

характер изменения динамических моментов. Каждому варианту переходных процессов, соответствует оптимальный нагрузочный режим двигателя.

Для графика скорости, реализуемого при  $M_{п(асим)} = M_{т(асим)}$ , допустимая величина пускового и

тормозного моментов не зависит от статической нагрузки и соответствует области значений  $(\sqrt{1/\xi}, \sqrt{3/\xi})M_{п}$ .

В случае, когда пуск и замедление осуществляются при равных ускорениях, оптимальное значение пускового момента составляет  $M_{п0(сим)}^{max} \approx 1,41 M_{п0(асим)}^{max}$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бычков В.П. Электропривод и автоматизация металлургического производства. – М.: Высшая школа, 1977. – 391 с.

2. Иванченко Ф.К. Динамика и прочность прокатного оборудования. – М.: Металлургия, 1970. – 487 с.

Поступила 23.12.2009 г.

УДК 621.3.07

### ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА С НЕЧЁТКИМ РЕГУЛЯТОРОМ

С.В. Ланграф, А.И. Сапожников, А.С. Глазырин, Л.Е. Козлова, Т.А. Глазырина, В.В. Тимошкин, К.С. Афанасьев

Томский политехнический университет

E-mail: epeo@elti.tpu.ru

Проведён сравнительный анализ динамики электропривода с классическим и нечётким регуляторами, показаны преимущества применения нечёткой логики в автоматическом регулировании электроприводами.

#### Ключевые слова:

Динамика электропривода, нечёткая логика, нечёткий регулятор, фаззификация, дефаззификация.

#### Key words:

Dynamics of drive, fuzzy logic, fuzzy controller, fuzzification, defuzzification.

С развитием производства и появлением новых технологий ужесточаются требования, предъявляемые к электроприводам постоянного тока. Современные технологические процессы требуют разработки электроприводов, имеющих повышенную быстроту реакции, точность и способность к быстрой адаптации при изменении режимов работы.

В последнее время в мировой практике начинают применяться новые нетрадиционные методы управления, включающие нечёткую логику, нейронные сети, экспертные системы и другие управляющие средства с элементами искусственного интеллекта.

В данной статье произведено исследование следящего электропривода (СЭП) с различными системами управления. На примере комплектного электропривода подачи металлорежущего станка модели ИС500ПМФ4 выполнена сравнительная оценка функционирования стандартной трёхконтурной системы управления с обычными регуляторами и системы управления с нечётким регулятором.

Следящий электропривод подачи металлорежущего станка модели ИС500ПМФ4 выполнен на базе комплектного электропривода подачи ЭПУ1-24047П УХЛ4, включающего высокомоментный электродвигатель типа 2ПБВ132МУХЛ4. Настройка системы автоматического управления

(САУ) СЭП на третью точку для структуры СЭП типа 2а с П-регулятором положения рассчитана по методике, изложенной в [1].

Для многих промышленных процессов сложно обеспечить точное управление так как они обычно являются многомерными, нелинейными и изменяющимися во времени. Управление на основе нечёткой логики может успешно применяться для таких процессов. Кроме того, нечёткие регуляторы могут работать с неполностью описанными системами с неизвестной динамикой, так как для них (в отличие от многих традиционных адаптивных регуляторов) не требуется априорная математическая модель объекта управления. Ещё одно преимущество нечётких регуляторов состоит в том, что они могут быть легко реализованы на цифровых или аналоговых микросхемах, в которых информация может передаваться по параллельно-распределённой схеме.

Применительно к исследуемой САУ СЭП, в качестве объекта управления следует рассматривать контур тока и механическую часть электропривода в стандартной структуре (тиристорный преобразователь и якорную цепь электродвигателя). Для устранения влияния обратной связи по ЭДС в систему введена компенсационная положительная обратная связь.

В качестве управляемой величины рассматривается перемещение стола подачи  $L$ . На рис. 1 представлена упрощенная структурная схема САУ СЭП с нечётким регулятором и замкнутый контур тока как объект управления ОУ. На вход системы поступает задание  $L_{зад}$ , которое сравнивается с текущим состоянием объекта  $L_{oc}$ , приходящим по цепи обратной связи. Полученное значение ошибки  $\Delta L_{oc}$  приходит на один из входов нечеткого регулятора НР. На второй вход поступает производная от ошибки  $dL_{oc}/dt$ . В соответствии с входными значениями и принятой стратегией управления нечёткий регулятор НР формирует управляющее воздействие  $U_{упр}$ , приложенное к объекту управления ОУ. Объект управления ОУ обрабатывает приложенный сигнал  $U_{упр}$ . В результате получена замкнутая нелинейная САУ СЭП с нечётким регулятором положения.

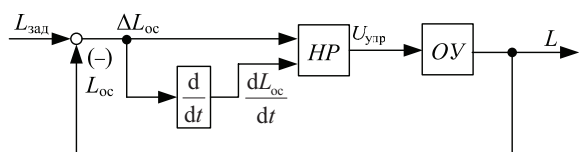


Рис. 1. Упрощенная структурная схема САУ СЭП с нечётким регулятором

Упрощенная схема нечёткого регулятора представлена на рис. 2.

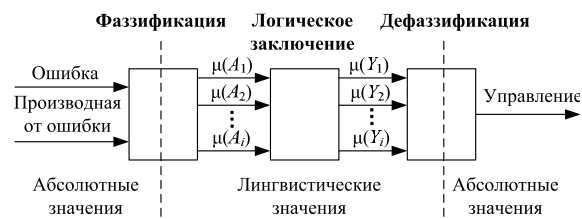


Рис. 2. Упрощенная схема нечёткого регулятора

Согласно теории нечётких САУ, работу нечёткого регулятора можно условно разбить на три этапа:

1. Фаззификация – преобразование входных абсолютных значений в лингвистические.
2. Логическое заключение с использованием предварительно составленной базы знаний.
3. Дефаззификация – преобразование выходных лингвистических значений в абсолютные.

Фаззификацию рассмотрим на примере преобразования величины ошибки, рис. 3. Абсолютное значение ошибки преобразуется в лингвистическое, представленное пятью термами. Термом принято называть функцию принадлежности некоторого множества, определённого на указанном промежутке. Применительно к рис. 3 это значит, что лингвистическая переменная «ошибка» определяется пятью множествами: «большая положительная» (БП), «положительная» (П), «нулевая» (Н), «отрицательная» (О), «большая отрицательная» (БО).

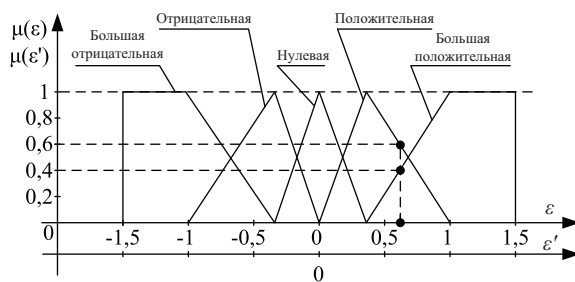


Рис. 3. Фаззификация ошибки и скорости изменения ошибки

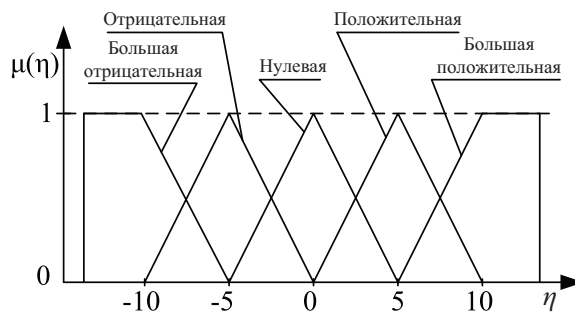


Рис. 4. Термы выходной координаты

Каждое абсолютное значение ошибки определяет для данных множеств комбинацию степеней принадлежности. Например, на рис. 3 ошибка равна 0,6 в относительных единицах. Это значит, что степень принадлежности терма «положительная» равна 0,6, а терма «положительная большая» – 0,4. Для данного случая степени принадлежности остальных термов равны нулю.

Фаззификации подвергаются все входные переменные, с которыми работает нечёткий регулятор.

Число термов, их форма и область определения формируются из условий получения требуемого закона управления. В нашем случае предполагаем для входных переменных ошибки и её производной использование 5 – терм-множеств. Промежутки определения принимают исходя из входных максимальных абсолютных значений.

Логическое заключение предполагает формирование выходной лингвистической переменной с помощью предварительно составленной базы знаний (рис. 4).

База знаний составляется опытным экспертом из прикладной области на основании ассоциативных правил и заключений, которыми бы стал пользоваться человек-оператор при управлении данным процессом. Как правило, подобная задача решается путём составления нечётких ассоциативных правил, оформленных в виде таблицы или в текстовой форме. Для нашего случая, с учётом накопленного экспертного опыта и здравого смысла, база знаний состоит из 25 правил и в матричной форме имеет вид, представленный на рис. 5.

В клетках матрицы базы знаний вписаны названия термов выходной лингвистической переменной.

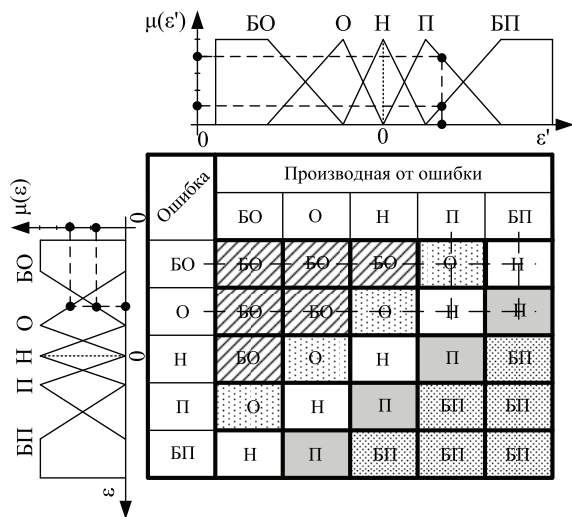


Рис. 5. Формирование «горячих» правил

Выходная лингвистическая переменная формируется как результат обработки нечёткой информации. В литературе описаны различные способы, но наибольшее распространение получил метод «максимума–минимума» как самый универсальный. Суть метода поясняют рис. 5 и 6.

В матрице базы знаний выделяются так называемые «горячие» правила. Это пересечения столбцов и колонок, соответствующие текущим термам входных лингвистических переменных. Причём степень принадлежности «горящего» правила определяется оператором минимума, т. е. ему присваивается меньшее значение из сравниваемых термов входных лингвистических переменных. Далее происходит отсечение соответствующего термина выходной лингвистической переменной в соответствии с определённой ранее степенью принадлежности. Таким образом происходит формирование степеней принадлежности нескольких (в нашем

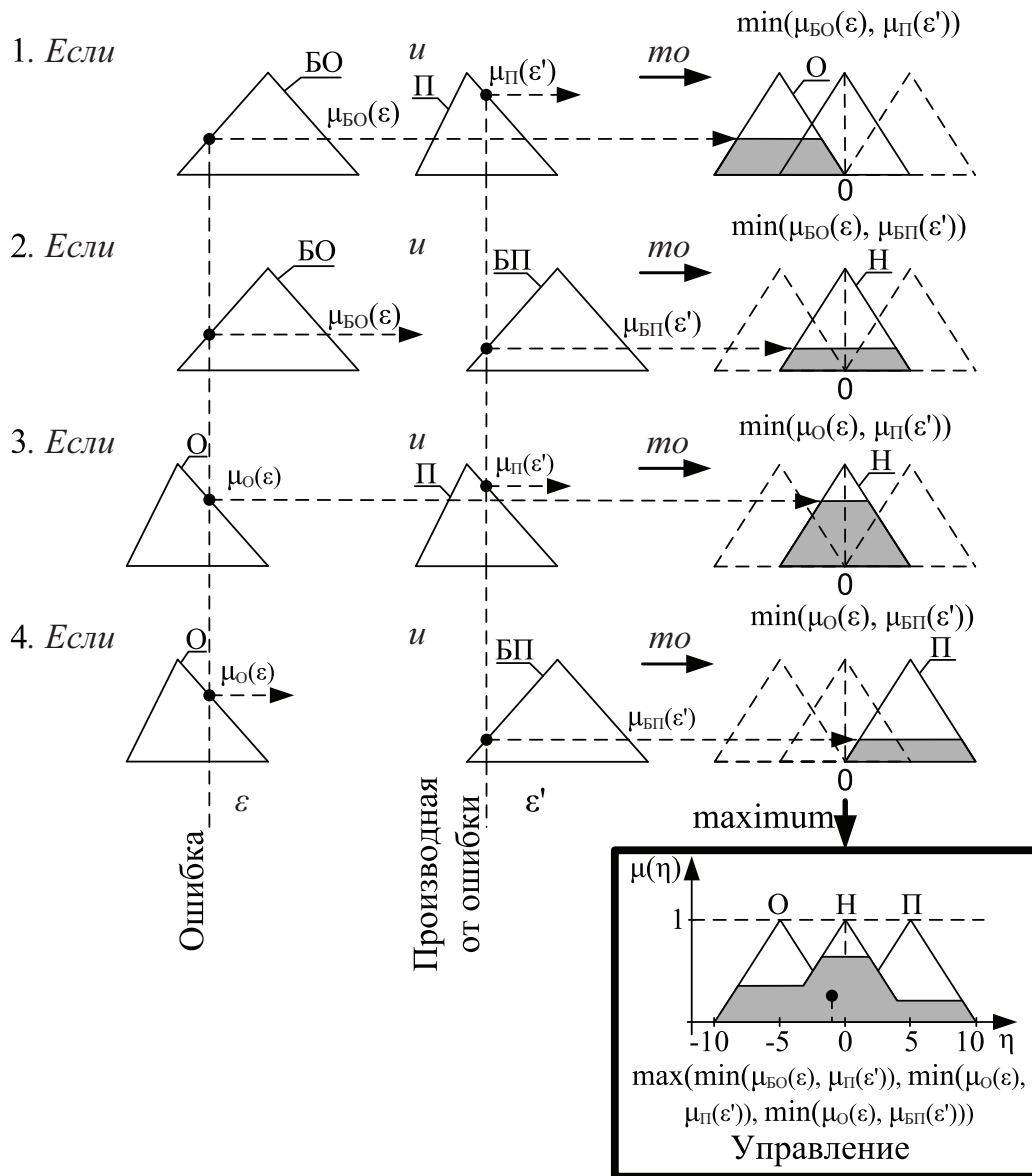


Рис. 6. Процедура преобразования входных лингвистических переменных в выходные

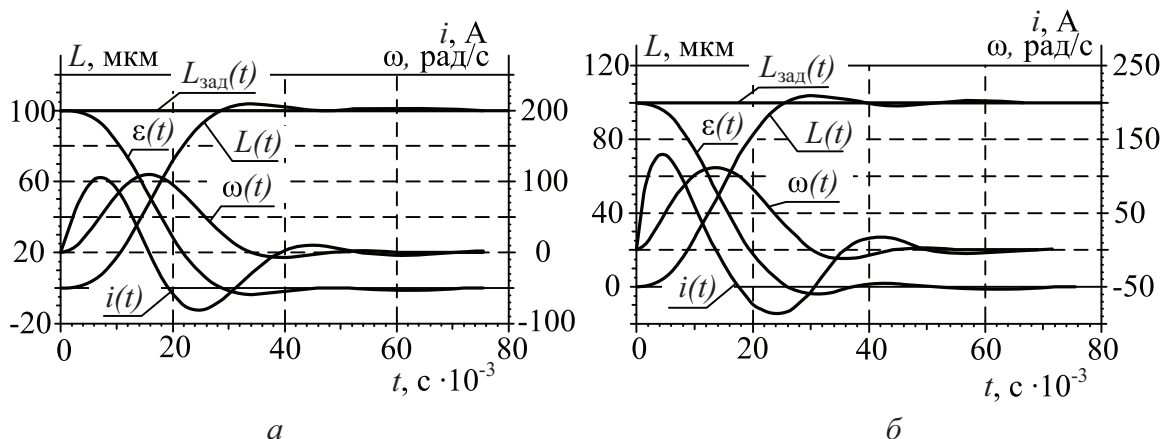


Рис. 7. Переходный процесс в системе при подаче на вход управляющего сигнала 100 мкм: а) в стандартной трёхконтурной системе; б) с нечётким регулятором

случае двух) термов выходной лингвистической переменной.

Заключительный этап предполагает перевод выходного значения из лингвистического в абсолютный вид. На практике наибольшее распространение получил метод центра тяжести. В качестве значения выходной переменной используется координата (абсцисса) центра тяжести площади результирующего терм-множества выходной лингвистической переменной. Вычисление координаты центра тяжести производится по следующей формуле:

$$U_{\text{вып}} \approx \frac{\sum_{i=1}^k \mu_i \cdot \eta_i}{\sum_{i=1}^k \mu_i} = \frac{\mu_1 \cdot \eta_1 + \mu_2 \cdot \eta_2 + \mu_3 \cdot \eta_3}{\mu_1 + \mu_2 + \mu_3}.$$

На рис. 6 выходной блок иллюстрирует получение абсолютного значения выходной величины.

С помощью программы «Dora für Windows» выполнено имитационное моделирование и расчёт переходных процессов созданной системы. Вос-

пользовавшись имитационными моделями, рассчитаем переходные процессы в системах при подаче на вход ступенчатого управляющего сигнала 100 мкм. Графики представлены на рис. 7.

Переходный процесс в стандартной системе отвечает требованиям оптимальных показателей качества, соответствующих третьей точке настройки.

В системе с нечётким регулятором получен переходный процесс, аналогичный рассчитанному в стандартной трёхконтурной системе. Этот факт свидетельствует о том, что применение нечёткого регулятора позволяет обеспечить управление, соответствующее требуемым критериям оптимальности.

Графики переходных процессов при управляющем воздействии 500 мкм представлены на рис. 8.

Общая картина протекания переходных процессов осталась неизменной, но в стандартной системе заметно увеличение перерегулирования, вызванное ограничением, установленным на выходе регулятора скорости. Ток ограничивается на уровне максимально допустимого, что является необходи-

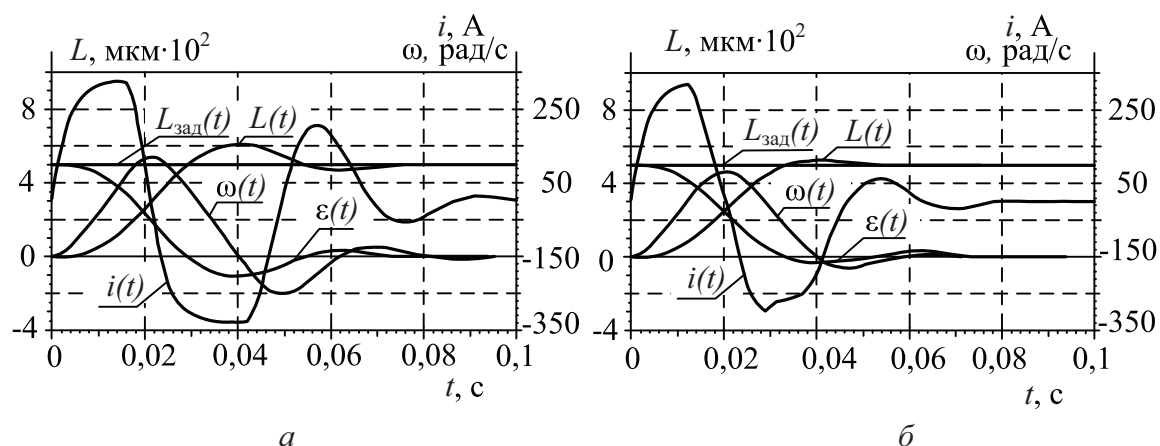


Рис. 8. Переходный процесс в системе при подаче на вход управляющего сигнала 500 мкм: а) стандартная трёхконтурная; б) с нечётким регулятором

мым, исходя из условий эксплуатации электродвигателя. В системе с нечётким регулятором база знаний составлена с учётом влияния указанного ограничения. В результате имеем переходной процесс с меньшим перерегулированием.

Графики переходных процессов при управляющем воздействии 1000 мкм показаны на рис. 9. Наблюдается дальнейшее увеличение перерегулирования в классической САУ СЭП, вызванное влиянием ограничения, установленного на входе контура тока. В системе с нечётким регулятором перерегулирование меньше, чем в стандартной системе.

Графики переходных процессов при линейно-изменяющемся управляющем воздействии  $V=1000$  мкм/с представлены на рис. 10.

В стандартной системе наблюдается появление ошибки. Эта система настроена на третью точку и в своей структуре имеет П-регулятор положения, т. е. обладает астатизмом только первого порядка. Система с нечётким регулятором обрабатывает ошибку до конца, т. е. по управлению является астатической второго порядка.

Исследования были проведены при увеличении линейно-изменяющегося управляющего воздействия до значения  $V=10^4$  мкм/с, рис. 11.

Общая картина переходных процессов не изменилась. Объект управления в данном случае является линейным звеном, и отработка происходит в области, не выходящей за пределы ограничений.

Дальнейшие исследования проводились при подаче на входы систем линейно-изменяющегося воздействия  $V=10^5$  мкм/с. Графики переходных процессов приведены на рис. 12.

В стандартной системе наблюдается появление колебательности, вызванное влиянием ограничения наложенного на величину максимального тока. Переходный процесс имеет значительное перерегулирование и затягивание по времени. Система с нечётким регулятором ведёт себя более оптимальным образом. Благодаря информации, заложенной в базе данных, система сохранила свойство астатизма второго порядка, а за счет использования нечёткого регулятора переходный процесс по положению  $L(t)$  в САУ СЭП не имеет перерегулирования.

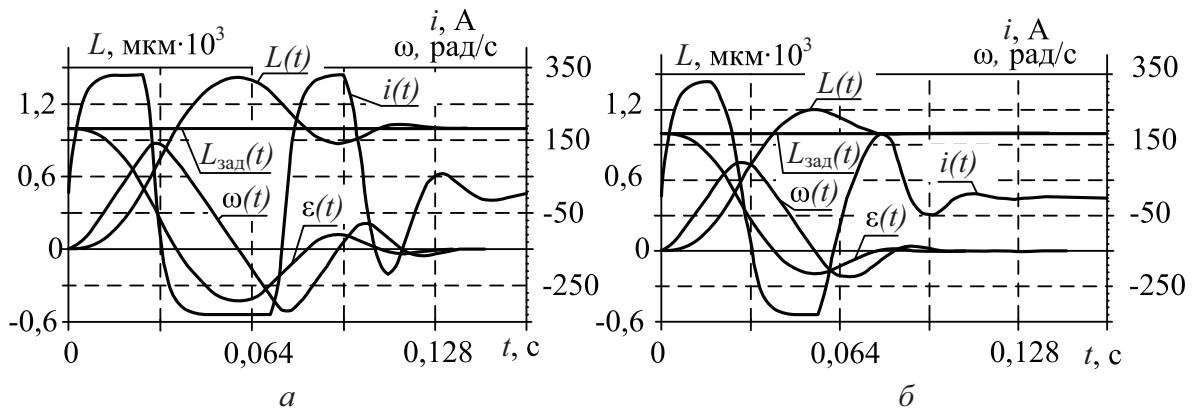


Рис. 9. Переходный процесс в системе при подаче на вход управляющего сигнала 1000 мкм: а) стандартная трёхконтурная; б) с нечётким регулятором

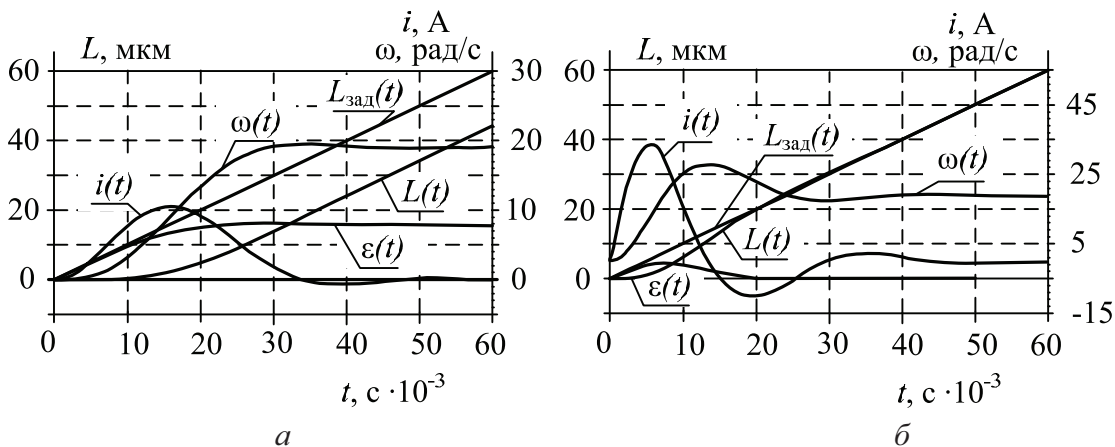


Рис. 10. Переходный процесс в системе при подаче на вход линейно-изменяющегося во времени управляющего воздействия  $V=1000$  мкм/с: а) стандартная трёхконтурная; б) с нечётким регулятором

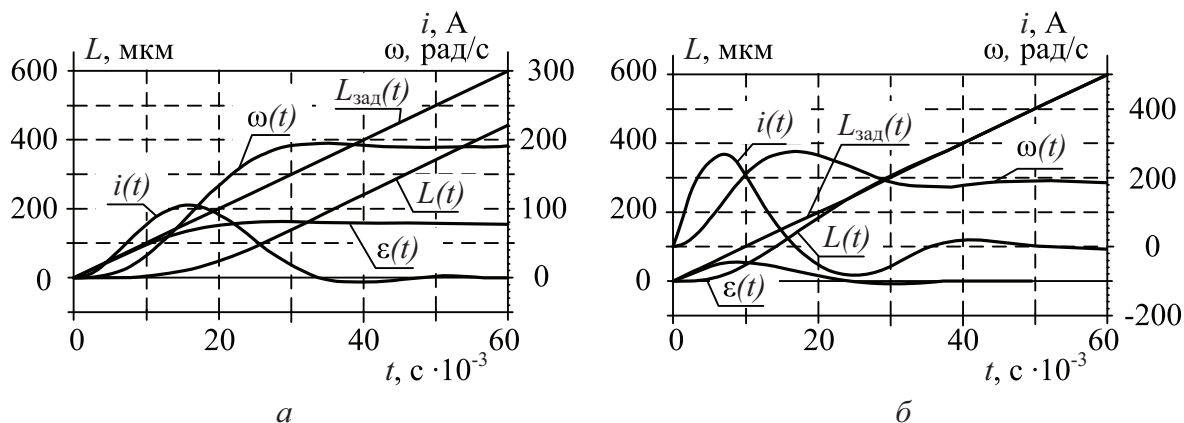


Рис. 11. Переходный процесс в системе при подаче на вход линейно-изменяющегося во времени управляющего воздействия  $V=10^4$  мкм/с: а) стандартная трёхконтурная; б) с нечётким регулятором

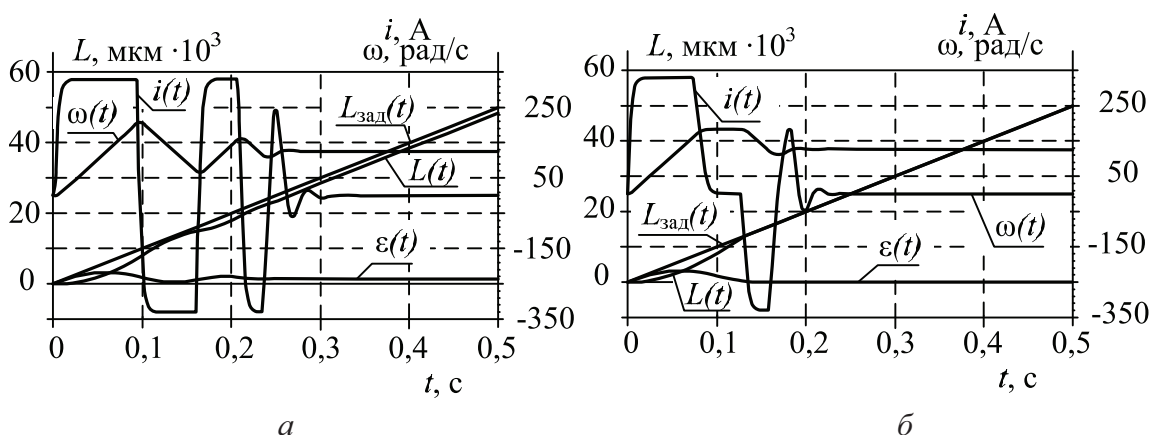


Рис. 12. Переходный процесс в системе при подаче на вход линейно-изменяющегося во времени управляющего воздействия  $V=10^6$  мкм/с: а) стандартная трёхконтурная; б) с нечётким регулятором

**Выводы**

1. Проведён сравнительный анализ динамики электропривода с классическим и нечётким регуляторами. Предложены структура и база знаний нечёткого регулятора, позволяющие уменьшить число контуров регулирования и число датчиков за счет исключения контура скорости.
2. Сравнительный анализ динамики классической и двухконтурной систем автоматического управления следящего электропривода с нечётким регулятором установил, что показатели качества динамики электропривода при отработке больших управляющих воздействий лучше в системе с нечётким регулятором.
2. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 719 с.
3. Стальский В.В., Проскуряков Р.М. Нечёткая логика и её применение в автоматическом регулировании. – СПб.: С.-Петербургский ин-т, 1998. – 94 с.

влияния следящего электропривода с нечётким регулятором установил, что показатели качества динамики электропривода при отработке больших управляющих воздействий лучше в системе с нечётким регулятором.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Удуд Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование автоматизированных электроприводов постоянного тока. – Томск: Изд-во ТПИ, 1991. – 104 с.

Поступила 22.03.2010 г.