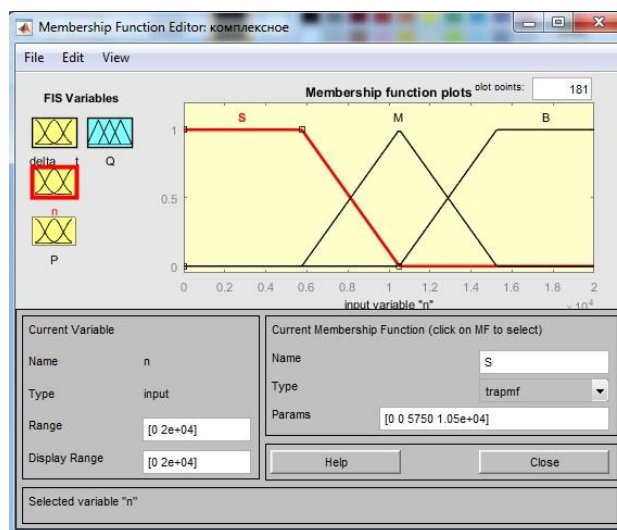
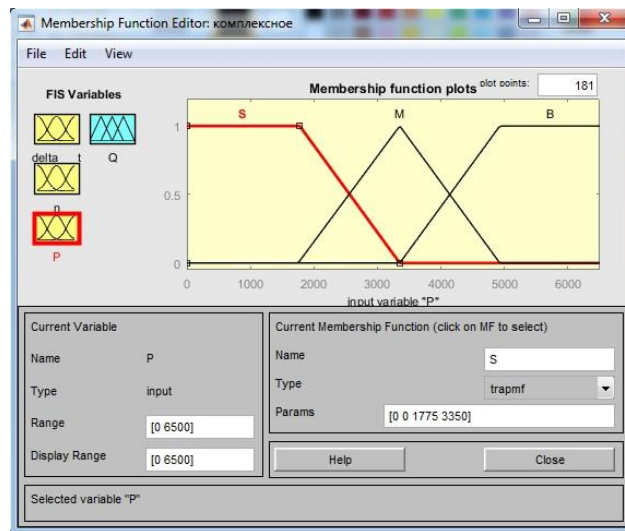


Рис. 33. Графики функций принадлежности для входных лингвистических переменных Δt , n и P в *MATLAB*

6.3 Разработка алгоритма функционирования системы и синтез фаззи-регулятора

С помощью этой матрицы нетрудно производить операцию фаззификации – установление соответствия между конкретным значением отдельной входной переменной и значением функции принадлежности соответствующего ей терма переменной [11]. Поскольку нечеткая логика предполагает возможность частичного наложения термов, в процессе фаззификации не исключено получение нескольких значений функции принадлежности, соответствующих одному значению лингвистической переменной. Для того чтобы остановиться на одном из полученных значений, после фаззификации обычно проводят агрегирование. Эта операция представляет собой процедуру определения степени истинности найденных значений функции принадлежности и установление связи между ними, описываемой чаще всего либо логическим «и», либо логическим «или». В данном случае указанная связь описана как «и».

После агрегирования фаззи-регулятор должен выполнять активирование – операцию, направленную на расширение агрегирования на все правила, описанные матрицей. Эта операция аналогична композиции нечетких отношений и в рассматриваемом случае была выполнена простейшим способом - по условию минимума. Это дало возможность далее достаточно легко (по правилу максимума) осуществить операцию аккумуляирования – процедуру отыскания значения функции принадлежности входного параметра.

Операции агрегирования, активирования и аккумуляирования в совокупности представляют собой механизм нечетких выводов, в результате которых переменной Δt присваивается значение $\Delta t'$, переменной n – значение входной переменной n' , переменной P – значение входной переменной P' , и обусловленные этим функции $f(\Delta t) = f(\Delta t')$, $f(n) = f(n')$ и $f(P) = f(P')$ дают вполне определенную функцию $f(\Delta t', n', P', Q)$. Если

теперь произвести операцию дефаззификации – отыскание по $f(\Delta t', n', P', Q)$ величины Q' (удобнее всего для этого применить метод центра тяжести), то нетрудно получить значение требуемой производительности маслораспылителя, отвечающее исходной базе знаний.

Построенный на основе описанных принципов фаззи-регулятор формирует выходной сигнал, задающий производительность маслораспределителя (рис. 34).

Функциональная схема предлагаемой системы управления включает датчик температуры, датчик частоты вращения шпинделя, датчик нагрузки, аналого-цифровые преобразователи, фаззи-регулятор, цифроаналоговый преобразователь и регулируемый маслораспылитель.

Алгоритм работы представлен на рис. 35.

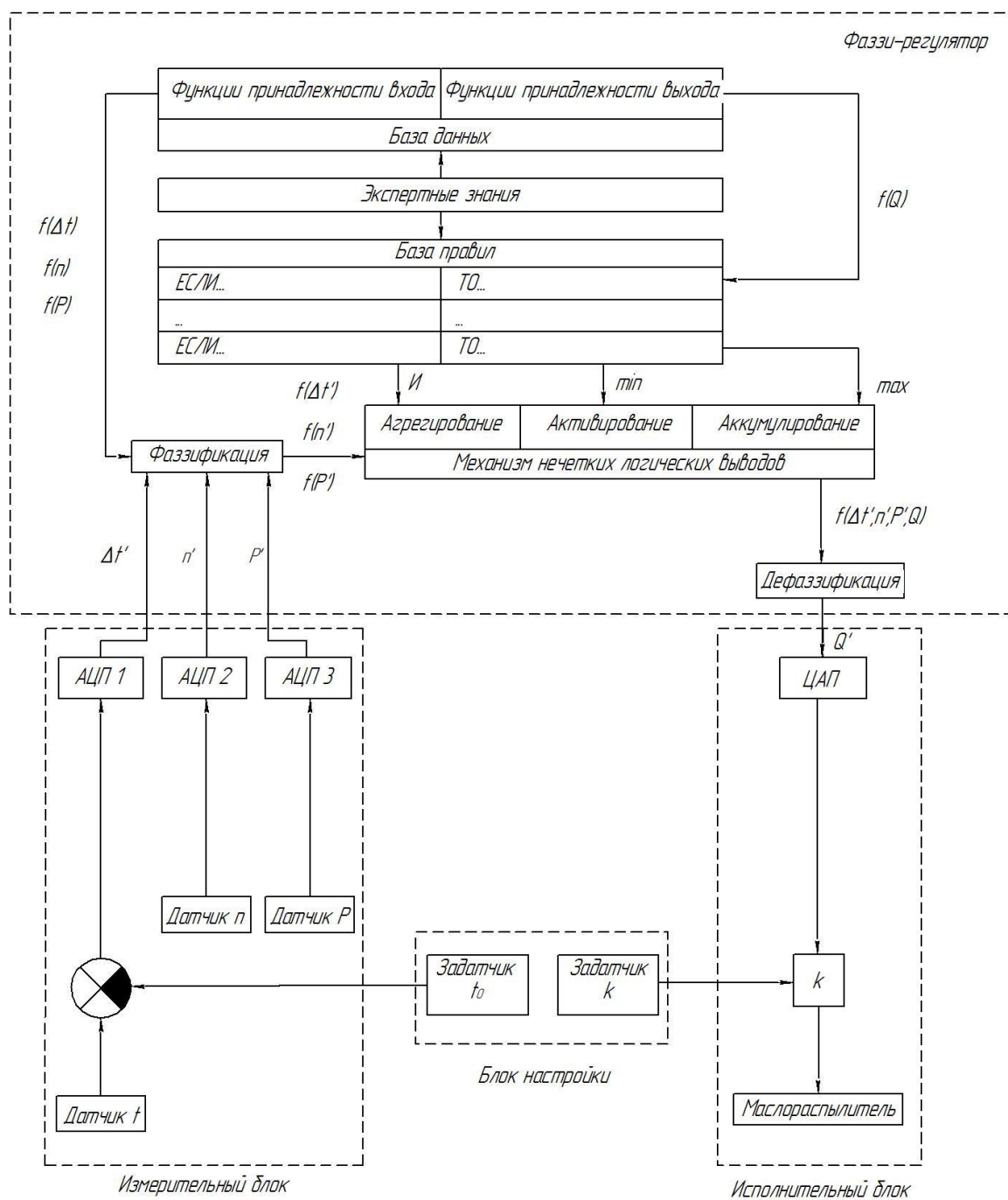


Рис. 34. «Интеллектуальная» система термостабилизации шпиндельного узла с комбинированным управлением

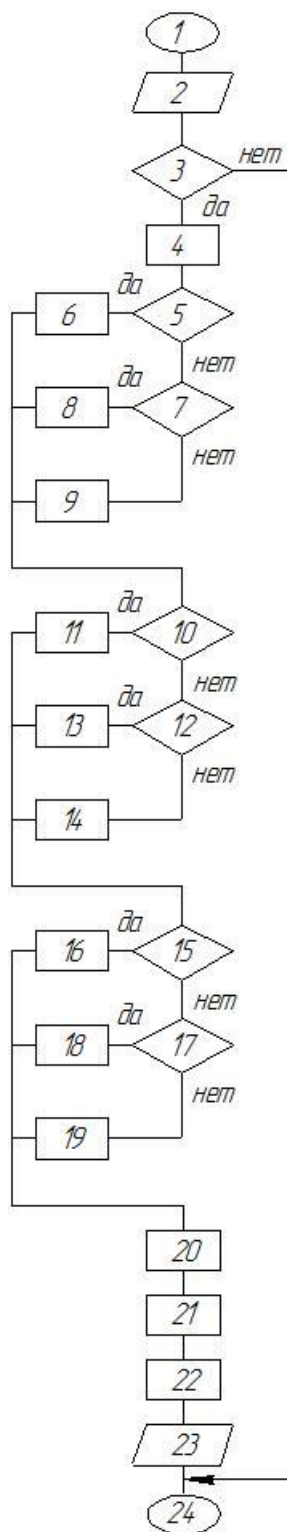


Рис. 35.
Алгоритм работы
фаззи-регулятора

1 – начало;

2 – ввод отклонения температуры $\Delta t'$ от
номинального значения t_0 , скорости вращения
шпинделя n и нагрузки на шпиндель P ;

3 – проверка принадлежности значений $\Delta t'$, n' и P'
допустимым диапазонам

$$(\Delta t' \in [0; 50], n' \in [1000; 20000],$$

$$P' \in [200; 6500]);$$

4 – фаззификация входных переменных;

5, 7 – проверка принадлежности $\Delta t'$ интервалам
[0; 25], [12,5; 37,5], [25; 50];

6, 8, 9 – присвоение функции принадлежности
 $f(\Delta t)$ значения $f(\Delta t')$, соответствующего
интервалу;

10, 12 – проверка принадлежности n интервалам
[1000; 10500], [5750; 16250], [10500; 20000];

11, 13, 14 – присвоение функции принадлежности
 $f(n)$ значения $f(n')$, соответствующего интервалу;

15, 17 – проверка принадлежности P интервалам
[200; 3350], [1775; 4925], [3350; 6500];

16, 18, 19 – присвоение функции принадлежности $f(P)$ значения
 $f(P')$, соответствующего интервалу;

20 – активирование по условию минимума функций принадлежности $f(\Delta t', n', P', Q)$ с помощью формул типа

$$f_{VS}(\Delta t', n', P', Q) = \min\{f_S(\Delta t'); f_S(n'); f_S(P')\},$$

$$f_S(\Delta t', n', P', Q) = \min\{f_M(\Delta t'); f_S(n'); f_S(P')\},$$

$$f_S(\Delta t', n', P', Q) = \min\{f_S(\Delta t'); f_S(n'); f_B(P')\},$$

$$f_M(\Delta t', n', P', Q) = \min\{f_B(\Delta t'); f_S(n'); f_S(P')\},$$

.....;

21 – аккумулярование по правилу максимума функций принадлежности $f(\Delta t', n', P', Q)$ по формуле

$$f_i(Q) = f_i(\Delta t', n', P', Q) = \max\{f_i(\Delta t', n', P', Q)_1; f_i(\Delta t', n', P', Q)_2; \dots\};$$

22 – дефаззификация выходной переменной производительности маслораспылителя Q' по формуле

$$Q' = \frac{\int_u^{\vec{u}} u f_Q(u) du}{\int_u^{\vec{u}} f_Q(u) du};$$

23– вывод значения Q' ;

24 – конец.

6.4 Описание устройства и работы системы и пример ее функционирования

Система предназначена для формирования сигнала управления маслораспылителем, установленным вблизи опор шпинделя. Она работает на основе измерения температуры передней опоры шпинделя, скорости вращения шпинделя и радиальной нагрузки на его переднюю опору. Входные данные должны вводиться в систему через АЦП, выходной сигнал должен выводиться через ЦАП (эти устройства должны при практической реализации системы дополнять ее).

Система рассчитана на возможное превышение температуры над некоторым допустимым значением не более, чем на 50 град., на скорость вращения шпинделя в пределах $1000 \ll n \ll 20000$ об/мин и нагрузку в пределах $200 \ll P \ll 6500$ Н.

Выходной сигнал системы имеет смысл сигнала задания производительности маслораспылителя и выражен в условных единицах в пределах от 100 до 10000.

Ввод и вывод информации при эксплуатации системы должен осуществляться дискретно, с интервалом времени $\tau > \max\{\tau_1, \tau_2\}$, где τ_1, τ_2 – продолжительности циклов преобразования АЦП и ЦАП.

Рассмотрим пример функционирования системы.

Значение отклонения температуры Δt определяется датчиком температуры, сигнал с которого после аналого-цифрового преобразователя поступает в микропроцессорную систему управления в виде целого числа (от 0 до 50). Для перехода к нечетким переменным по отклонению температуры примем стандартную форму функций принадлежности трех термов: малое (S), среднее (M), большое (B).

Скорость вращения шпинделя n определяется датчиком скорости, сигнал с которого после аналого-цифрового преобразователя поступает в микропроцессорную систему управления в виде целого числа (от 1000 до 20000). Для перехода к нечетким переменным вращения шпинделя примем стандартную форму функций принадлежности трех термов: маленькая (S), средняя (M), большая (B).

Радиальная нагрузка P определяется датчиком нагрузки, сигнал с которого также после аналого-цифрового преобразователя поступает в микропроцессорную систему управления в виде целого числа (от 200 до 6500). Для перехода к нечетким переменным нагрузки примем стандартную

форму функций принадлежности трех термов: маленькая (S), средняя (M), большая (B).

Для регулирования производительности маслораспределителя используем сигнал Q , который поступает с выхода цифроаналогового преобразователя микропроцессорной системы управления. В лингвистических переменных нечеткой логики управление изменением производительности может быть представлено пятью термами: очень маленькая (VS), маленькая (S), средняя (M), большая (B), очень большая (VB).

В качестве метода дефаззификации примем метод центра тяжести. Рассмотрим, как определяется управление в некоторой точке системы.

Допустим имеет место отклонение температуры, равное 30, скорость вращения шпинделя n , равная 12000 и нагрузка P , равная 3500. Для ввода входных параметров в программу необходимо войти во вкладку “View” и выбрать “Rules”. После чего появится окно с наглядным отображением входных переменных и выходного параметра. (рис. 36)

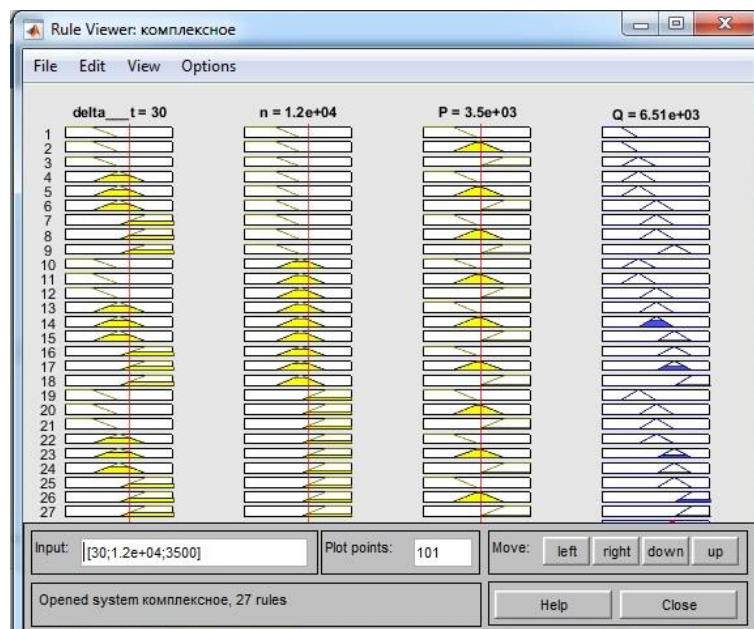


Рис. 36. Графическое представление расчета производительности маслораспылителя в *MATLAB*

Для задания входных данных достаточно заполнить графу “*Input*” в диалоговом окне. После чего в программе произойдет непосредственно сам расчет выходного параметра производительности маслораспылителя для шпиндельного узла. Для каждого входного параметра определяются степени принадлежности входного значения к тому или иному терму.

Искомое значение производительности маслораспылителя получено при дефаззификации методом “центр тяжести” по формуле:

$$Q' = \frac{\int_u^{\vec{u}} u f_Q(u) du}{\int_u^{\vec{u}} f_Q(u) du}, \text{ где}$$

u - элемент множества, $u \in U$ (U - некоторое нечеткое множество) ;

$f_Q(u)$ - степень принадлежности элемента множества u .

Пакет *MATLAB FuzzyLogicToolbox* вычисляет искомое значение автоматически по требуемому методу дефаззификации. В нашем случае полученное значение производительности маслораспылителя Q равно 6510 усл. ед.

Поверхности отклика зависимости производительности маслораспылителя от входных параметров изображены на рис. 37.

По отображаемым поверхностям отклика можно наблюдать за процессом охлаждения шпиндельного узла в ходе работы станка, это дает возможность иметь наглядное представление о процессе охлаждения подшипников. При недостаточной точности размеров выпускаемой продукции на станке, также можно спрогнозировать ту или иную ситуацию с конкретными величинами входных параметров и легко и быстро переналадить программу, корректируя базу правил и граничных значений лингвистических переменных для данной системы, в свою очередь изменяя координаты точек.

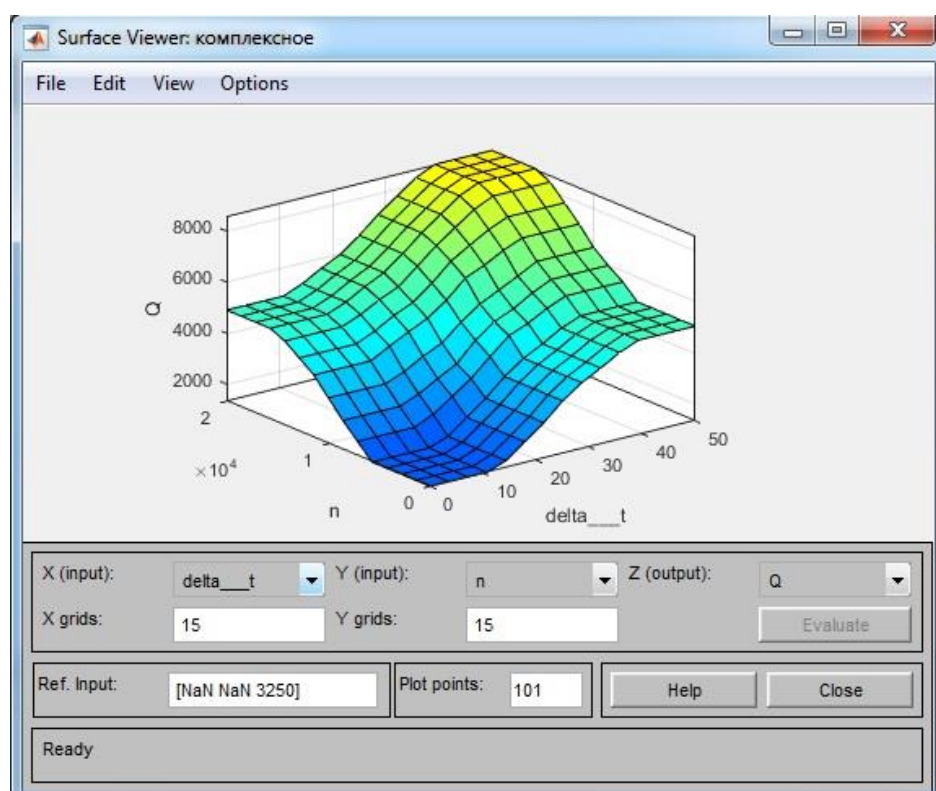
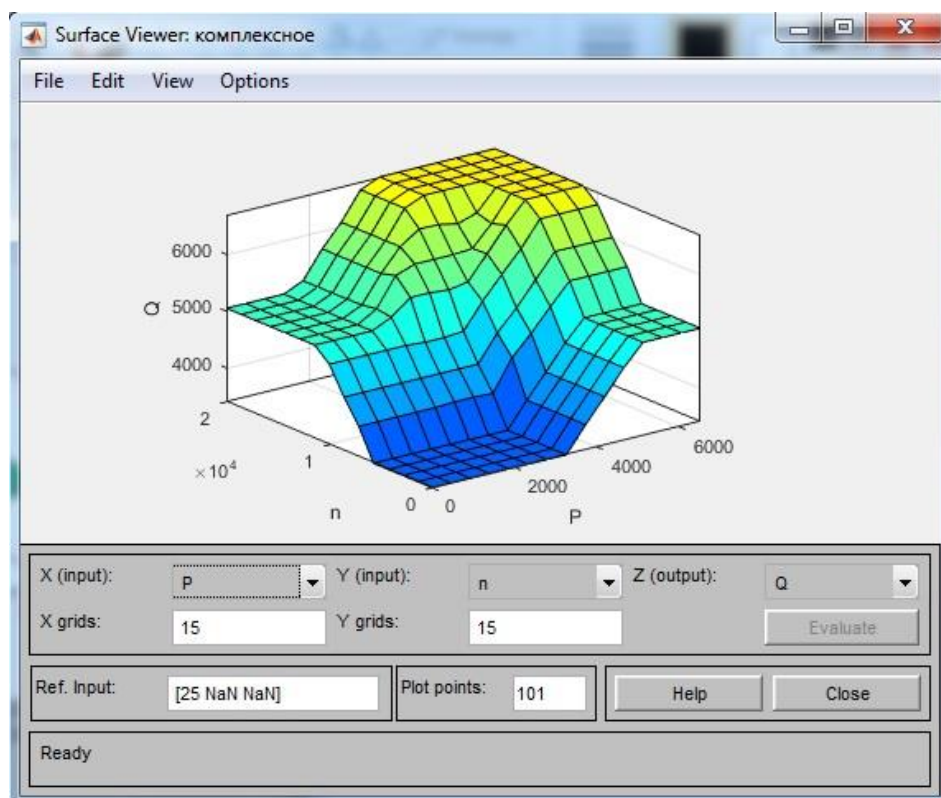


Рис. 37. Поверхности отклика зависимости производительности маслораспылителя от входных параметров

6.5 Конструктивная проработка высокоскоростного шпиндельного узла с применением «интеллектуальной» системы термостабилизации с комбинированным управлением

6.5.1 Электрошпиндель шлифовального станка

В данном варианте (рис. 33) вал шлифовального шпинделя является продолжением вала двигателя. Здесь конструктивно короткозамкнутый асинхронный двигатель и шлифовальный шпиндель объединены в одно устройство, называемое иногда электрошпинделем [13]. Скорости вращения этих двигателей 24000 – 48000 об/мин, а при малых диаметрах шлифовальных кругов доходят до 150000 – 200000 об/мин. Внутршлифовальный станок модели 3К228.

На статоре двигателя электрошпинделя, набранном из листовой электротехнической стали, расположена двухполюсная обмотка. При скоростях вращения до 48000 об/мин ротор выполняется также из листовой стали с короткозамкнутой обмоткой. Для скоростей, превышающих 48000 об/мин, в связи с увеличением потерь в стали статор снабжается рубашкой с охлаждением проточной водой. Ротор такого двигателя выполняется из массивного стального цилиндра.

Для измерения температуры передней опоры шпинделя используем термопреобразователь сопротивления 16 (типа ТСП-1388). Пределы измерения температуры $-50 \dots +120^{\circ}\text{C}$. Термопреобразователь виброустойчивый, вибропрочный, выдерживает 10...60 Гц с амплитудой

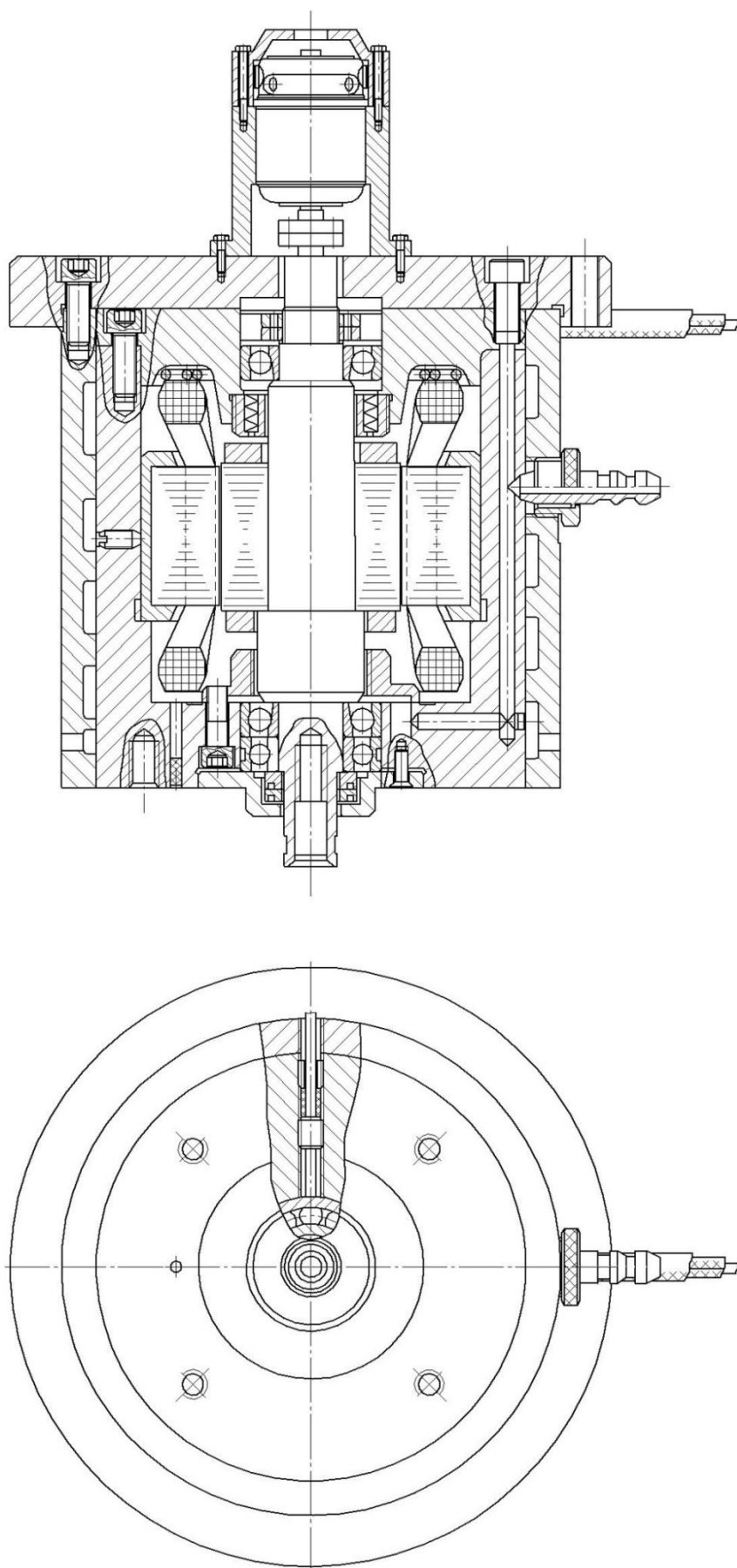


Рис. 33. Электршпиндель шлифовального станка

смещения 0,20 мм. Материал защитной арматуры – Л96 или Л93. Крепление – накидная гайка М10×1.

Для измерения осевой нагрузки мы устанавливаем тензоподшипник 2, в канавке которого находится тензометрический элемент [14].

Скорость вращения шпинделя измеряем с помощью тахогенератора 3 марки ТМГ-30, который соединен через соединительную муфту 5 со свободным концом шпиндельного вала.

Воздушно-масляный туман подаем внутрь электрошпинделя по специально проточенным каналам, к передней опоре, через штуцер 4. Схема смазывания масляным туманом аналогична представленной в предыдущей главе.

6.5.2 Шпиндельный узел с динамометром фрезерного станка

На рис. 34 показана конструкция фрезерной головки станка с шпиндельным узлом, реализованным на фрезерном станке модели ФП-27 [15]. В корпусе 8 установлен с натягом упругий стакан 7, передняя часть которого выполнена с зазором, равным 1 мм; между стаканом и корпусом имеется демпфирующее резиновое кольцо 3. передней опорой шпинделя 4 служат радиальный и два упорных подшипника; в последних предварительный натяг создается кольцом 10, установленным между стаканом 9 и подшипником. Подшипники передней опоры зажимают с помощью упругой гайки 6 через кольцо 5, что уменьшает изгиб шпинделя и повышает точность его вращения.

На корпусе 8 установлен кронштейн 2 с датчиком 1. Датчик цилиндрический М18 марки Е2А, в корпусе из латуни, экранированный, измеряет осевую нагрузку, действующую на шпиндель.

Скорость вращения шпинделя измеряем индуктивным датчиком 12 М12 (типа Е2Е). Этот датчик имеет улучшенные технические характеристики и обладает высокой надежностью.

Для измерения температуры передней опоры шпинделя используем термопреобразователь сопротивления 16 (типа ТСП-1388). Пределы измерения температуры $-50 \dots +120^{\circ}\text{C}$. Термопреобразователь виброустойчивый, вибропрочный, выдерживает $10\dots 60$ Гц с амплитудой смещения $0,20$ мм. Материал защитной арматуры – Л96 или Л93. Крепление – накидная гайка М10×1.

Воздушно-масляный туман подаем внутрь к передним подшипникам через штуцер 13.

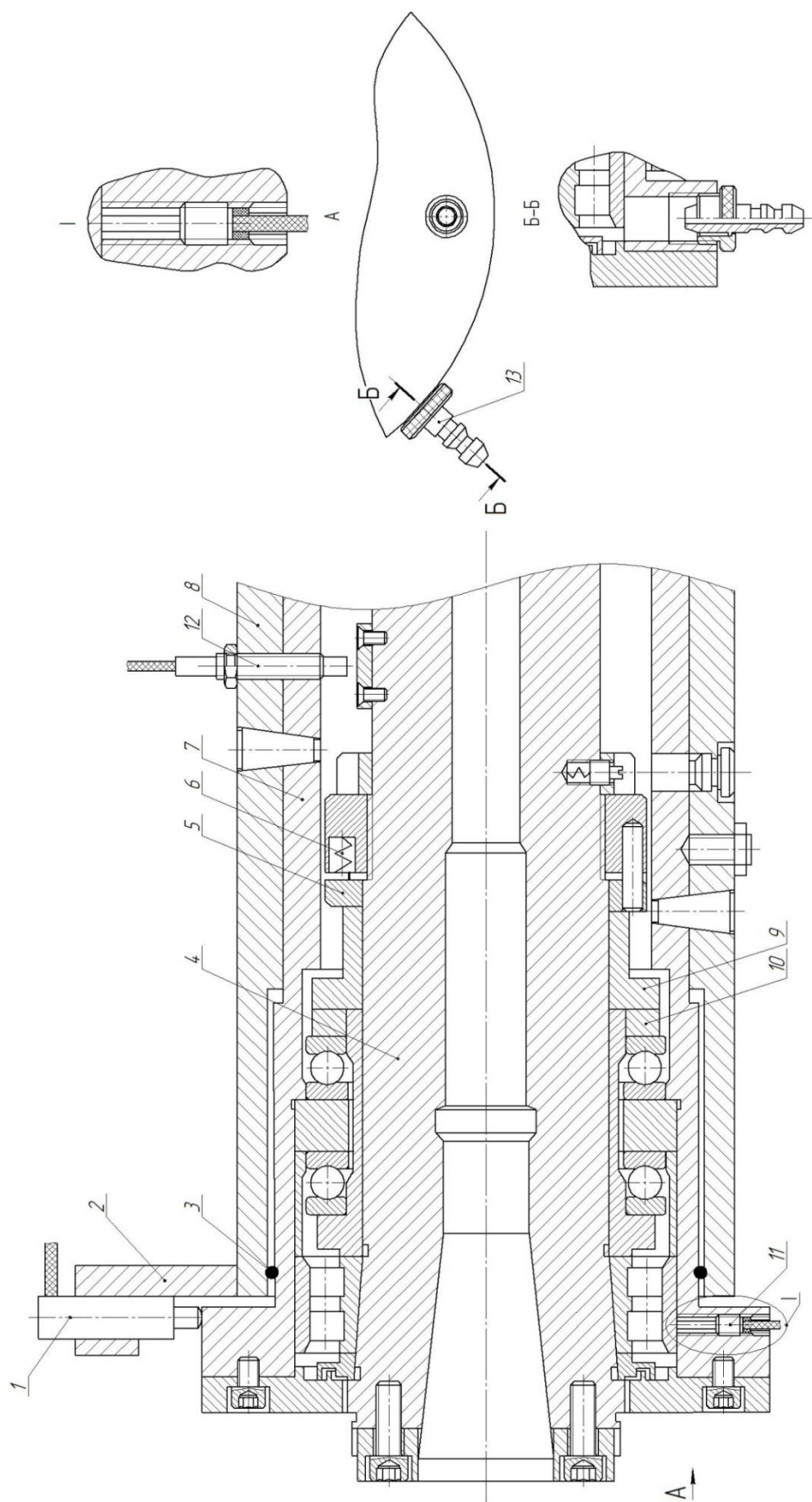


Рис. 34. Шпиндельный узел фрезерного станка с динамометром

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе дипломного проекта был проведен анализ основных факторов, определяющих точность станков и влияние температурных деформаций на точность механообработки, а также анализ различных современных способов уменьшения этих деформаций и существующих систем термостабилизации.

По результатам анализа были разработаны «интеллектуальные» системы термостабилизации шпиндельного узла в среде *MATLAB*, использование которых повлечет за собой снижение температурных деформаций и повышение точности металлорежущих станков.

Разработанные программы позволяют в первую очередь выполнять расчет производительности маслораспылителя автоматически, а также произвести быстрый необходимый анализ и корректировку программы с учетом дополнительных экспертных данных в каждом частном случае работы станка с ЧПУ, что говорит о хорошей гибкости систем при использовании данной программы. Данными системами можно оснастить как новые, так и уже находящиеся в эксплуатации металлорежущие станки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.И.Островский. Факторы, влияющие на точность горизонтально-расточных станков // Станки и инструмент. – 1964. - №10 – с.3-7.
2. Системы смазки приводов главного движения металлорежущих станков: Методические указания к самостоятельной работе при курсовом проектировании по курсам: «Конструирование, расчет и САПР станков и станочных комплексов» и «Металлорежущие станки и промышленные роботы» / Е.В.Кусова, И.М.Храмов, Н.Ш.Ардаширов. Свердловск: УПИ, 1991. - 24с.
3. К.В.Марусич. Управление термодформационным состоянием станка на основе автоматизации прогнозирования температурных перемещений исполнительных органов. – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2012.
4. А.Н.Поляков, П.И.Дьяконов. Прогнозирование теплоустойчивости станков с помощью нейросетевого подхода // Технология машиностроения. – 2003. - №6 – с.29-33.
5. А.Н.Поляков, П.И.Дьяконов. Прогнозирование температурных перемещений станка с помощью нейронных сетей // Технология машиностроения. – 2005. - №7 – с.15-19.
6. А.И.Глухенький, Н.Н.Панов, Ж.С.Равва. Стабилизация температуры в прецизионных станках с помощью полупроводниковых охлаждающих устройств // Станки и инструмент. – 1972. - №3 – с.9-10.
7. Е.С. Гараев Реализация системы термостабилизации подшипников станочного мотор-шпинделя в среде *MATLAB* // *University Stars* – 2017: сборник проектов III Международного интеллектуального конкурса студентов, магистрантов, аспирантов, докторантов. Россия, Москва, 30 декабря 2017 г. [Электронный ресурс] / под ред. проф. Т.М. Конопляник, У.М. Бахтикиреевой, Г.Б. Евгенева. – Электрон. текст.

- дан. (1 файл 8.5 Мб). – М.: РусАльянс Сова, 2018. – ISBN 978- 5-6040971-0-6.
8. Ф.Л.Копелев. Отделочно-расточной станок с автоматической компенсацией тепловых деформаций // Станки и инструмент. – 1974. - №10 – с.14-15.
 9. Я.Л.Либерман. Система термостабилизации шпиндельного узла металлорежущего станка. Авторское свидетельство № 102553
 10. Я.Л.Либерман. Система термостабилизации шпиндельного узла металлорежущего станка. Авторское свидетельство № 116387
 11. Я.Л.Либерман Повышение точности «интеллектуальной» системы стабилизации температуры подшипников шпинделя металлорежущего станка./ Я.Л. Либерман// European multi science journal.- №9.-2017. - С. 21-31.
 12. А.В.Леоненков. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH, СПб.: БВХ-Петербург, 2005.
 13. М.П.Белов, В.А.Новиков, Л.Н.Рассудов. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. М.: «Академия», 2004.
 14. Станки с числовым программным управлением (специализированные) / под ред. В.А.Лещенко. – М.: Машиностроение, 1979 . – 592 с.
 15. А.С.Сандлер. Электропривод и автоматизация металлорежущих станков. Учеб. пособие для втузов. – М.: «Высш. школа», 1972. – 440 с.
 16. Контроль и диагностика в ГПС: Практ. пособие / Под ред. В.И.Черпакова. – М.: Высш. школа, 1989. – с.83-84.
 17. А.П.Сиротенко, В.А.Лизогуб. Динамометрический шпиндельный узел для адаптивной системы управления станком // Станки и инструмент. – 1978. - №4 – с.9-10.
 18. Экономическое обоснование технических и организационных решений в дипломных проектах: методические указания / сост. Т.Е.Дашкова, В.А.Шабалина. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005.

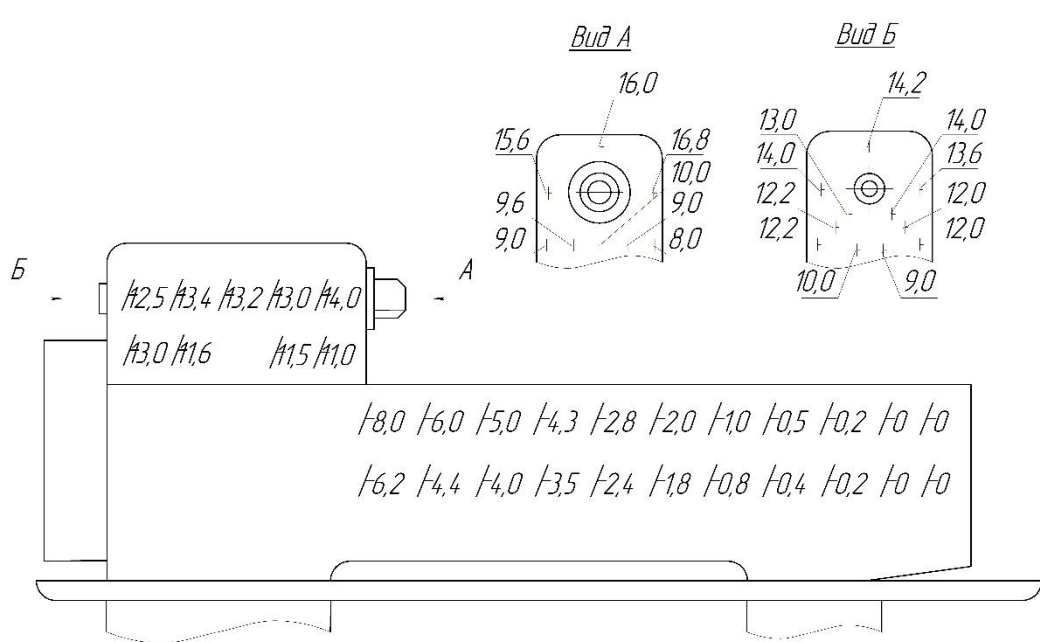
19. Экономика и организация машиностроительного производства. Дипломное проектирование: учеб. пособие / А.А.Жолобов, А.Г.Барановский, В.Т.Высоцкий; под ред. А.А.Жолобова. – Минск: Изд-во Гревцова, 2011.
20. И.А.Биргер. Расчет на прочность деталей машин: справочник / И.А.Биргер, Б.Ф.Шорр, Г.Б.Иосилевич. М. :Машиностроение, 1979. – 702с.
21. Расчет режимов резания при точении с учетом виброустойчивости технологической системы: Учебное пособие по курсу «Теория автоматического управления» / Я.Л.Либерман. Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2012. – 173 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

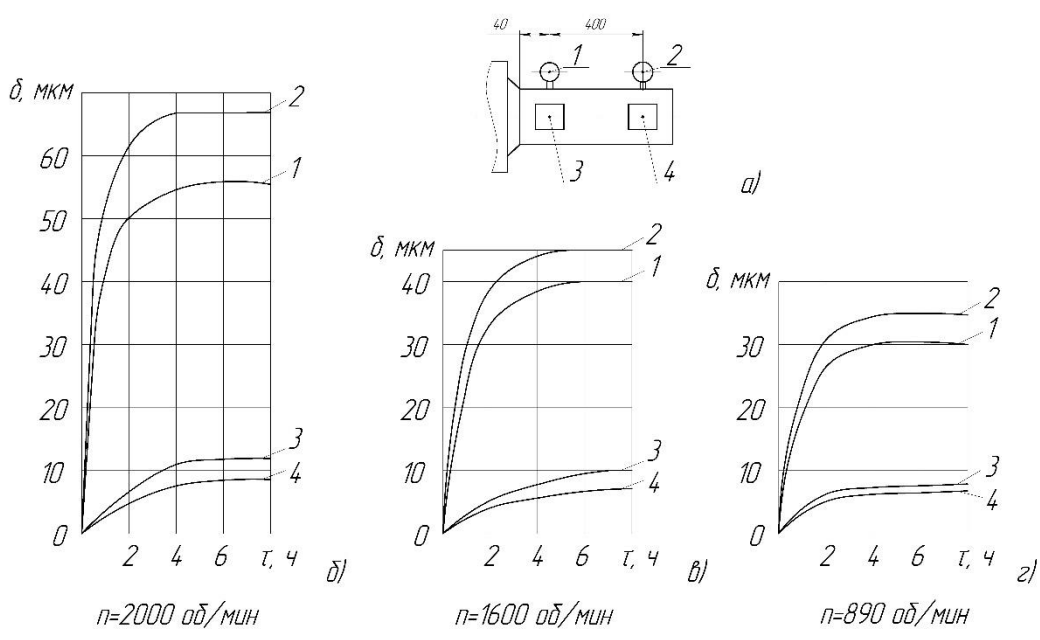
151002000000004

[illegible]

Избыточные температуры при финишной обработке на станке модели 16Б16П при $n=890$ об/мин (по данным статьи А.И.Глухенького и др. в журнале "Станки и инструмент", №3, 1972)



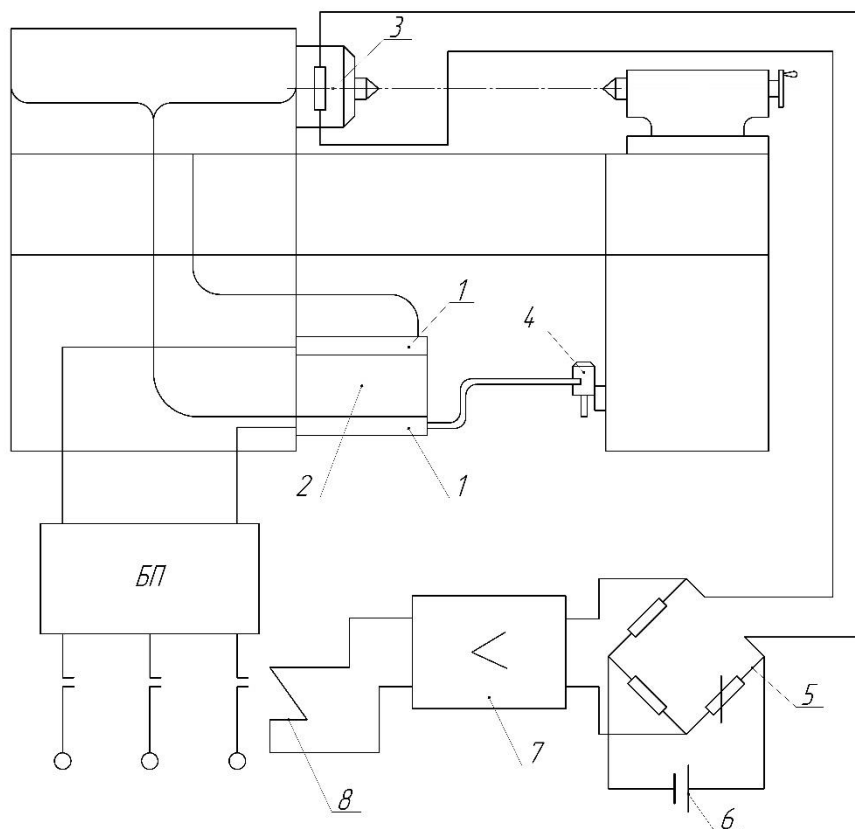
Температурные деформации шпинделя



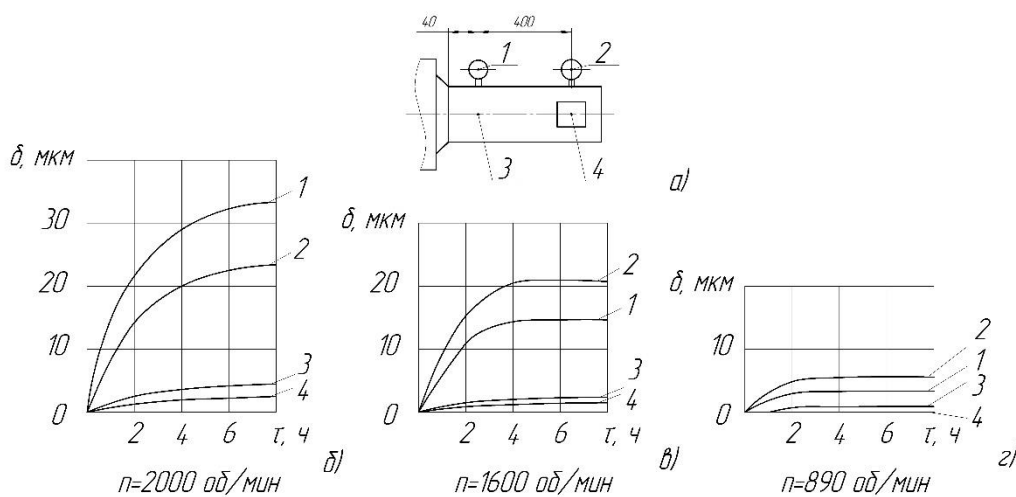
151002.000000.004									
Исполн.	Провер.	Утверд.	Дата	Избыточные температуры при финишной обработке					
Исполн.	Провер.	Утверд.	Дата	Исходные данные					
Исполн.	Провер.	Утверд.	Дата	Исходные данные					

Система термостабилизации шпиндельного узла
по авторскому свидетельству Н.Н.Панова и др. №248435

151002.000000.004

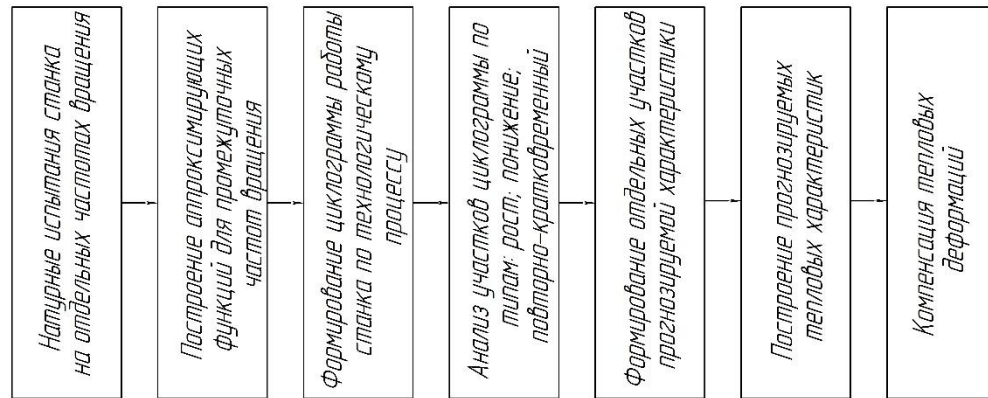


Температурные деформации шпинделя

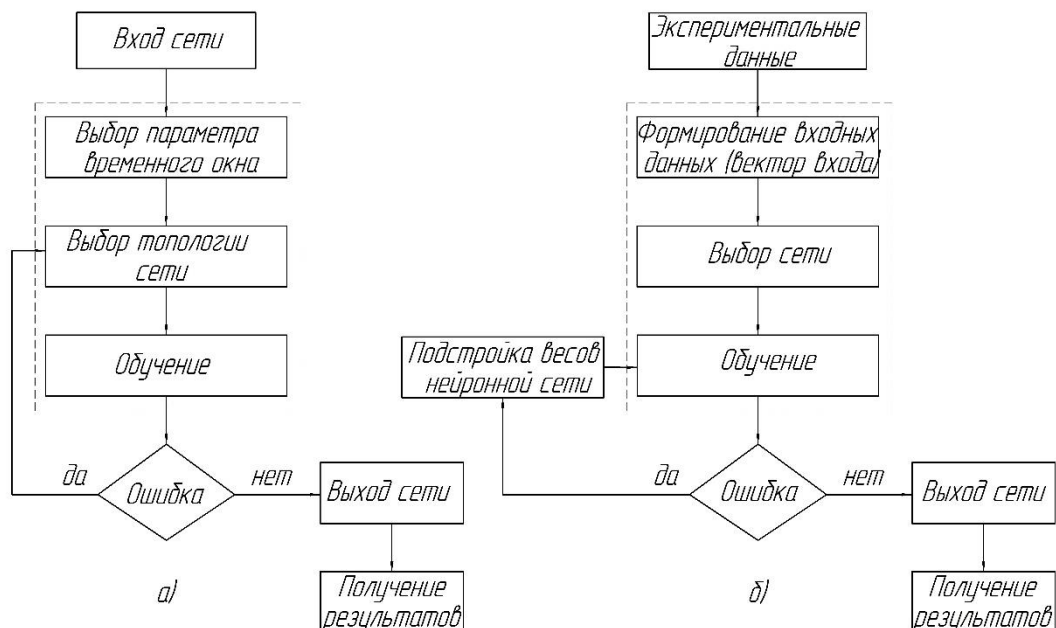


151002.000000.004									
Система термостабилизации шпиндельного узла									
Исполнитель: И.И.Панов									
Исполнитель: И.И.Панов									
Исполнитель: И.И.Панов									
Исполнитель: И.И.Панов									
Исполнитель: И.И.Панов									
Исполнитель: И.И.Панов									
Исполнитель: И.И.Панов									
Исполнитель: И.И.Панов									

*Алгоритм компенсации тепловых деформаций на основе
прогнозирования тепловых характеристик станка
(по материалам кандидатской диссертации К.В.Марусича)*



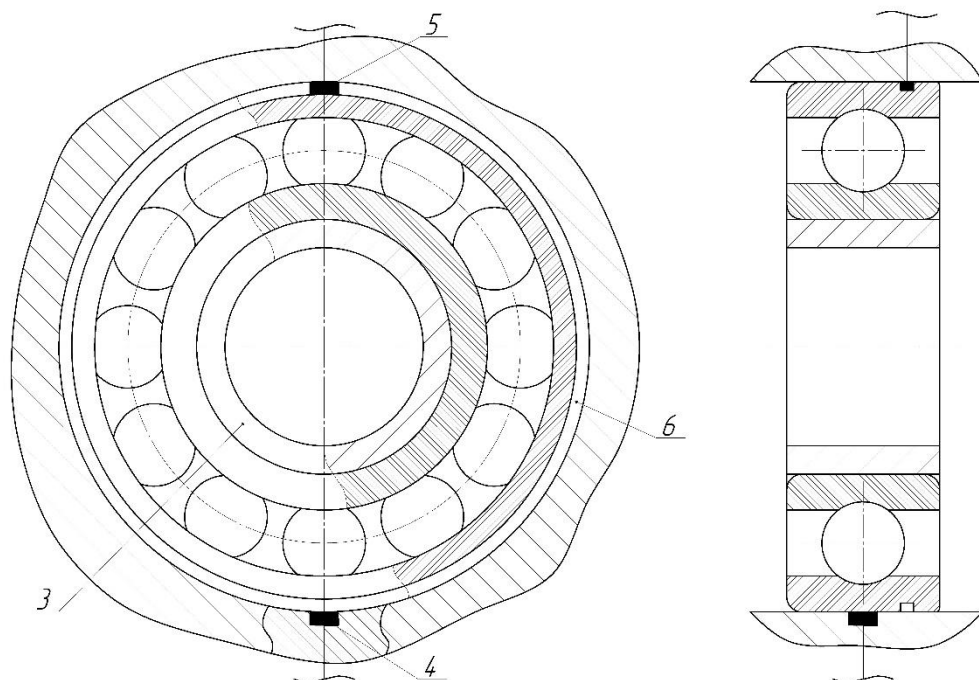
Алгоритмы прогнозирования тепловых характеристик станка с использованием нейронных сетей (по материалам статей А.Н.Полякова и П.И.Дьяконовой в журнале "Технология машиностроения" №6, 2003 и №7, 2005)



						151002.000000.004					
Исполн.	№ докум.	Изд.	Дата	Алгоритмы тепловых характеристик станка					Зарп.	Прогноз	Материал
Разработ.	А.А.А.А.А.										
Провер.	А.А.А.А.А.										
Согласов.									Зарп.	Прогноз	?
Исполн.									Учред. корпорации МСН		

					151002.000000.004				
Итого/сумма	№ документа	№ листа	договор	системы термостатирования					
Итого/сумма	№ документа	№ листа	договор	шпиндельного узла					
Итого/сумма	№ документа	№ листа	договор						
Итого/сумма	№ документа	№ листа	договор	Узлы					
Итого/сумма	№ документа	№ листа	договор	картотека МЭ					
Итого/сумма	№ документа	№ листа	договор	Итого/сумма					

Схема расположения термодатчика и тензодатчика относительно переднего подшипника шпинделя

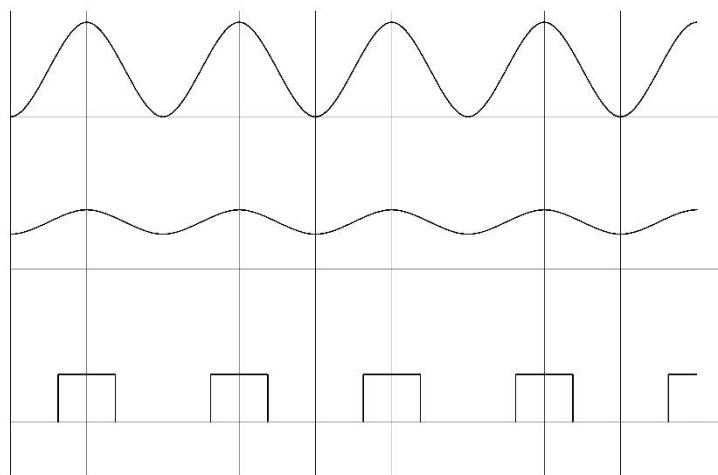


Временная диаграмма сигналов непряжения при вращении шпинделя на выходах тензодатчика, сглаживающего фильтра и формирователя импульсов

Сигнал с тензодатчика 5

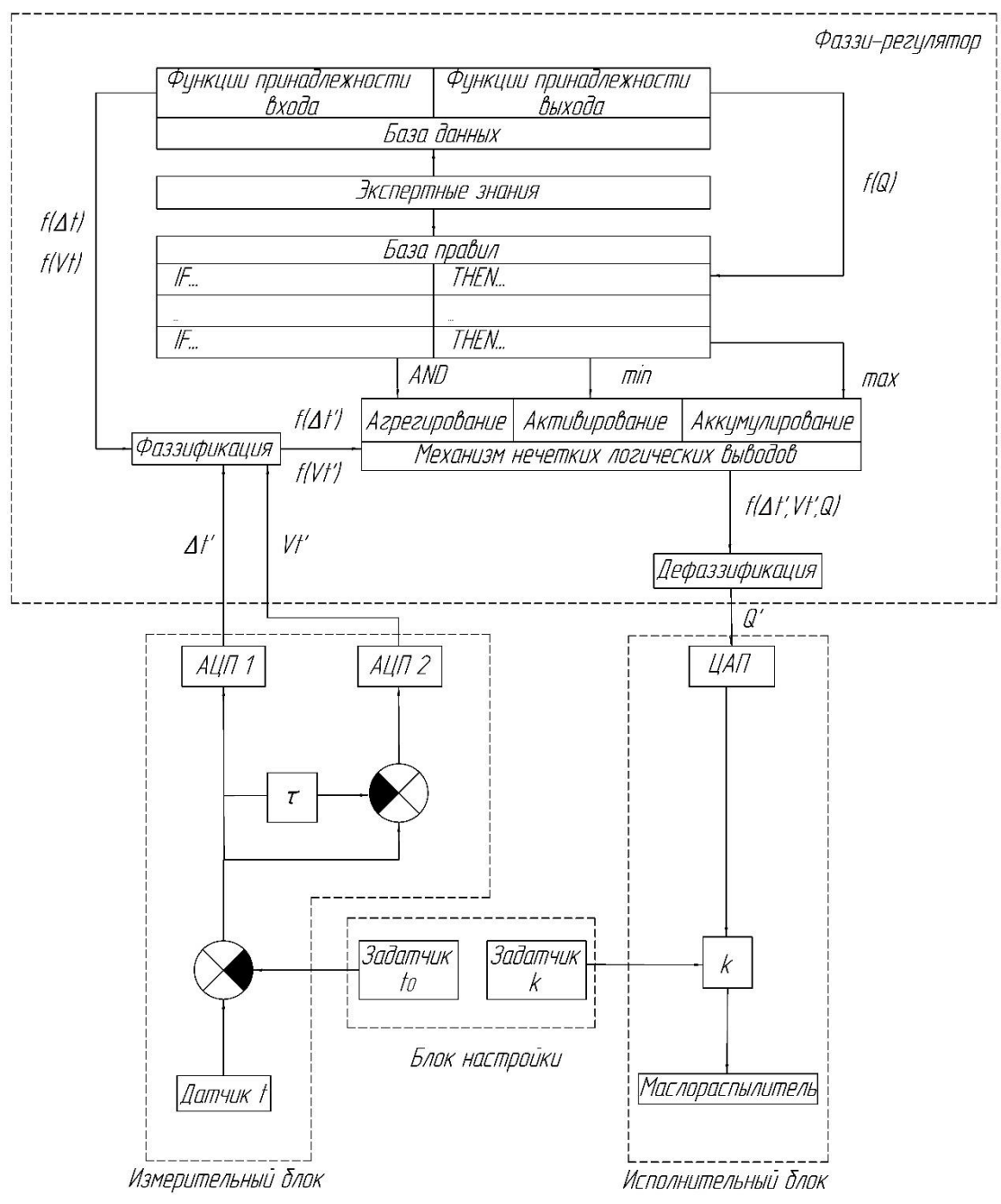
Сигнал после сглаживающего фильтра 8

Сигнал после формирователя импульсов 7



151002.000000.004				Схема расположения термодатчика и тензодатчика			
Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель
Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель
Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель
Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель

Интеллектуальная система термостабилизации шпиндельного узла с управлением по отклонению



ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ БЛОК

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ БЛОК

БЛОК НАСТРОЙКИ

ФАЗЗИ-РЕГУЛЯТОР

Датчик t

АЦП 1

АЦП 2

τ

Задатчик t_0

Задатчик k

ЦАП

Маслораспределитель

k

Q'

$f(\Delta t)$

$f(Vt)$

$f(Q)$

$\Delta t'$

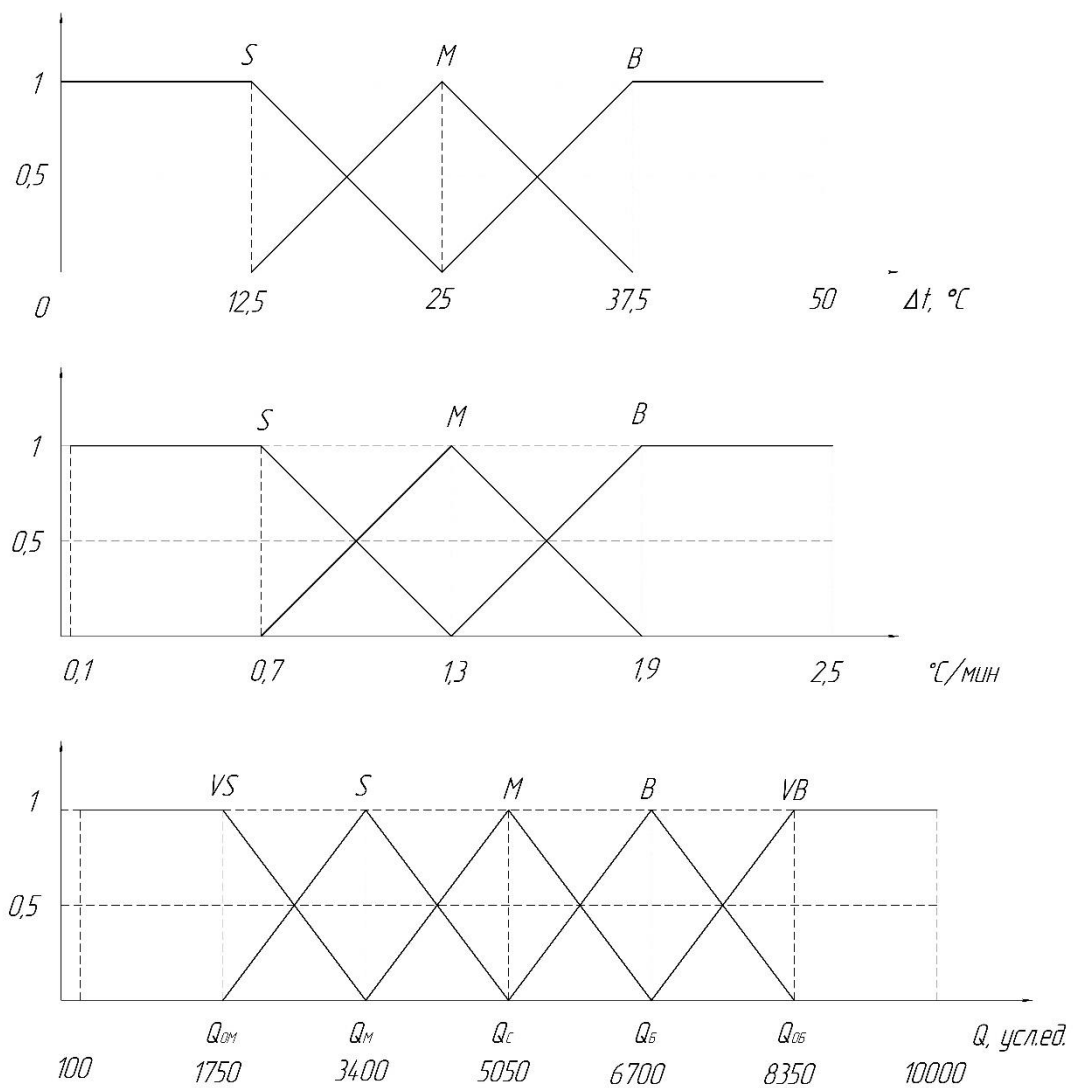
Vt'

$f(\Delta t')$

$f(Vt')$

$f(\Delta t', Vt', Q)$

151002.000000.004									
Исполнитель	Разработчик	Проверен	Утвержден	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель
Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель
Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель
Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель



Отклонение температуры Δt	Скорость изменения температуры V_i		
S	S	M	B
M	VS	S	M
B	S	M	B
	M	B	VB

[illegible]

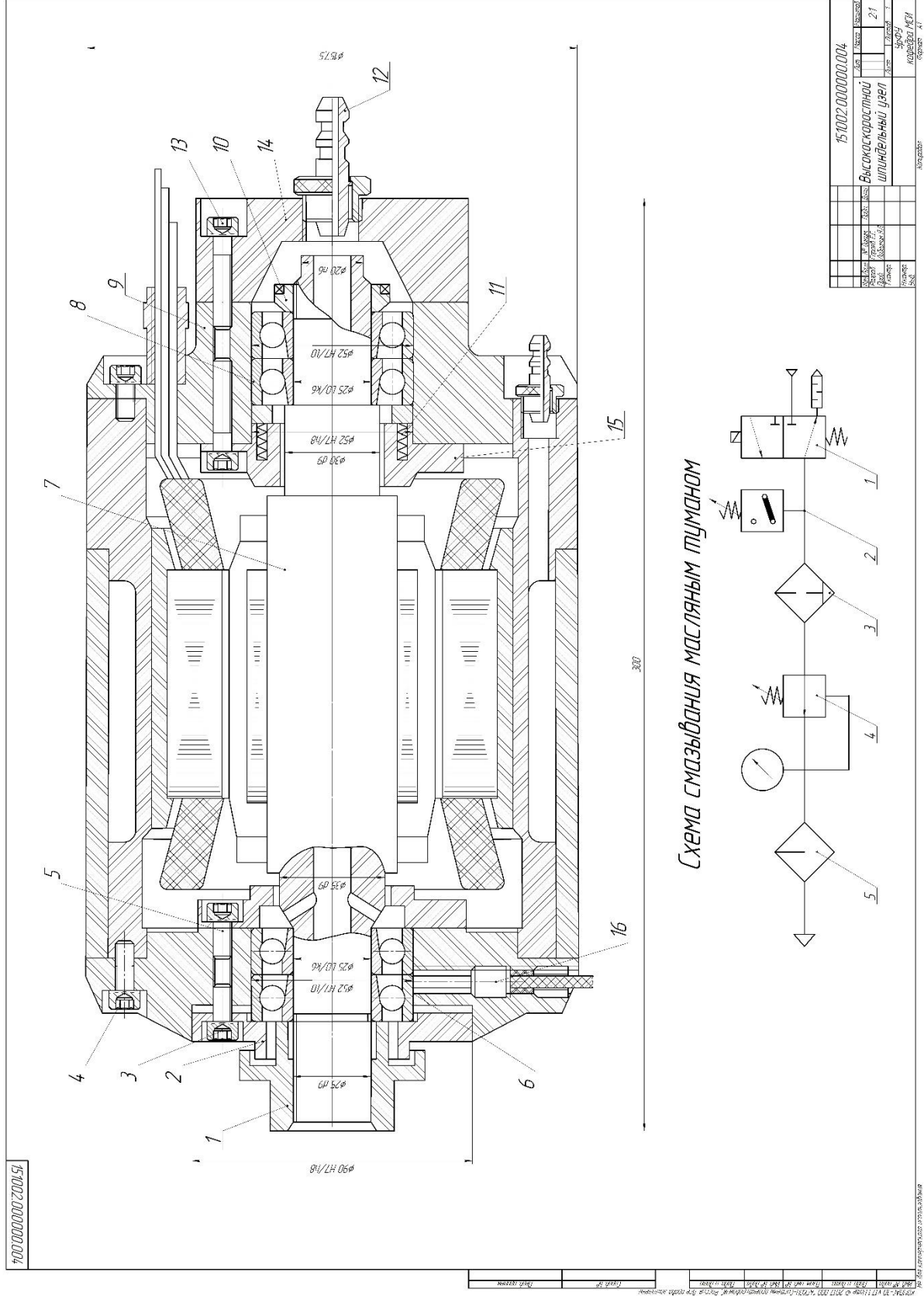
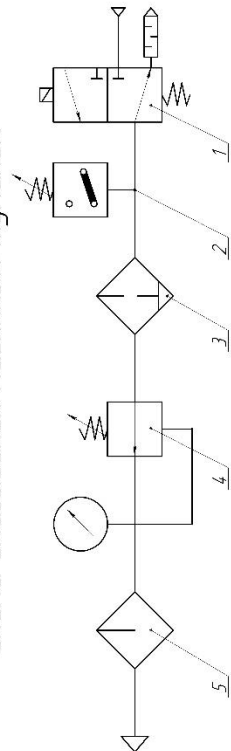
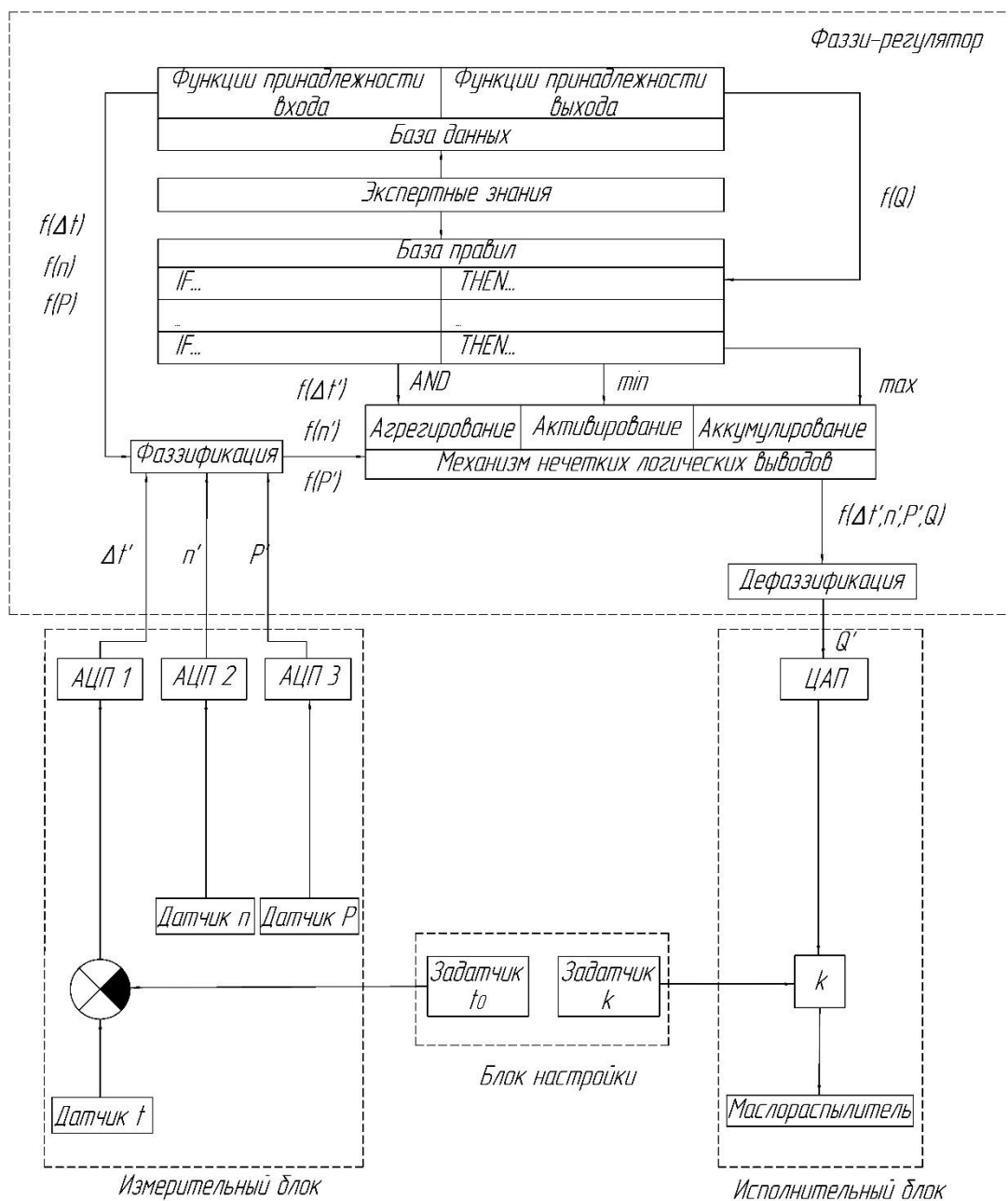


Схема смазывания масляным туманом



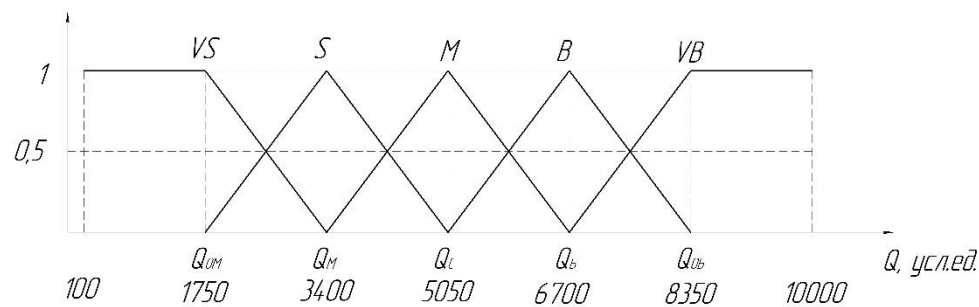
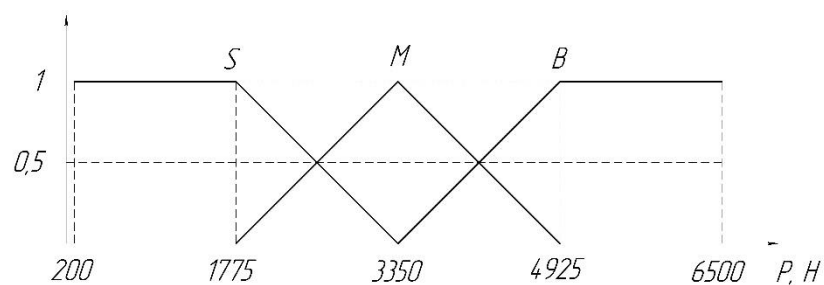
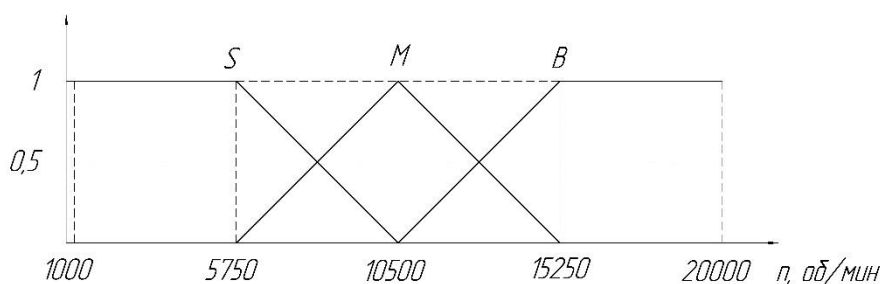
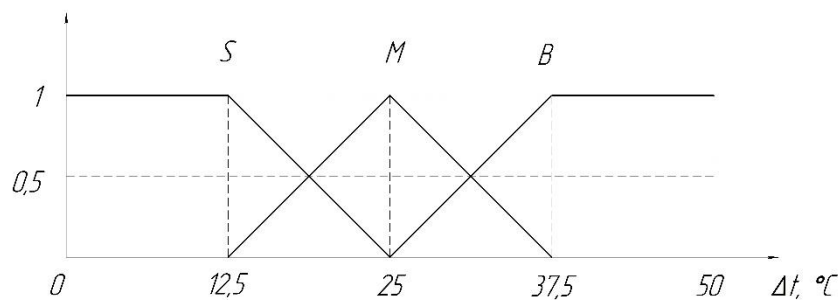
Интеллектуальная система термостабилизации шпиндельного узла с комбинированным управлением



ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ БЛОК

151002.000000.004									
Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель
Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель
Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель
Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель
Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель
Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель
Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель
Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель
Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель

Графики функций принадлежности

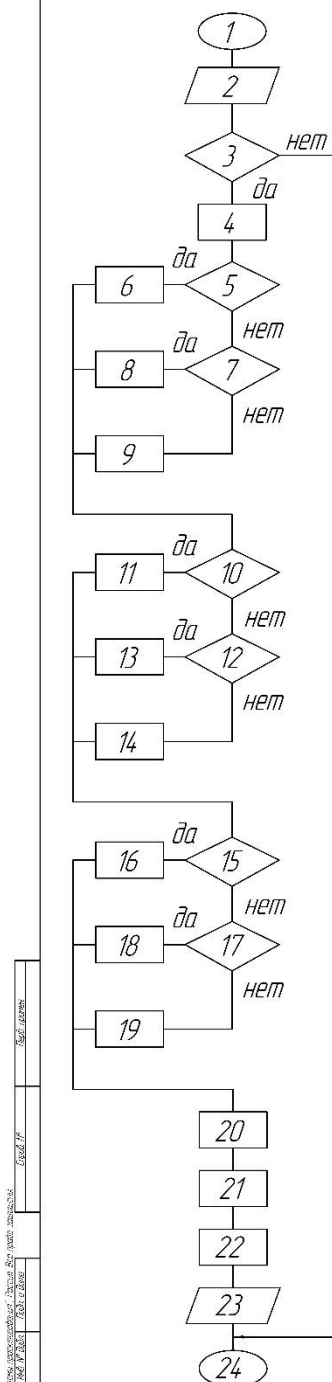


Матрица правил

n	$n(S)$			$n(M)$			$n(B)$		
P	$P(S)$	$P(M)$	$P(B)$	$P(S)$	$P(M)$	$P(B)$	$P(S)$	$P(M)$	$P(B)$
$\Delta t(S)$	VS	VS	S	S	S	M	S	M	M
$\Delta t(M)$	S	S	M	M	M	B	M	B	B
$\Delta t(B)$	M	M	B	B	B	VB	B	VB	VB

151002.0000000.004									
Графики и матрица правил									
Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель
Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель

Алгоритм работы фаззи-регулятора



1 - начало;

2 - ввод отклонения температуры $t_{\text{н}}$, от номинального значения t_0 , скорости вращения шпинделя n и нагрузки на шпиндель P ;

3 - проверка принадлежности значений $t_{\text{н}}$, n и P допустимым диапазонам

$t_{\text{н}} \in [0; 50]$, $n \in [1000; 20000]$, $P \in [200; 6500]$;

4 - фаззификация входных переменных;

5, 7 - проверка принадлежности $t_{\text{н}}$ интервалам $[0; 25]$, $[12,5; 37,5]$, $[25; 50]$;

6, 8, 9 - присвоение функции принадлежности $f(t_{\text{н}})$ значения $f(t_{\text{н}})$, соответствующего интервалу;

10, 12 - проверка принадлежности n интервалам $[1000; 10500]$, $[5750; 16250]$, $[10500; 20000]$;

11, 13, 14 - присвоение функции принадлежности $f(n)$ значения $f(n)$, соответствующего интервалу;

15, 17 - проверка принадлежности P интервалам $[200; 3350]$, $[1775; 4925]$, $[3350; 6500]$;

16, 18, 19 - присвоение функции принадлежности $f(P)$ значения $f(P)$, соответствующего интервалу;

20 - активирование по условию минимума функций принадлежности $f(t_{\text{н}}, n, P, Q)$ с помощью формул типа

$$f_{VS}(t_{\text{н}}, n, P, Q) = \min\{f_S(t_{\text{н}}); f_S(n); f_S(P)\},$$

$$f_S(t_{\text{н}}, n, P, Q) = \min\{f_M(t_{\text{н}}); f_S(n); f_S(P)\},$$

$$f_S(t_{\text{н}}, n, P, Q) = \min\{f_S(t_{\text{н}}); f_S(n); f_B(P)\},$$

$$f_M(t_{\text{н}}, n, P, Q) = \min\{f_B(t_{\text{н}}); f_S(n); f_S(P)\},$$

$$\dots\dots\dots;$$

21 - аккумулярование по правилу максимума функций принадлежности $f(t_{\text{н}}, n, P, Q)$ по формуле

$$f_i(Q) = f(t_{\text{н}}, n, P, Q) = \max\{f_i(t_{\text{н}}, n, P, Q)_1; f_i(t_{\text{н}}, n, P, Q)_2; \dots\};$$

22 - дефаззификация выходной переменной

производительности маслораспылителя Q' по формуле

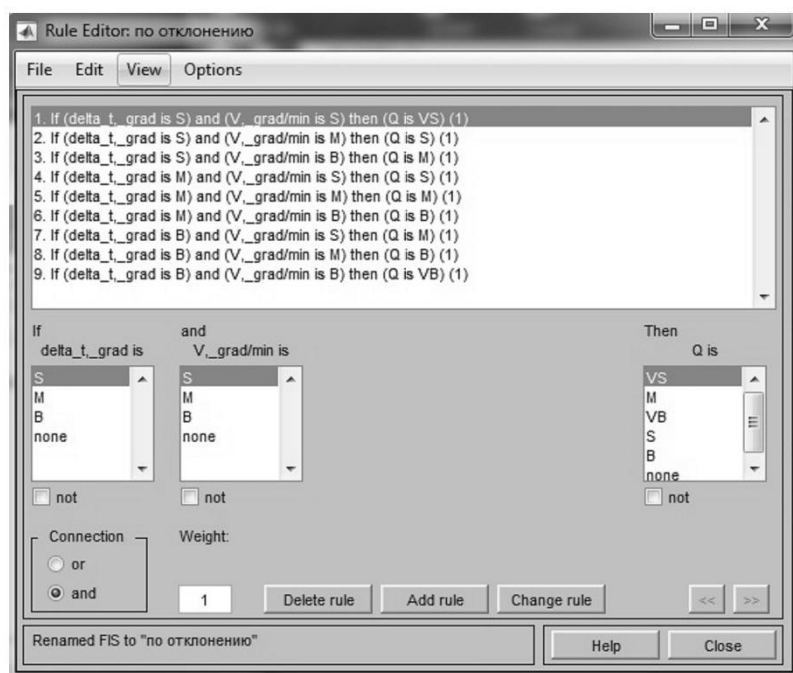
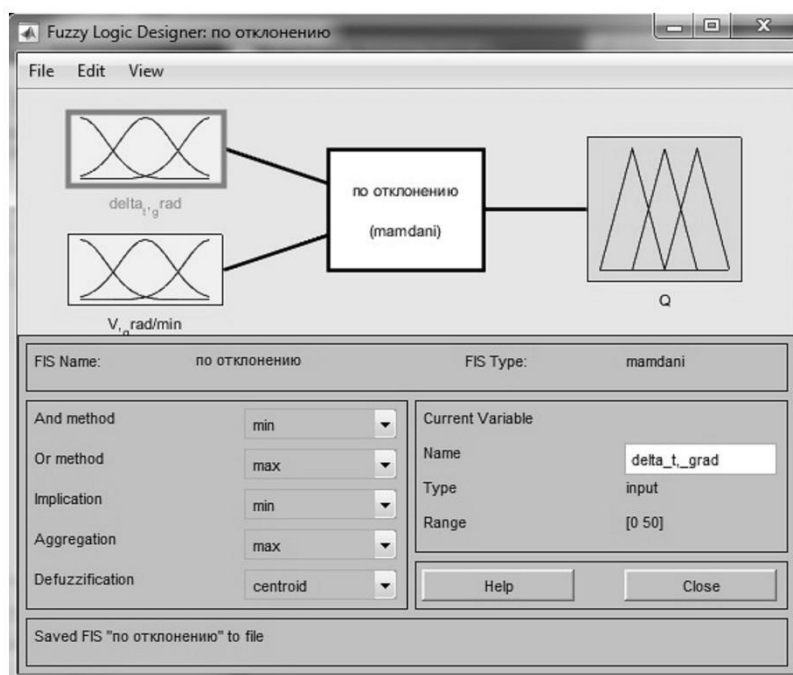
$$Q' = \frac{\int_{\vec{u}} u f_Q(u) du}{\int_{\vec{u}} f_Q(u) du};$$

23 - вывод значения Q' ;

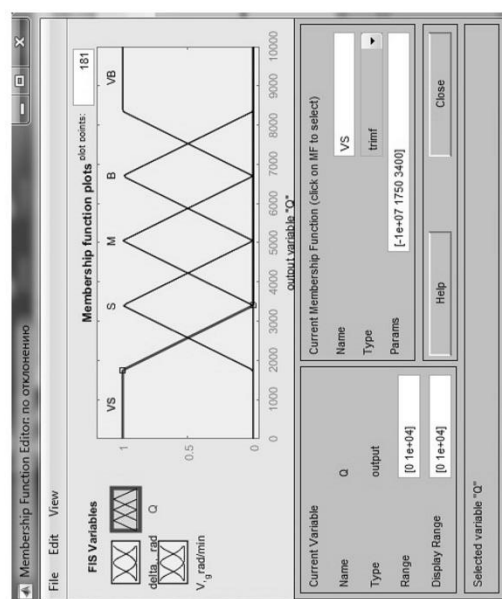
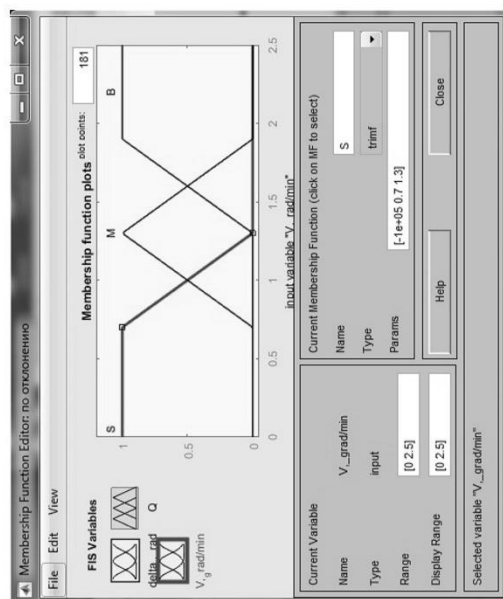
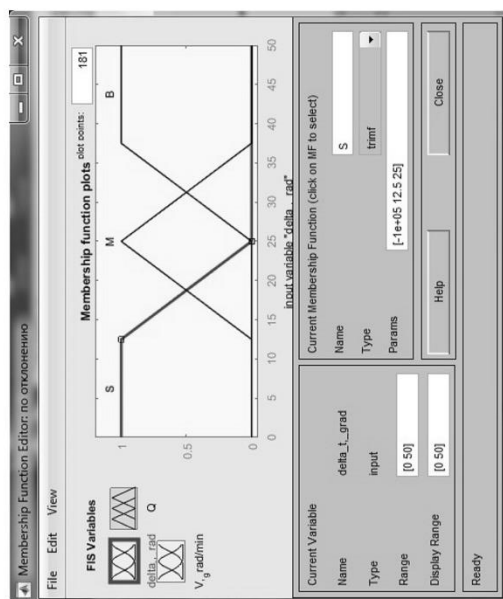
24 - конец.

151002.000000.004					
Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель
Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель
Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель
Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель
Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель	Исполнитель

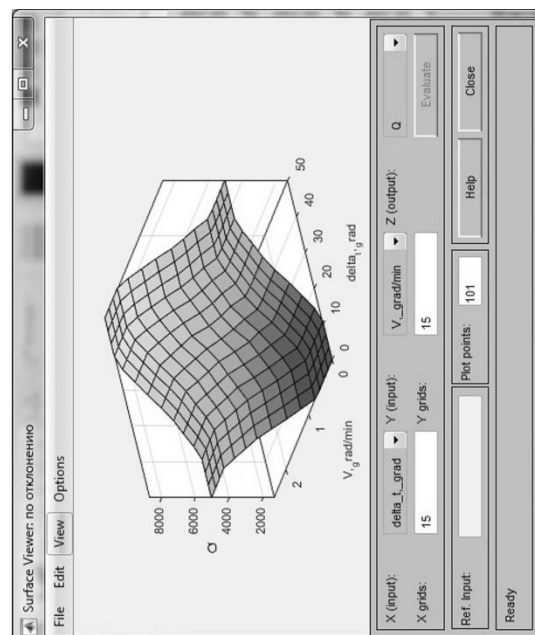
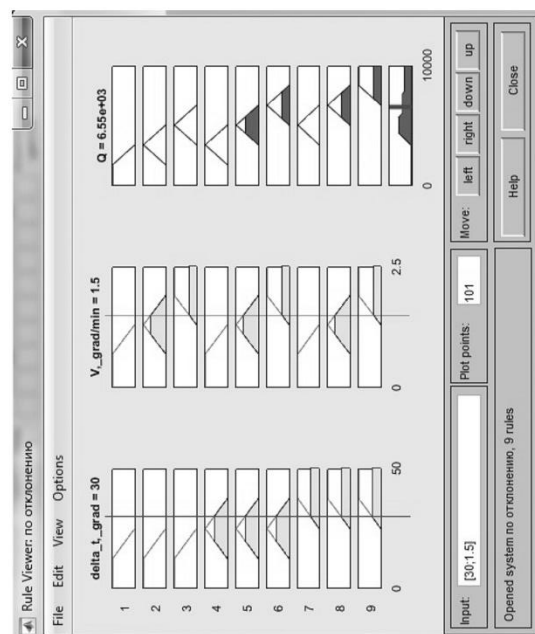
*Общий вид программы с управлением по отклонению
а также ее база правил в MATLAB*



Задание параметров для программы с управлением по отклонению в MATLAB

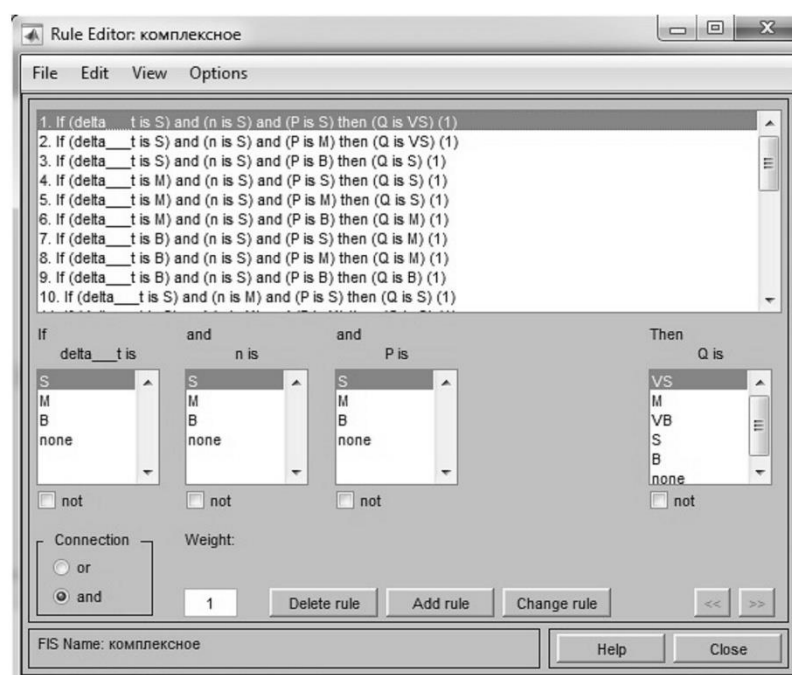
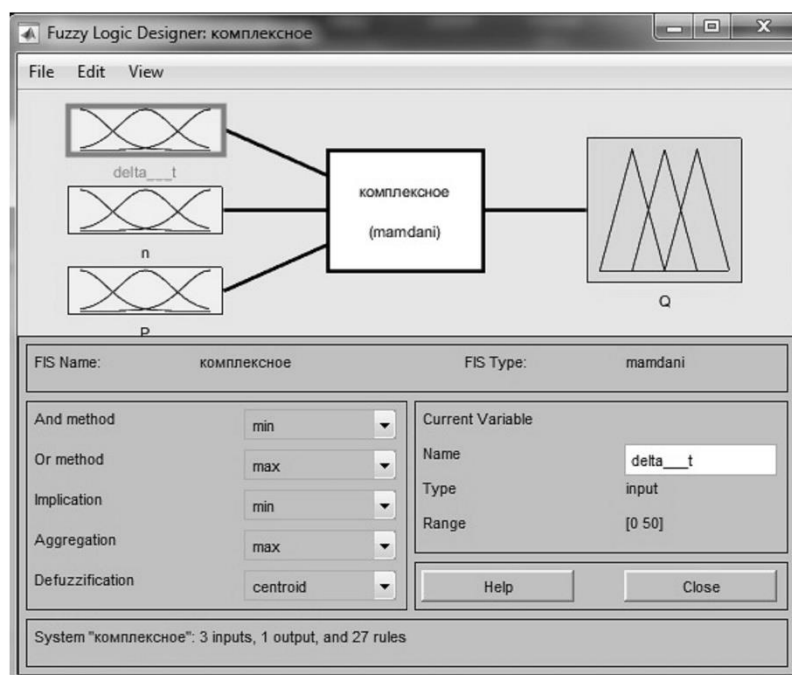
[illegible]

Выполнение программы в MATLAB системы с управлением по отклонению

[illegible]

Общий вид программы с комбинированным управлением а также ее база правил в MATLAB

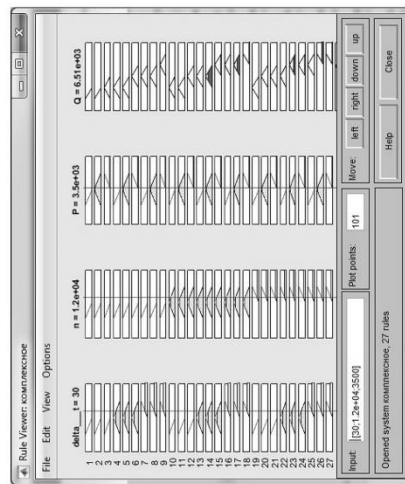
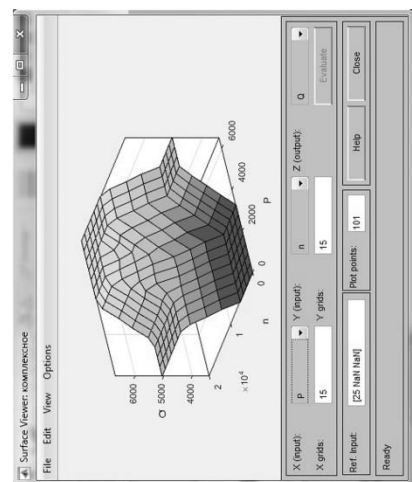
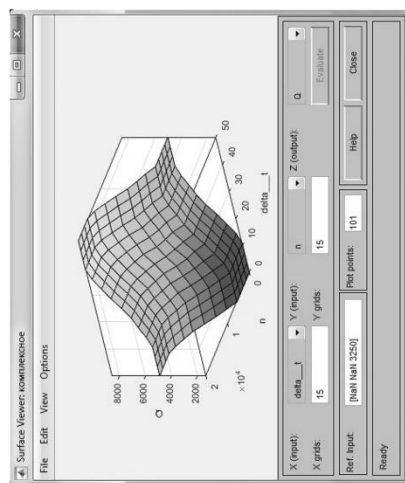
151002.000000.004



151002.000000.004

151002.000000.004				вер.	даты	изменен
Разработчик	Проверен	Тестирован	Утвержден	1.15		
Разработчик	Проверен	Тестирован	Утвержден			
Разработчик	Проверен	Тестирован	Утвержден			
Разработчик	Проверен	Тестирован	Утвержден			

*Выполнение программы в MATLAB
системы с комбинированным управлением*

[illegible]



ДИПЛОМ

НАГРАЖДАЕТСЯ

Тарасов Олег Сергеевич

Уральский федеральный университет

3 место

в III Международном интеллектуальном конкурсе студентов, магистрантов, аспирантов, докторантов

UNIVERSITY STARS - 2017

Ступень: магистратура

Номинация: Исследовательский проект

Направление: Технические науки

Форма: Статья

Название конкурсного проекта: Реализация системы термостабилизации подшипников станочного мотор-шпинделя в среде MATLAB

Научный руководитель: Либерман Яков Львович



Русальянс Сова
sowa-fu.com

Директор по научным проектам



Григорьев А.Н.

УФУ, 30.12.2017 № 317/00-2017-Совм.Службы: администрация, Оценки, Вет. служба, Биология, География, Информатика, История, Юридический факультет, Физика, Химия, Математика, Экономика, Социальные науки, Спорт, Искусство, Музыка, Филология, Педагогика, Медицина, Аграрные науки, Экология, Энергетика, Транспорт, Военные науки, Прочие

А.И. Григорьевский использован

						151002.000000.004					
Имя	Фамилия	И.О. Фамилия	Пол	Дата	Возраст	Диплом за 3-е место в конкурсе University Stars 2017					
Тарасов	Олег	Сергеевич	М	30.12.2017	24						
Наименование	Формы	Инициалы	Пол	Дата	Возраст						
Либерман	Яков	Львович	М	30.12.2017	24						
						УФУ					
						кафедра МСИ					
						Подпись: А.И.					

