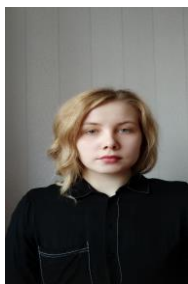


УДК 681.513.66+681.513.7

НЕЧЕТКИЙ АДАПТИВНЫЙ КОНТУР ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ



К.В. Терещенко

*Курсант Белорусской государственной
академии авиации*



А.Г. Капустин

*Профессор кафедры
общепрофессиональных дисциплин
Белорусской государственной академии
авиации, кандидат технических наук,
доцент*

Белорусская государственная академия авиации, Республика Беларусь

E-mail: kokovita13@gmail.com

К.В. Терещенко

Курсант 4 курса Белорусской государственной академии авиации. Победитель республиканского этапа конкурса «100 идей для Беларуси» (2018), Первая категория XXV Республиканского конкурса научных работ студентов (2018), Лауреат II степени X Международного молодежного конкурса научных работ «Молодежь в науке: Новые аргументы» (2019), Участник пятой научно-практической конференции «Мировая наука и инновации 2019: Центральная Азия» (2019).

А.Г. Капустин

Профессор кафедры общепрофессиональных дисциплин Белорусской государственной академии авиации, кандидат технических наук, доцент. Почетный транспортник Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь (2019).

Аннотация. Цель данной работы – разработка и исследование нечеткого адаптивного контура для управления работой двигателя постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ). Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи: разработана математическая и имитационная модели двигателя постоянного тока независимого возбуждения; разработана имитационная модель нечеткого адаптивного контура, состоящего из нечеткого и адаптивного регуляторов; решена задача определения оптимального количества правил для нечеткого регулятора; выполнены исследования и на их основе проведен анализ эффективности управления двигателем постоянного тока независимого возбуждения.

Использованные в работе методы исследования: теория структурно-функционального анализа, методы математического и имитационного моделирования теория нечетких множеств, теория эксперимента.

Ключевые слова: Адаптивный нечеткий контур, правила нечеткой логики, fuzzy logic, регулирование частоты оборотов, двигатель постоянного тока независимого возбуждения.

Введение. В работе предложен подход к разработке адаптивной системы с эталонной моделью с учетом решения следующих вопросов: вопрос планирования действий (система управления должна не просто реагировать на текущую ситуацию, но и прогнозировать последовательность действий, которые должны привести к намеченной цели); вопрос обучения на опыте своего взаимодействия с внешней средой (данная проблема включает не только вопросы обучения отдельной форме поведения, но и вопросы обучения взаимодействию между различными формами поведения); вопрос универсальности (системы управления различными объектами должны следовать единым принципам управления и

основываться на единой модели). Свойства разработанной адаптивной системы исследованы во временной и частотной областях при помощи среды *Matlab* [1, 2, 3, 4].

Анализ текущего состояния дел в области разработки автономных адаптивных систем управления позволяет выделить следующие основные проблемы, с которыми сталкиваются разработчики подобных систем:

1. Проблема координации различных форм поведения объектов и организации взаимодействия между ними.

2. Проблема планирования действий. Система управления должна не просто реагировать на текущую ситуацию, но и прогнозировать последовательность действий, которые должны привести к намеченной цели.

3. Проблема обучения на опыте своего взаимодействия с внешней средой. Данная проблема включает не только вопросы обучения отдельной форме поведения, но и вопросы обучения взаимодействию между различными формами поведения.

4. Проблема формирования новых типов поведения. Система управления должна уметь самостоятельно формировать новые типы поведения, направленные на достижение новых целей, и включать их в общую структуру контроля.

5. Проблема универсальности. Системы управления различными объектами должны следовать единым принципам управления и основываться на единой модели.

Существующие на данный момент подходы к построению систем управления решают только некоторые из вышеперечисленных проблем. Какие-либо общие и достаточно универсальные модели, которые бы решали все указанные проблемы, в настоящее время так и не предложены [1, 2].

В работе предложен подход к разработке адаптивной системы с эталонной моделью с учетом требований 2, 3, 5. Свойства разработанной адаптивной системы исследованы во временной и частотной областях при помощи среды *Matlab*.

Перспективными воздушными судами называют «полностью электрические самолеты», разрабатываемые по концепции All electric aircraft. Эта концепция предполагает замену всех видов энергии на борту самолета (пнеumo-, гидро- и др.) только на электрическую энергию. Реализация данной концепции связана с разработкой новых принципов построения бортовых систем воздушных судов, взаимодействующих в реальном масштабе времени под управлением бортовых компьютеров [1]. Создавать такие системы целесообразно используя искусственный интеллект, например, нечеткую логику (Fuzzy-регуляторы).

Нечеткая логика – набор нестрогих правил, созданных для регулирования выходного сигнала в заданных пределах, исходя из постоянно меняющихся входных данных. Законы нечеткой логики могут работать и обеспечивать заданное качество процессов управления при любых режимах работы систем авионики с помощью специфических (специальных) алгоритмов типа нечетких (fuzzy-logic), способных к обучению и самообучению (на основе искусственных нейронных сетей) [2,3].

Интеллектуальные системы регулирования (управления) применяются при управлении сложными объектами с плохо изученной динамикой, условия работы которых существенно непостоянны (дрейф параметров, изменение характеристик объекта управления и среды эксплуатации). В таких условиях обыкновенные (неадаптивные) системы управления неработоспособны, либо работают неудовлетворительно, требуя постоянного квалифицированного наблюдателя.

На современном этапе интеллектуальные системы оценивают, как «разумные» системы, оптимизирующие процессы управления сложными объектами в нестационарных состояниях и неизвестной среде эксплуатации. В перспективных системах авионики такими объектами являются системы электропривода, системы регулирования напряжения, электрические машины, асинхронизированный электропривод и др. В настоящее время в большинстве систем авионики используются линейные законы управления, которые

эффективны только при определенном режиме работы. Поэтому такие регуляторы исчерпали свои возможности корректного и эффективного регулирования работы современных систем авионики. [1,2]

Материалы и методы. Существующие системы в большинстве случаев не способны обеспечить необходимое качество управления. Для обеспечения требуемого качества управления предлагается использовать систему управления электроприводом, автоматически изменяющую алгоритм работы или свою структуру для достижения оптимального состояния при изменении внешних условий – адаптивную систему управления (рисунок 1).

Двигатель постоянного тока с независимым возбуждением широко применяется в системах авионики и мехатроники современных самолетов. Необходимым условием непрерывного процесса электромеханического преобразования энергии является протекание переменных токов хотя бы по части обмоток якоря и возбуждения машины, которые получают питание от независимых источников постоянного тока. Выполнение этого условия в машине постоянного тока обеспечивается работой коллектора (контактного или бесконтактного), коммутирующего постоянный ток, поступающий в якорную обмотку со стороны источника питания, с частотой $\omega_{эл}$, пропорциональной скорости вращения ротора

Двигатель постоянного тока независимого возбуждения можно описать следующей системой дифференциальных уравнений [1, 2]:

$$\begin{aligned} U_{\epsilon} &= I_{\epsilon} R_{\epsilon} + L_{\epsilon} dI_{\epsilon} / dt ; \\ U_{я} &= I_{я} R_{я} + L_{я} dI_{я} / dt + k\Phi\omega , \\ M_{\text{дв}} &= k\Phi I_{я} ; \\ M_{\text{дв}} - M_{н} &= J_{\Sigma} d\omega / dt , \end{aligned} \quad (1)$$

где U_{ϵ} , I_{ϵ} –напряжение и ток цепи возбуждения;
 R_{ϵ} , L_{ϵ} - сопротивления и индуктивность цепи возбуждения;
 $U_{я}$, $I_{я}$ –напряжение и ток якорной цепи;
 $R_{я}$, $L_{я}$ –сопротивления и индуктивность якорной цепи;
 L_{12} –взаимная индуктивность обмоток якоря и возбуждения;
 ω –угловая скорость ротора;
 $M_{\text{дв}}$ –электромагнитный момент двигателя;
 $M_{н}$ –момент нагрузки;
 $k\Phi = p_n L_{12} I_{\epsilon}$;
 p_n –число пар полюсов;
 J_{Σ} –суммарный момент инерции двигателя и нагрузки.

Первые два уравнения полученной системы представляют собой уравнения Кирхгофа для цепей возбуждения и якоря машины, причем последний член уравнения для цепи якоря есть ЭДС двигателя:

$$e = \omega_{эл} L_{12} i_{\epsilon} = p_n L_{12} i_{\epsilon} \omega = k\Phi\omega . \quad (2)$$

Момент двигателя определяется соотношением:

$$M_{\text{ос}} = p_n L_{12} i_e i_{\text{я}} = k\Phi I_{\text{я}} \quad (3)$$

Для записи уравнений механической характеристики двигателя постоянного тока можно, непосредственно использовать схему, приведенную на рисунке 1.

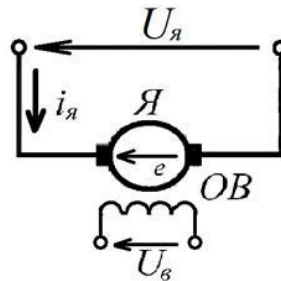


Рисунок 1. – Естественная схема включения двигателя с независимым возбуждением

Математическое описание механической характеристики двигателя постоянного тока (1) при переменном потоке нелинейно в связи с тем, что ЭДС двигателя e и электромагнитный момент $M_{\text{ос}}$ пропорциональны произведениям магнитного потока соответственно на скорость и ток якоря. Во многих случаях двигатель с независимым возбуждением работает при постоянном потоке $\Phi = \text{const}$. При этом уравнения механической характеристики необходимо линеаризовать. Тогда математическое описание динамических процессов преобразования энергии в двигателе с независимым возбуждением представляется в виде следующего уравнения механической характеристики [1, 2, 3, 4].:

$$w = \frac{U_{\text{я}}}{k\Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{k^2\Phi^2} M_{\text{ос}} - \frac{L_{\text{я}}}{k^2\Phi^2} \frac{dM_{\text{ос}}}{dt} \quad (4)$$

Подстановка $M_{\text{ос}} = k\Phi I_{\text{я}}$ в (4) дает уравнение электромеханической характеристики:

$$w = \frac{U_{\text{я}}}{k\Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{k\Phi} i_{\text{я}} - \frac{L_{\text{я}}}{k\Phi} \frac{di_{\text{я}}}{dt} \quad (5)$$

Частным результатом полученного математического описания является определение уравнения статических электромеханической и механической характеристик двигателя [1, 3]. При постоянном магнитном потоке уравнения этих характеристик с учетом выражений (4) и (5) и $dM_{\text{ос}} / dt = di_{\text{я}} / dt = 0$ запишутся в виде:

$$w = \frac{U_{\text{я}}}{k\Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{k^2\Phi^2} M_{\text{ос}} \quad (6)$$

$$w = \frac{U_{я}}{k\Phi} - \frac{R_{я}}{k\Phi} i_{я} \quad (7)$$

Рассматривая полученные уравнения (6) и (7), можно заключить, что при $\Phi = \text{const}$ электромеханическая и механическая характеристики двигателя с независимым возбуждением линейны. Поэтому положение каждой характеристики может быть охарактеризовано двумя точками: точкой идеального холостого хода, в которой $i_{я} = 0$; $M_{\text{дв}} = 0$, и точкой короткого замыкания, в которой $w = 0$. В соответствии с уравнениями (6) и (7) первой из них соответствует скорость идеального холостого хода:

$$w_0 = \frac{U_{я}}{k\Phi}, \quad (8)$$

а второй – соответствуют момент $M_{\text{к.з}}$ и ток $i_{\text{к.з}}$ короткого замыкания. Эти параметры можно определить, решив (6) и (7) относительно тока и момента. Приняв в этих уравнениях $w = 0$, получим:

$$i_{\text{к.з}} = \frac{U_{я}}{R_{я}}; \quad M_{\text{к.з}} = k\Phi \frac{U_{я}}{R_{я}}. \quad (9)$$

Теперь, обозначив $d/dt = p$, исходную систему уравнений (1) можно переписать в следующем виде:

$$\begin{aligned} U_{\text{в}} &= R_{\text{в}}(1 + T_{\text{в}}p)i_{\text{в}}; \\ U_{я} &= R_{я}(1 + T_{я}p)i_{я} + k\Phi w; \\ M_{\text{дв}} &= k\Phi w; \\ M_{\text{дв}} - M_{\text{н}} &= J_{\Sigma}pw, \end{aligned} \quad (10)$$

где $T_{\text{в}} = L_{\text{в}} / R_{\text{в}}$ – электромагнитная постоянная времени обмотки возбуждения,

$T_{я} = L_{я} / R_{я}$ – электромагнитная постоянная времени цепи якоря.

Таким образом, система уравнений (10) представляет собой математическую модель двигателя постоянного тока с независимым возбуждением при питании его от источника напряжения.

Естественные и искусственные характеристики двигателя с независимым возбуждением

Электрический двигатель проектируется и изготавливается для определенного расчетного режима, называемого номинальным режимом работы. Этот режим реализуется в схеме, которая для двигателя с независимым возбуждением приведена на рисунке 1. Она характеризуется отсутствием добавочных сопротивлений в якорной цепи и номинальным значениям напряжения $U_{я} = U_{\text{ном}}$ и потока $\Phi = \Phi_{\text{ном}}$. Электромеханическая и механическая характеристики двигателя, соответствующие этим условиям работы, называются естественными характеристиками (уравнения (6) и (7)).

Естественная механическая характеристика двигателя дает основные представления об электромеханических свойствах двигателя. Она определяет его рабочую (номинальную) скорость вращения и показывает, как изменяется скорость вращения электродвигателя при изменениях нагрузки в статических режимах работы. Чем выше модуль жесткости естественной характеристики (т.е. чем меньше ее наклон), тем более стабильна скорость вращения вала двигателя при широких пределах изменения его нагрузки, и напротив, при малой жесткости механической характеристики изменения рабочей скорости механизма при изменениях нагрузки могут быть значительными.

Для управления работой двигателя производятся необходимые изменения параметров и воздействий, определяющих его механические и электромеханические характеристики. В соответствии с (6) и (7) такими параметрами и воздействиями являются суммарное сопротивление якорной цепи $R_{я\Sigma}$, магнитный поток машины Φ , приложенное к якорной цепи напряжение $U_{я}$. Характеристики, соответствующие измененным параметрам двигателя или специальным схемам его включения, принято называть искусственными характеристиками двигателя.

Искусственные характеристики, полученные путем введения добавочных резисторов в цепь якоря, называются реостатными характеристиками двигателя. Схема включения резистора для получения реостатных характеристик представлена на рисунок 2, а. При этом суммарное сопротивление якорной цепи увеличивается:

$$R_{я\Sigma} = R_{я.доб} + R_{доб} . \quad (12)$$

Соответственно ограничивается ток короткого замыкания и увеличивается наклон статической механической характеристики.

$$I_{к.з} = \frac{U_{ном}}{R_{я.доб} + R_{доб}} . \quad (13)$$

Скорость идеального холостого хода остается неизменной $w_0 = w_{0ном}$, а между током и моментом сохраняется пропорциональность $M_{доб} = k\Phi i_{я}$. Поэтому механические и электромеханические реостатные характеристики двигателя отличаются друг от друга только масштабом по оси абсцисс.

Семейство механических и электромеханических характеристик двигателя для ряда значений $R_{доб}$ представлено на рисунок 2, б. Введение резисторов в цепь якоря двигателя является простейшим средством ограничения тока при различных переходных процессах и используется для этой цели во всех случаях при питании двигателя от сети.

Изменение потока двигателя Φ в связи с насыщением его магнитной цепи в номинальном режиме практически возможно в сторону уменьшения потока – ослабления поля двигателя. Уменьшение потока вызывает увеличение скорости идеального холостого хода w_0 и уменьшение момента короткого замыкания $M_{к.з}$, а ток короткого замыкания при этом не претерпевает изменений. Соответственно наклон статической механической характеристики увеличивается пропорционально квадрату потока. Этим объясняется характер статических характеристик двигателя при различных магнитных потоках (рисунок 3) с помощью формул (6) и (7). При рассмотрении данных характеристик следует иметь в виду, что рабочий участок характеристик двигателя ограничивается его перегрузочной способностью и, как показано на

рисунке 3, утолщенными отрезками характеристик, лежит вблизи скорости идеального холостого хода. Нетрудно видеть, что ослабление поля в пределах рабочих нагрузок приводит к увеличению скорости вращения вала двигателя.

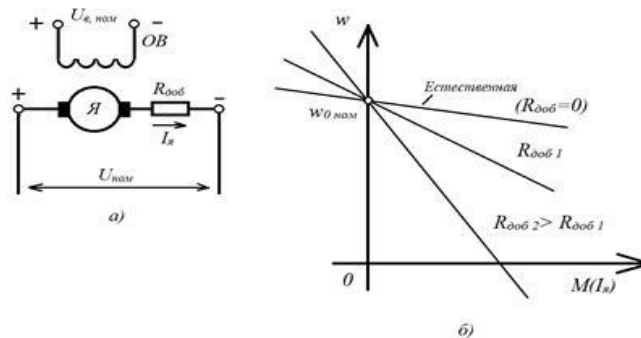


Рисунок 2. –Схема включения резистора в двигатель (а) и реостатные характеристики двигателя с независимым возбуждением (б)

Изменение напряжения, подведенного к якорю двигателя при номинальном потоке, является в регулируемом электроприводе постоянного тока основным управляющим воздействием. Как правило, изменение напряжения $U_{я}$ возможно только в сторону уменьшения по сравнению с номинальным, причем для мощных двигателей это ограничение является жестким, так как допустимое по условиям работы коллектора повышение напряжения невелико. Ряд двигателей, например, краново-металлургических серий, рассчитан на возможную работу с напряжением $U_{я} = 2U_{ном}$, $U_{я} = 2U_{ном}$, однако это является исключением из общего правила. [1, 2, 3, 4].

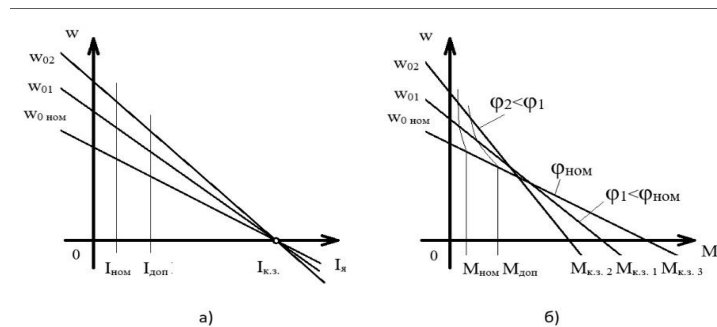


Рисунок 3. –Электромеханические (а) и механические (б) характеристики двигателя с независимым возбуждением при ослаблении поля

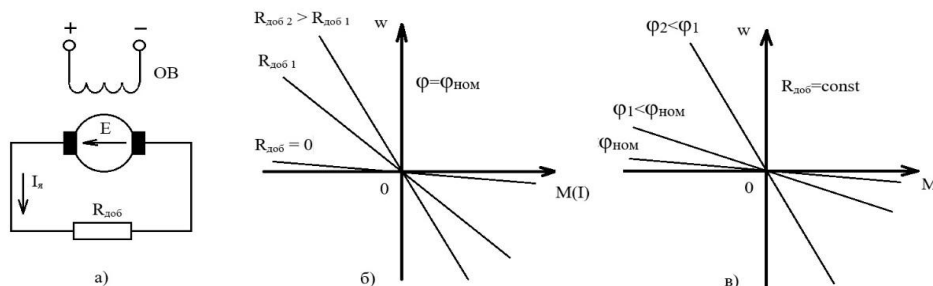


Рисунок 4. –Схема включения (а) и характеристики двигателя с независимым возбуждением (б, в)

Увеличение сопротивления якорной цепи $R_{я\Sigma}$ из-за введения добавочных сопротивлений $R_{доб}$ увеличивает наклон механических характеристик в режиме динамического торможения также, как и в двигательном режиме. Аналогично изменяется наклон механических характеристик динамического торможения и при ослаблении поля двигателя. Механические характеристики, соответствующие различным $R_{доб}$, представлены на рисунке 4б, а при ослаблении поля – на рисунке – 4в. Электромеханические характеристики при введении сопротивлений отличаются от механических только масштабом по оси абсцисс (рисунок 4б). При изменении величины магнитного потока коэффициент пропорциональности между током и моментом для различных характеристик неодинаков, поэтому на рисунке 4в представлены только механические характеристики, а подобные им по форме электромеханические не показаны [1, 2, 3, 4].

Разработка виртуальной модели двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Виртуальная модель двигателя постоянного тока с независимым возбуждением в среде *Matlab* (рисунок 5) состоит из блока с заданными передаточными функциями *Transfer Fcn* и усилителей *Gain*. На вход модели подается постоянное напряжение разных уровней: 27, 270 и 540 В. Число оборотов вала двигателя задается в две ступени – при запуске равно 800 об/мин, а через 0.2 секунды после запуска оно возрастает до 1200 об/мин. Данные параметры задаются внешним блоком *Step*.

На рисунке 5 приняты следующие обозначения:

- V – напряжение, подаваемое на двигатель (27, 270 и 540 В);
- L – индуктивность (0,001 Гн);
- R – активное сопротивление (0,1 Ом);
- C_w – коэффициент связи между скоростью и ЭДС (10);
- C_m – коэффициент связи между током якоря и электромагнитным моментом (10);
- J – суммарный момент инерции якоря и нагрузки (10 кг м²);
- $F \cdot i$ – произведение потока, создаваемого обмоткой возбуждения и током якоря (1);
- Step Ms* – блок, реализующий момент сопротивления движению, через него задается скорость вращения (800 и 1200 об/мин);
- Feedback* – блок, реализующий обратную связь, сигнал подается на регулятор.

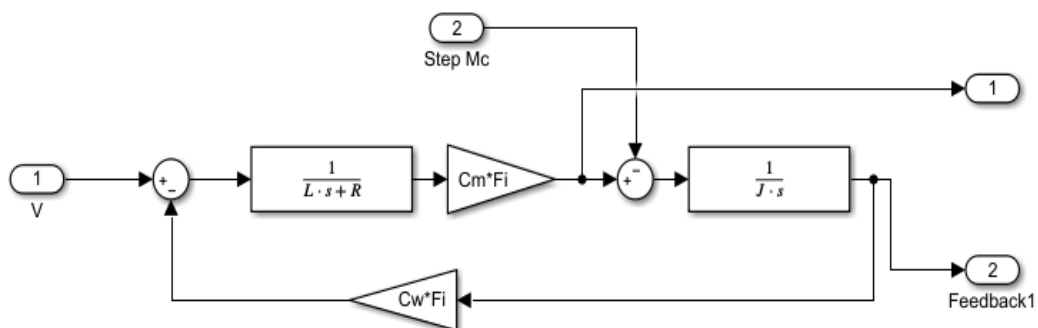


Рисунок 5. –Виртуальная модель двигателя постоянного тока с независимым возбуждением в программе *Matlab*

Данная модель позволяет выполнять имитационное моделирование режимов работы двигателя при различных управляющих воздействиях и возмущениях.

Адаптивный контур двигателя постоянного тока с применением элементов нечеткой логики

Адаптивный контур является сложным объектом с плохо изученной динамикой [5,6,7]. Поэтому целесообразно реализовывать его, применяя искусственный интеллект. Условия работы данных объектов недостаточно известны, существенно непостоянны (с дрейфом параметров и характеристик объекта и среды эксплуатации). В таких условиях обыкновенные неадаптивные системы управления неработоспособны, либо работают неудовлетворительно, требуя постоянного квалифицированного наблюдения [5, 6, 7, 8].

Предлагается систему управления двигателя постоянного тока с независимым возбуждением с нечетким адаптивным контуром (рисунок 6) реализовать с помощью адаптивного регулятора (ТЛПА) и нечеткого регулятора (ТЛП). При такой структуре изменение параметров объекта управления, выходящих за допустимые пределы, существенно не влияет на выходные параметры объекта.

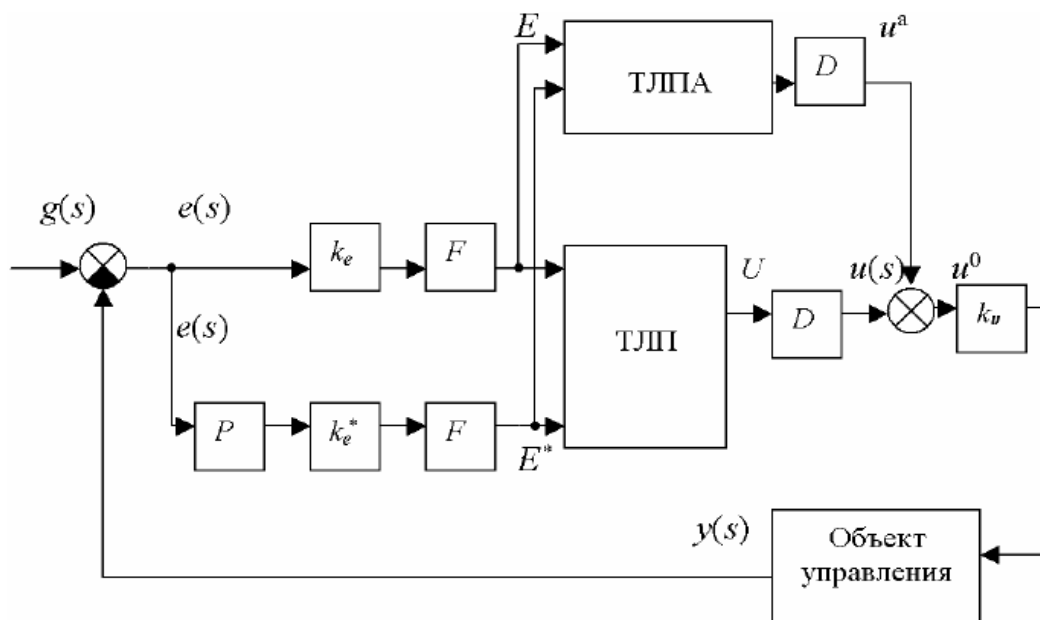


Рисунок 6. – Структурная схема нечеткого адаптивного контура.

На рисунке приняты следующие обозначения: $y(s)$ – выходная переменная; $g(s)$ – заданное значение желаемого сигнала (управляющее воздействие); $e(s)$ – сигнал рассогласования; P – дифференциатор; ТЛП – таблица нечетких лингвистических преобразований; k_e , k_e^* , k_u – масштабные коэффициенты; E , E^* , U – универсальные множества; ТЛПА – таблица лингвистических преобразований адаптивной системы; D – дефазификатор; F – преобразователь текущего значения рассогласования и производной от рассогласования в лингвистические значения.

Выходная переменная объекта регулирования $y(s)$ сравнивается с заданным значением $g(s)$, сигнал рассогласования $e(s)$ поступает в масштабный элемент с коэффициентом k_e и в дифференциатор P , вход которого умножается на k_e^* в масштабном элементе. Блоки F предназначены для преобразования текущих значений рассогласования и производной от рассогласования (скорости изменения рассогласования) в их лингвистические значения (фаззификации) [9, 10, 11].

Создание правил нечеткой логики

Нечеткая логика – это раздел искусственного интеллекта, представляющая собой набор нестрогих правил, созданных для регулирования выходного сигнала в заданных пределах, исходя из постоянно меняющихся входных данных. Законы нечеткой логики могут работать и обеспечивать заданное качество процессов управления при всех режимах работы двигателя постоянного тока, в отличие от линейных законов, которые эффективны только при определенном режиме работы. Работа нечеткого регулятора основана на системе правил, отражающих взаимосвязь выходного сигнала от входных данных [5, 6, 12, 13].

Для каждого входа задаются диапазоны значений и количество кривых регулирования. В исследуемой системе два входных сигнала: ошибка (e) и производная ошибки по времени (de/dt) с диапазоном значений $[-1 \ 1]$. Выходной сигнал – переменная « u » с диапазоном значений $[-10 \ 10]$.

На рисунках 7, 8а приведен пример правил нечеткой логики, где наглядно представлена структура блока нечеткой логики, входные (e и de) и выходные (U_a) данные, а на рисунке 8б – визуальное представление следующей структуры правил нечеткой логики [12, 13]:

```
[Input1]
Name='e'
Range=[-1 1]
NumMFs=3
MF1='N':'trimf',[-1.8 -1 -0.2]
MF2='Z':'trimf',[-0.8 0 0.8]
MF3='P':'trimf',[0.2 1 1.8]
```

```
[Input2]
Name='de'
Range=[-10 10]
NumMFs=3
MF1='N':'trimf',[-18 -10 -2]
MF2='Z':'trimf',[-8 0 8]
MF3='P':'trimf',[2 10 18]
```

```
[Output1]
Name='Ua'
Range=[-1 1]
NumMFs=3
MF1='N':'trimf',[-1.8 -1 -0.2]
MF2='Z':'trimf',[-0.8 0 0.8]
MF3='P':'trimf',[0.2 1 1.8]
```

```
[Rules]
1 1, 3 (1) : 1
2 1, 3 (1) : 1
3 1, 2 (1) : 1
1 2, 2 (1) : 1
2 2, 2 (1) : 1
3 2, 2 (1) : 1
1 3, 2 (1) : 1
2 3, 1 (1) : 1
3 3, 1 (1) : 1
```

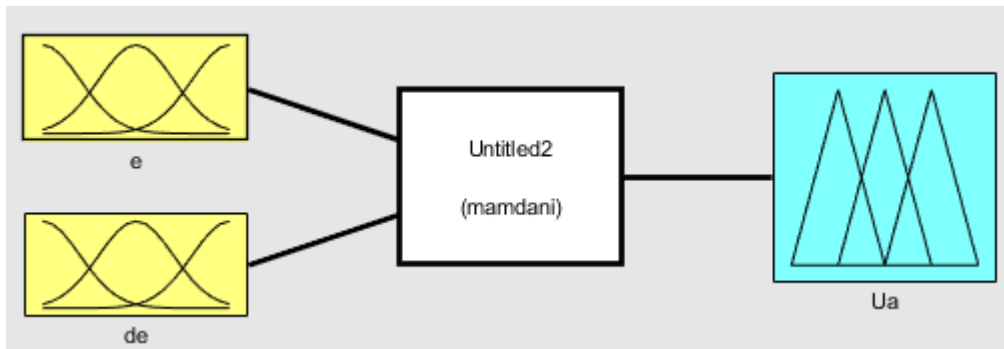


Рисунок 7. – Структура блока нечеткой логики в среде *Matlab*

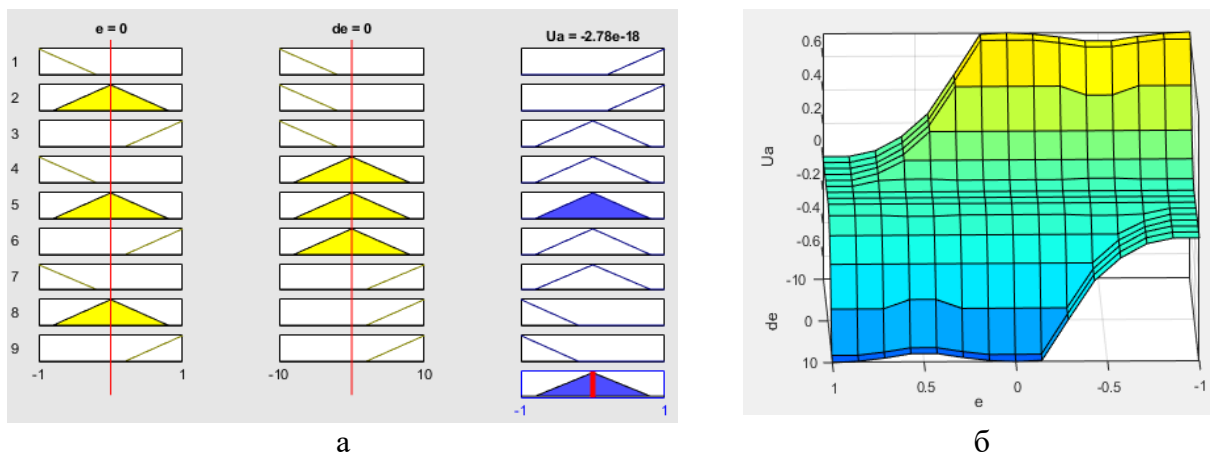


Рисунок 8. – Правила нечеткой логики в среде *Matlab*

Исследованиями установлено, что для данной структуры оптимальным является использование девяти правил (рисунок 8а). Количество правил может изменяться в зависимости от сложности регулируемого объекта и желаемой точности управляющего сигнала. Из рисунка 8б видно, что использование девяти правил оптимально для данного двигателя, так как ошибка рассогласования управляющего и желаемого сигналов минимальна (см. рисунок 8б диапазон $-0.6 + 0.2$ – зеленая область). Дальнейшее увеличение числа правил на величину рассогласования не влияет, но увеличивается время регулирования и увеличивается диапазон положительной и отрицательной ошибок.

Адаптивный контур регулятора двигателя постоянного тока

Адаптивная система – это система (контур), которая автоматически изменяет алгоритм своей работы, иногда может изменять свою структуру для достижения оптимального состояния при изменении внешних условий.

Адаптивный контур регулирования представлен на рисунке 9, а общая схема двигателя постоянного тока с независимым возбуждением с адаптивным нечетким управлением на рисунке 10.

Адаптивный контур (рисунки 9-10) реализуется в среде *Matlab* с помощью следующих блоков:

V – напряжение, подаваемое на двигатель (27, 270 и 540 В);

Feedback – блок, реализующий обратную связь, сигнал подается с двигателя постоянного тока независимого возбуждения;

Fuzzy Logic Controller – блок, содержащий правила нечеткой логики.

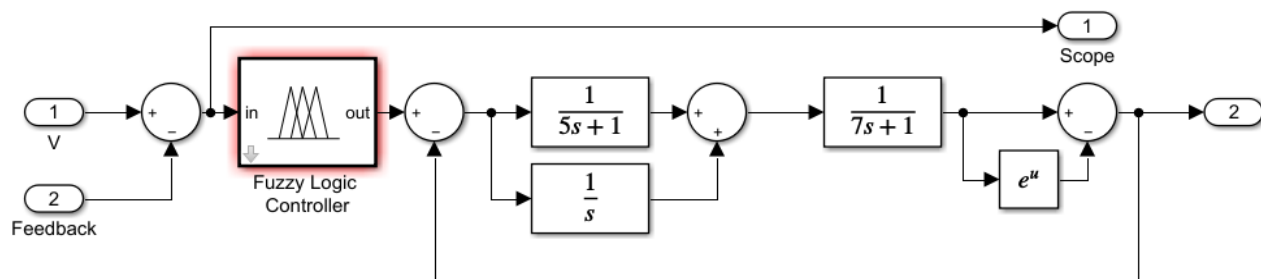


Рисунок 9. – Схема адаптивного контура с нечеткой логикой в среде *Matlab*

При разработке виртуальной модели регулятора с нечеткой логикой используется блок *Fuzzy Logic Controller*. В этом блоке задается ссылка на *fis*-файл с правилами нечеткой логики для управления двигателем постоянного тока.

Смысл адаптивного контура состоит в обработке и сравнении сигнала обратной связи с выхода двигателя постоянного тока и входного напряжения, пропускания полученной разницы сигналов через блок нечеткого регулирования (в данном блоке происходит уменьшение ошибки управляющего сигнала согласно правилам) и дальнейшем преобразовании через цепь блоков для уменьшения производной ошибки по времени (улучшение быстродействия).

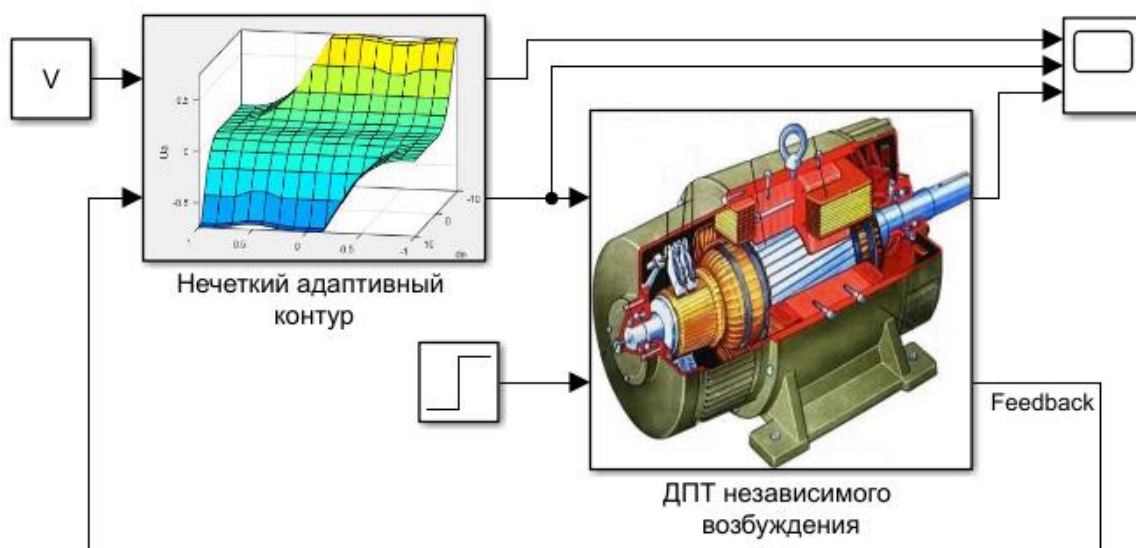


Рисунок 10. – Схема ДПТ НВ с нечетким адаптивным регулятором в среде *Matlab*

Схема (рисунок 10) позволяет провести имитационное моделирование процессов управления двигателем и оценить качество управления нечеткого адаптивного контура с точки зрения минимальных энергозатрат на управление. Последнее весьма актуально при управлении мощными электроприводами на основе рассматриваемого двигателя.

Результаты. Исследование эффективности работы нечеткого адаптивного контура проводилось при изменении напряжения на обмотке возбуждения (27, 270, 540В), изменении сопротивления обмотки якоря R, при фиксированных оборотах вала двигателя 800 и 1200об/мин. Результаты исследований анализировались во временной и частотной областях (таблицы 1-4, рисунки 11-16). Имитационное моделирование выполнялось в среде *Matlab*.

Таблица 1. – Графики выходного сигнала контура (напряжение) и оборотов двигателя при напряжениях питания 27В, 270В и 540В

Параметры		Графики
Напряжение питания 27В	Напряжение	
	Оборотов двигателя	
Напряжение питания 270В	Напряжение	
	Оборотов двигателя	
Напряжение питания 540В	Напряжение	
	Оборотов двигателя	

Таблица 2. – Характеристики ДПТ НВ при частоте 800 об/мин

Напряже ние	Характеристика напряжения			Характеристика оборотов		
	Величина перерегули рования	Разница амплитудн ых значений	Время регулирова ния	Величина перерегули рования	Разница амплитудн ых значений	Время регулирова ния
27U	0.82	28.13	0.075	17	936.0261	0.1
270U	0.08	271.1	0.075	17	936.0261	0.1
540U	0.03	541.1	0.075	17	936.0261	0.1

Таблица 3. – Характеристики ДПТ НВ при частоте 1200 об/мин

Напряже ние	Характеристика напряжения			Характеристика оборотов		
	Величина перерегули рования	Разница амплитудн ых значений	Время регулирова ния	Величина перерегули рования	Разница амплитудн ых значений	Время регулирова ния
27U	1.17	28.63	0.8	17	1405.0863	0.1
270U	0.11	271.6	0.8	17	1405.0863	0.1
540U	0.05	541.6	0.8	17	1405.0863	0.1

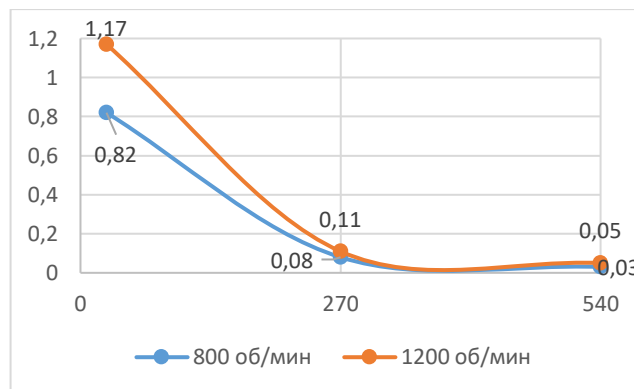


Рисунок 11. – График величины перерегулирования при изменении напряжения 27-540В и частоте 800 и 1200 об/мин

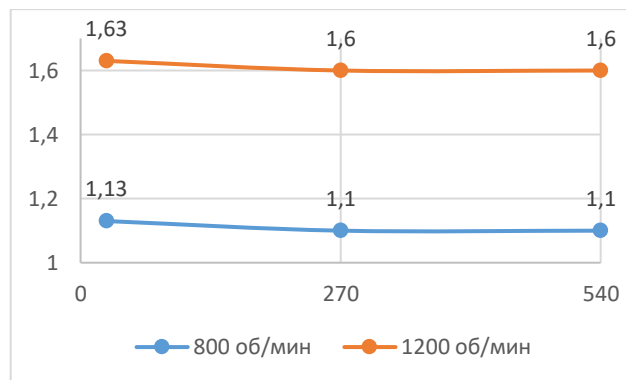


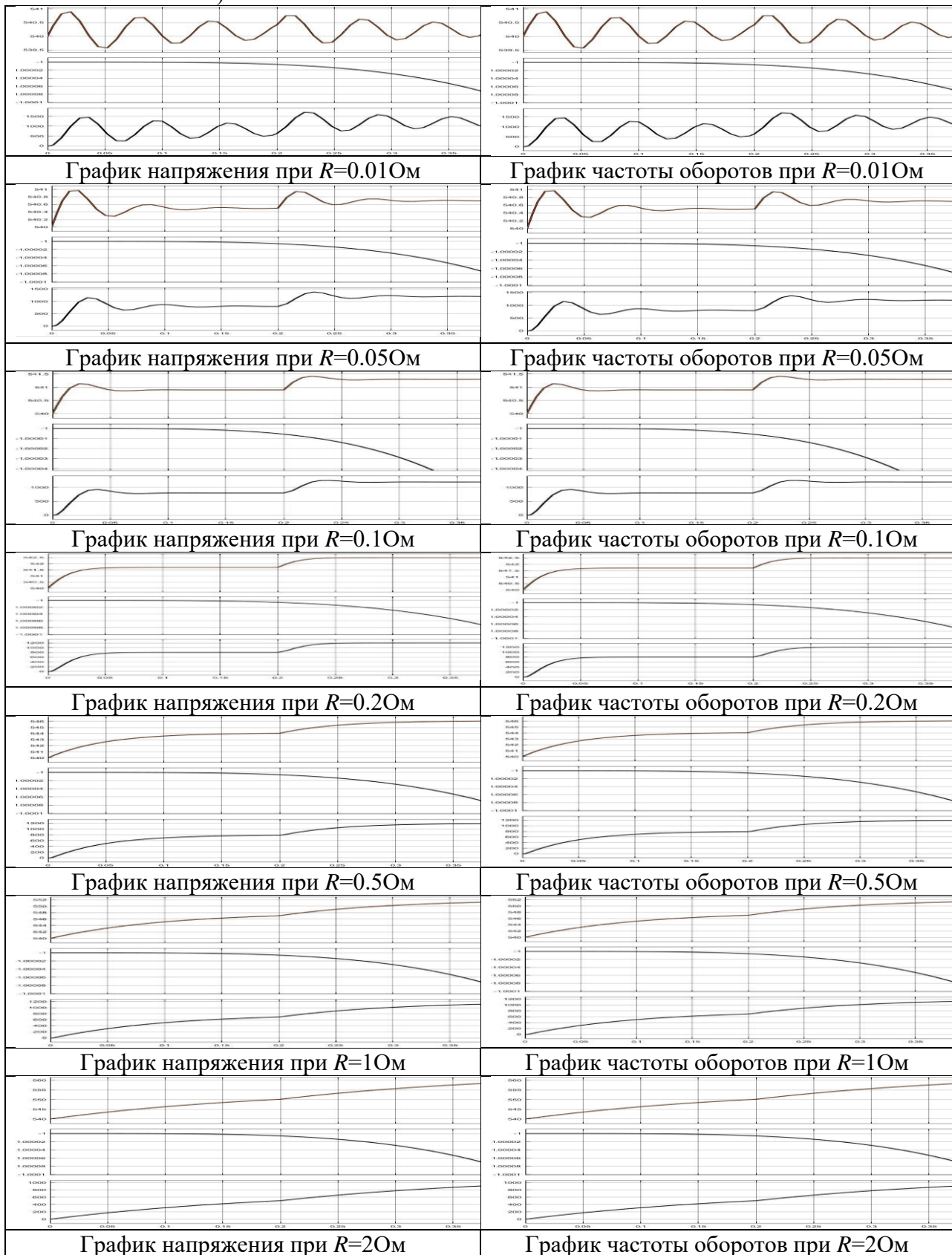
Рисунок 12. – График разницы амплитудных значений при изменении напряжения 27-540В и частоте 800 и 1200 об/мин

Согласно таблицам 1–3 можно сделать следующие выводы:

- величина перерегулирования уменьшается с увеличением входного напряжения, частота оборотов не имеет существенного влияния;
- время регулирования постоянно и не изменяется при повышении напряжения и оборотов;
- разница амплитудных значений при повышении напряжения находится в допустимых пределах погрешности $\pm 5\%$.

Для исследования качества работы адаптивного нечеткого контура изменим сопротивление якоря R в пределах от 0.01 до 2 Ом. Графики исследования приведены в таблице 4.

Таблица 4. – Графики работы адаптивного нечеткого контура при изменении сопротивления (напряжение постоянно 540В, частота оборотов 800 и 1200 об/мин)



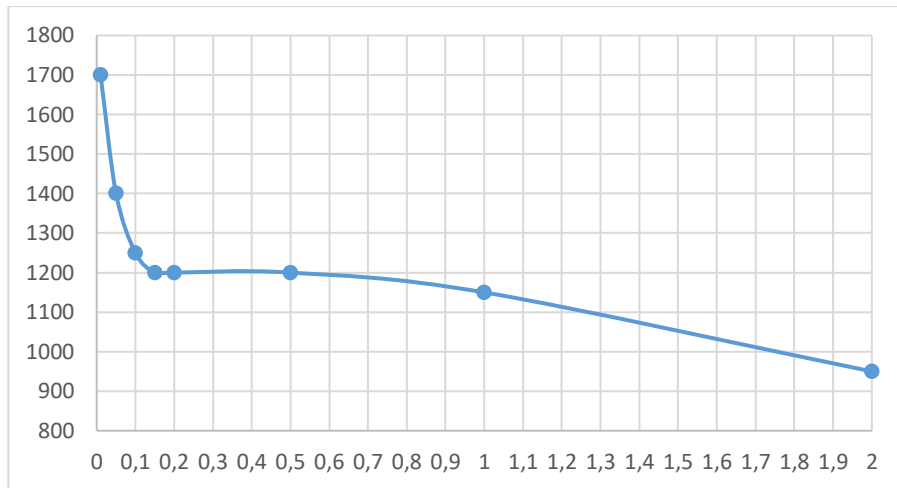


Рисунок 13. – График зависимости изменения частоты вращения при изменении сопротивления R ($V=540В$)

При изменении сопротивления в пределах от 0.01 до 2 Ом естественным образом возрастает напряжение и достигает предельного значения в 560 В.

При значении 0.01 Ом частота оборотов не устанавливается из-за не затухающих колебаний, напряжение меняется в пределах 539.5-541 В.

При значении 0.05 Ом частота оборотов устанавливается без колебаний на 0.15 и 0.35 секундах для 800 и 1200 об/мин соответственно, напряжение меняется в пределах 540-541 В с незначительными колебаниями.

При значении 0.1 Ом частота оборотов устанавливается без колебаний на 0.07 и 0.27 секундах для 800 и 1200 об/мин соответственно, напряжение меняется в пределах 540-541.5 В.

При значении 0.15 Ом частота оборотов устанавливается без колебаний на 0.05 и 0.25 секундах для 800 и 1200 об/мин соответственно, напряжение меняется в пределах 540-542 В.

При значении 0.2 Ом частота оборотов устанавливается без колебаний на 0.06 и 0.25 секундах для 800 и 1200 об/мин соответственно, напряжение меняется в пределах 540-542.5 В.

При значении 0.5 Ом частота оборотов устанавливается без колебаний на 0.2 и 0.35 секундах для 800 и 1200 об/мин соответственно, напряжение меняется в пределах 540-546 В.

При значении 1 Ом частота оборотов не устанавливается до значения 800 об/мин в течении 0.2 секунд и до 1200 об/мин в течении 0.4 секунд, напряжение меняется в пределах 540-552 В.

При значении 2 Ом частота оборотов не устанавливается до значения 800 об/мин в течении 0.2 секунд и до 1200 об/мин в течении 0.4 секунд, напряжение меняется в пределах 540-560 В.

Диапазон сопротивления 0.1-0.5 Ом является оптимальным для повышения качества работы двигателя постоянного тока (согласно рисунку 13), так как отсутствует колебательность, перерегулирование в допустимых пределах, максимальная величина ошибки составляет 1.5%.

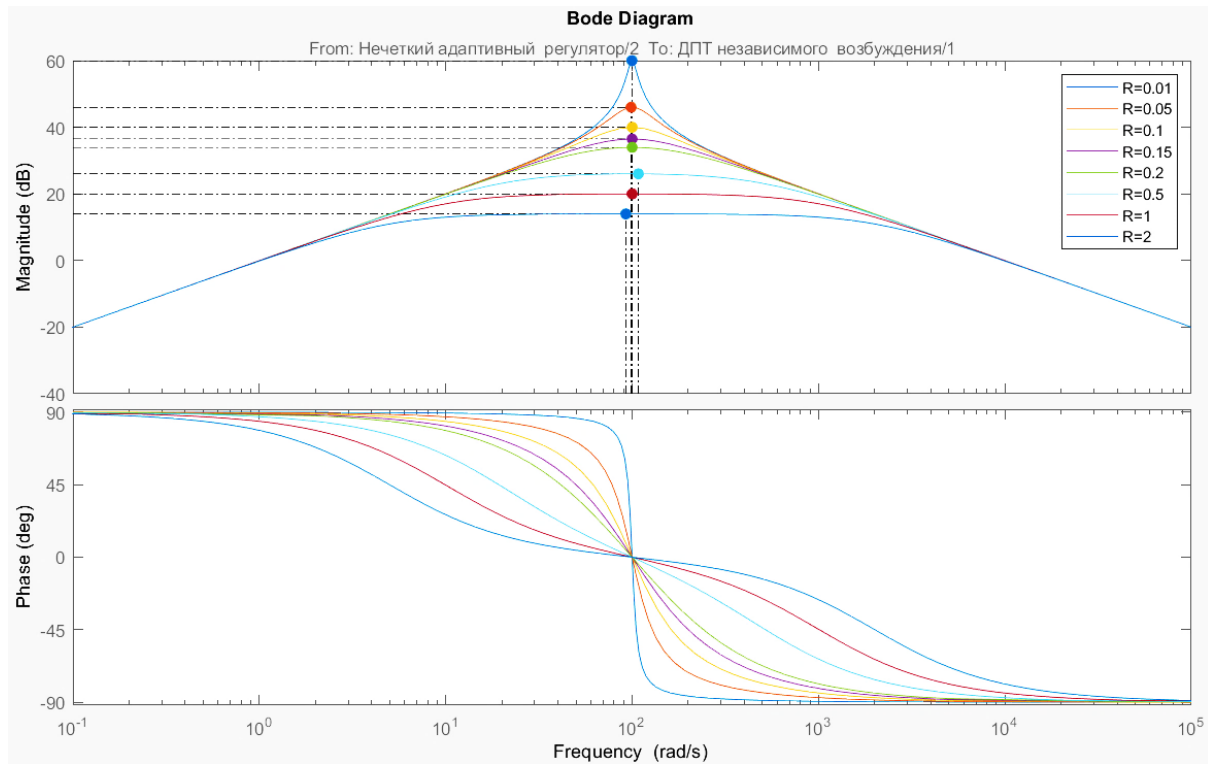


Рисунок 14. – АЧХ и ФЧХ характеристики при изменении сопротивления R (напряжение постоянно 540В, частота оборотов 800 и 1200 об/мин)

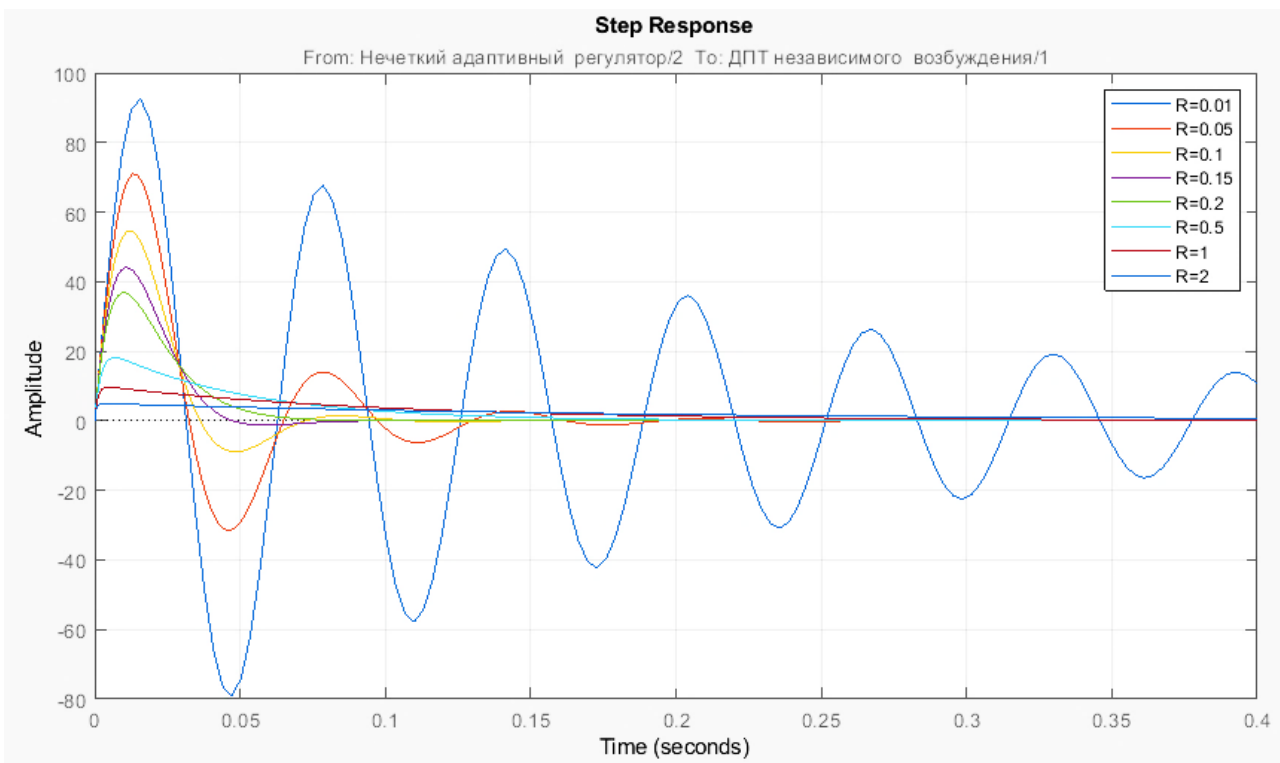


Рисунок 15. – Переходные характеристики при изменении сопротивления R (напряжение постоянно 540В, частота оборотов 800 и 1200 об/мин)

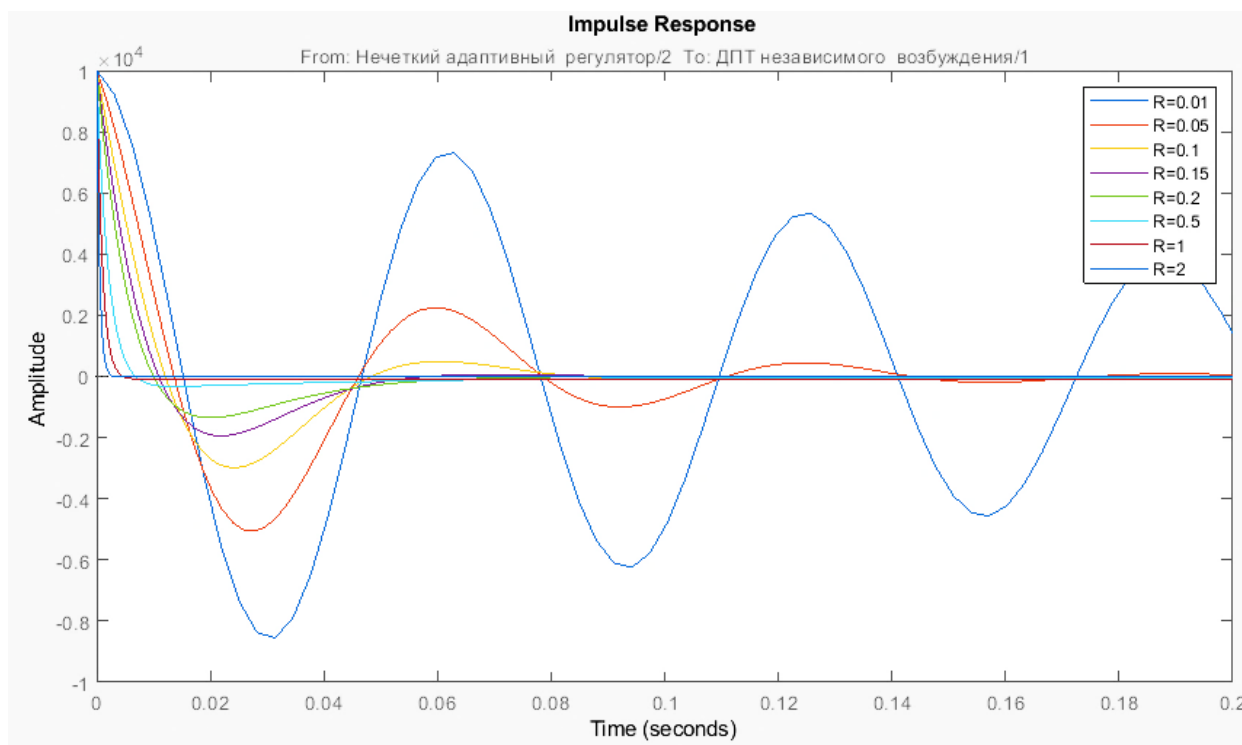


Рисунок 16. – Импульсные характеристики при изменении сопротивления R (напряжение постоянно 540В, частота оборотов 800 и 1200 об/мин)

Качество работы адаптивного нечеткого контура было исследовано во временных, частотных и импульсных областях (рисунки 14-16), чтобы удостовериться в пределах оптимального диапазона сопротивления 0.1-0.5 Ом.

По результатам исследований (рисунки 14-16) можно сделать следующие выводы: время регулирования сокращается до 0.04с, время отклика системы на дельта-функцию уменьшается приблизительно в 1,35-1,52 раза (быстродействие увеличилось), запас устойчивости системы по амплитуде превышает требуемый (6 дБ) в 3,2 раза.

Таким образом, результаты исследования адаптивного нечеткого контура свидетельствуют о его эффективности при управлении двигателем постоянного тока с независимым возбуждением, работающим при различной величине оборотов вала двигателя и изменении сопротивления цепи якоря.

Заключение. Целью данной работы является разработка и исследование нечеткого адаптивного контура для управления работой двигателя постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ).

В качестве объекта исследования выбран электродвигатель постоянного тока независимого возбуждения.

В ходе работы разработана математическая и имитационная модель двигателя постоянного тока, нечеткого и адаптивного регуляторов в среде *Matlab* и проведены исследования эффективности работы нечеткого адаптивного контура.

Разработанная имитационная модель состоит из двух основных частей: блок нечеткого адаптивного контура и блок двигателя постоянного тока независимого возбуждения. Выполнены исследования работы двигателя с нечетким адаптивным контуром при изменении напряжения питания, сопротивления обмотки якоря при повышении оборотов вала двигателя с 800 до 1200 об/мин. По результатам исследований представлены графики качества управления и таблицы результатов исследований. Полученные результаты позволили сделать

вывод о преимуществах нечеткого адаптивного контура для управления двигателем по следующим критериям: время регулирования, величина ошибки, запас устойчивости по амплитуде.

Сформирован подход по определению оптимального количества правил нечеткого регулятора в составе адаптивного контура. Показано, что девять правил являются оптимальным количеством для данного двигателя, так как ошибка рассогласования управляющего и желаемого сигналов минимальна. Дальнейшее увеличение числа правил практически не влияет на эффективность управления. Использование девяти правил нечеткого адаптивного контура оптимально с точки зрения минимальных энергозатрат на управление. Последнее весьма актуально при управлении мощными электроприводами на основе рассматриваемого двигателя.

Имитационная модель позволяет без аппаратной реализации определить оптимальные условия управления двигателем для различных режимов его использования.

Список литературы

[1.] Математическое описание двигателя постоянного тока с независимым возбуждением // Дальневосточный государственный технический университет. – Режим доступа: <https://studfiles.net/preview/5396869/>. – Дата доступа: 05.11.2019.

[2.] Studfiles.net [Электронный ресурс] / Математическое описание двигателя постоянного тока с независимым возбуждением / –Дальневосточный государственный технический университет. – Режим доступа: <https://studfiles.net/preview/5396869/>. – Дата доступа: 05.11.2019.

[3.] Математическое обеспечение систем диагностирования канала генерирования авиационных систем электроснабжения / О.Г. Карачун, К.В. Терещенко, К.В. Бунас «Гагаринские чтения – 2019»: Сборник тезисов докладов. – Москва: МАИ, 2019. – С. 703.

[4.] Леоненков, А. Ю. Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTech / А.Ю. Леоненков. – Санкт-Петербург: БХВ, 2003. – 720 с.

[5.] GotAI.NET [Электронный ресурс] / Введение в нечеткую логику и системы нечеткого управления / П. Баер, С. Новак, Р. Винклер. – Режим доступа: <http://www.gotai.net/documents/doc-1-fl-001.aspx>. – Дата доступа: 05.11.2019.

[6.] Терещенко, К.В. Эффективность управления двигателем постоянного тока при использовании интеллектуальных и ПИД-регуляторов / Молодежь в науке: Новые аргументы [Текст]: Сборник научных работ X Международного молодежного конкурса (Россия, г. Липецк, 1 марта 2019 г.). Секции 1 – 3 (начало) / Отв. ред. А.В. Горбенко. — Липецк: Научное партнерство «Аргумент», 2019. — С. 53-56.

[7.] Tsiareshchanka K. Simulation of the aviation synchronous generator with a fuzzy logic controller in the Matlab / Proceedings of International scientific conference “Universum N VI”. Morrisville, Lulu Press., 2019. P. 9-13.

[8.] Рутковский, В.Ю. Физически реализуемый алгоритм адаптивного управления с эталонной моделью / В.Ю. Рутковский, В.М. Глумов, В.М. Суханов: Автоматика и телемеханика. – Москва, 2011. – №8. – 96-108 с.

[9.] Земляков, С.Д. Алгоритм функционирования адаптивной системы с эталонной моделью, гарантирующий заданную динамическую точность управления нестационарным динамическим объектом в условиях неопределенности / С.Д. Земляков, В.Ю. Рутковский: Автоматика и телемеханика. – 2009. – № 10. – 35-44 с.

[10] Маслолюбов, Ю. П. Введение в Neural Network Toolbox / Ю.П. Маслолюбов / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/neuralnetwork/book1/index.php>. – Дата доступа: 05.11.2019.

[11] Терещенко, К.В. Адаптивная система с эталонной моделью для управления объектами электропривода / Международный сборник научных трудов молодых ученых, докторантов, магистрантов и студентов / под науч. ред. Ш.А. Курманбаевой. – Семей: КазГЮИУ, 2019 -№6.- С. 178-181.

[12] Терещенко, К.В. Адаптивная система с эталонной моделью для управления объектами электропривода / Молодежь в науке: Новые аргументы [Текст]: IV Международный молодежный сборник научных статей (Россия, г. Липецк, 26 апреля 2019 г.). Часть I / Отв. ред. А.В. Горбенко. — Липецк: Научное партнерство «Аргумент», 2019. — С 35-40.

[13] Разработка инструментария анализа и оценки бортовых систем (блоков, агрегатов) современных и перспективных воздушных судов: Отчет о НИР (заключит.) / БГАА; Руководитель А. Г. Капустин.– ГР №20171838; – Минск, 2019. – 205с.– Исполнители Н.С. Карнаухов, Е.В. Балич, К.В. Бунас, О.Г. Карачун, К.В. Терещенко и др

CONTROL OF DC MOTOR USING A FUZZY ADAPTIVE CIRCUIT

K.V. Tsiarshchenko

*Cadet of the Belarusian State Academy of
Aviation*

A.G. Kapustin

*Professor Department of General
Professional Disciplines, Belarusian State
Academy of Aviation, Candidate of Technical
Sciences, Associate Professor*

*Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
E-mail: kokovita13@gmail.com*

Abstract. The purpose of this work is the development and study of a fuzzy adaptive circuit for controlling the operation of an independent excitation direct current motor (DC IE). To achieve this goal, the following tasks were solved: the mathematical and simulation models of a DC motor of independent excitation were developed; a simulation model of a fuzzy adaptive circuit consisting of fuzzy and adaptive regulators is developed; the problem of determining the optimal number of rules for a fuzzy controller is solved; Studies are carried out and on their basis an analysis of the effectiveness of controlling a DC motor of independent excitation is carried out.

The research methods used in the work: the theory of structural-functional analysis, the methods of mathematical and simulation modeling, the theory of fuzzy sets, the theory of experiment.

Keywords: Adaptive fuzzy circuit, fuzzy logic rules, fuzzy logic, speed control, DC motor of independent excitation.