

УДК 681.518.24

ЭМУЛЯЦИЯ СИГНАЛОВ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКИХ ЛОГИЧЕСКИХ КОНТРОЛЛЕРОВ

И. С. Конох, В. В. Найда

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: vaha303@yandex.ru

Описан способ автоматизированного построения модели объекта управления, который базируется на определении ближайших экспериментальных последовательностей и интерполяции результатов нечеткой экспертной системой. Отличительной особенностью метода является сохранение частотных характеристик и формы выходного сигнала, идентичных экспериментальным данным. Определены требования к экспериментальным последовательностям. Приведен алгоритм работы, указаны конечные результаты настройки нечеткого контроллера. Показана имитационная модель для проведения исследований.

Проанализировано качество работы метода на примере реальных экспериментальных сигналов скорости, полученных в системе преобразователь частоты–асинхронный двигатель со статической нагрузкой экскаваторного типа, а также сигналов скорости и давления, полученных в гидротранспортной системе, включающей преобразователь частоты, асинхронный двигатель, водяной насос и запорную арматуру. Доказана возможность использования результатов работы для построения систем эмуляции и идентификации, а также для настройки реальных устройств управления вне технологических установок.

Ключевые слова: нечеткий контроллер, идентификация, интерполяция.

ЕМУЛЯЦІЯ СИГНАЛІВ ОБ'ЄКТІВ КЕРУВАННЯ В ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМАХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКИХ ЛОГІЧНИХ КОНТРОЛЕРІВ

І. С. Конох, В. В. Найда

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: vaha303@yandex.ru

Описано спосіб автоматизованої побудови моделі об'єкту управління, який базується на визначенні найближчих експериментальних послідовностей та інтерполяції результатів нечіткою експертною системою. Відмітною особливістю методу є збереження частотних характеристик і форми вихідного сигналу, ідентичних експериментальним даним. Визначено вимоги до експериментальних послідовностей. Приведено алгоритм роботи, вказано кінцеві результати налаштування нечіткого контролера. Показано імітаційну модель для проведення досліджень.

Проаналізовано якість роботи методу на прикладі реальних експериментальних сигналів швидкості, отриманих у системі перетворювач частоти–асинхронний двигун із статичним навантаженням экскаваторного типу, а також сигналів швидкості та тиску, отриманих у гідротранспортній системі, до якої входить перетворювач частоти, асинхронний двигун, водяний насос і запірні арматури. Доведено можливість використання результатів роботи для побудови систем емуляції та ідентифікації, а також для налаштування реальних пристроїв управління поза технологічними установками.

Ключові слова: нечіткий контролер, ідентифікація, інтерполяція.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Основным движущим фактором совершенствования систем автоматического регулирования (САР) технологическими процессами являются постоянно растущие требования, предъявляемые к показателям качества регулирования. Наибольшее развитие в последние годы получили направления, связанные с альтернативными подходами к решению задач регулирования. Основой актуальности исследования таких направлений является то, что традиционные методы регулирования, требующие построения математических моделей, реализуемых на основе теории линейных систем, не в состоянии обеспечить требуемое качество управления технологическими параметрами многих промышленных объектов, являющихся по своей природе существенно нелинейными. Кроме того, наличие нелинейных характеристик, сложных для моделирования динамических элементов, неконтролируемых шумов, помех и многих других факторов затрудняет реализацию традиционных

стратегий регулирования. Исследовательские и опытно-конструкторские работы на этапе внедрения и пуско-наладки требуют значительного времени и средств.

Существующие методы настройки оптимальных параметров традиционных регуляторов и используемые ими критерии адекватности, определяющие качество математических моделей объектов регулирования, исчерпывают резервы повышения качества функционирования классических САР. Для лучшего решения задач регулирования требуется разработка новых систем регулирования, простых по принципам организации, наладки и функционирования [1].

Одним из перспективных подходов к повышению показателей качества регулирования технологических процессов является переход от традиционных систем к использованию САР с технологией “мягких вычислений”, обеспечивающих высокоэффективную реализацию нелинейных преобразований. Под термином “мягкие вычисления (Soft-

computing)» кроється область знань, що стосується к інформаційним і інтелектуальним технологіям, яка характеризується використанням спеціальних методів розкриття неопределенностей при розв'язанні чисельно складних завдань, для яких заздалегідь не існує жодного відомого алгоритму або аналітичного методу.

Розроблювані інтелектуальні регулятори працюють в ідеалізованих умовах, і перевірка робоспроможності відбувається на моделях. Побудова ж реальних інтелектуальних регуляторів, які включають в себе набір як апаратних, так і програмних засобів, є дуже складною задачею, що вимагає великої кількості інформації об'єкті регулювання.

Незважаючи на те, що математичне моделювання значно зменшує вартість дослідницьких і налагоджувальних робіт, має хорошу повторюваність і безпеку, воно не дозволяє повністю виключити натурні випробування і дослідження якості роботи систем управління при взаємодії з реальним об'єктом.

В джерелах [2–5] показані типові приклади для налагоджувальних комплексів з імітацією електричних сигналів. Для подібних комплексів актуальним є вдосконалення спеціальних методів ідентифікації об'єктів управління і емуляції його поведінки, які характеризуються високою ступенем автоматизації і точністю відтворення освідомительних сигналів з збереженням метрологічних особливостей. Додатковими перевагами є можливість тренінгу обслуговуючого персоналу і дослідження реакції системи управління в нештатних ситуаціях.

Для забезпечення питань проектування, оптимізації і налаштування асинхронного автоматизованого електропривода (ААЭП) задачею побудови дослідницьких комплексів також є востребована. ААЭП є наймасовішим видом продукції електротехнічної промисловості країн. Це пояснюється багатьма причинами, найбільш важливими з яких є невисока вартість, простота конструкції і висока надійність. Умови експлуатації ААЭП найрізноманітніші: від найпростіших, як, наприклад, у малопродуктивних вентиляторів з постійною швидкістю обертання, до таких, як привод породопогрузочних машин в шахтах. Дуже часто реальний навантажувальний момент (M_c) змінюється випадково і залежить від багатьох факторів (фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу, частоти обертання робочих органів, продуктивності машини і т.д., що вносять елемент випадковості в роботу двигача). Випадкові зміни навантажувального моменту M_c викликають коливання струму і потужності, що споживаються з мережі, нерівномірність миттєвої кутової частоти обертання ротора. При цьому графік електромагнітного моменту має вигляд пульсуючої відносно середнього зна-

чення, що викликає додаткові втрати в обмотках, зростає рівень вібрацій і шумів, погіршення енергетичних показників асинхронного електропривода. Фактично, робота електропривода є неперервним перехідним процесом, що в значній мірі ускладнює проведення електромагнітних і теплових досліджень, оскільки доводиться розв'язувати системи диференціальних рівнянь, що описують роботу електропривода, в яких одна або декілька входних величин змінюються випадковим чином. Спроба розв'язати подібні системи з випадковими параметрами традиційними методами (чисельне розв'язання систем стохастических диференціальних рівнянь; методи, засновані на лінеаризації нелінійних елементів; метод малої параметра і послідовних наближень; інтерполяційний метод і др.) призводить до значного збільшення машинного часу, а іноді і до неможливості проведення розрахунків [5, 6].

Таким чином, створення нового інструментального математичного і інформаційного забезпечення, що дозволяє швидко і ефективно проводити детальне дослідження перехідних процесів в ААЭП, момент навантаження яких змінюється з часом, дозволить більш ефективно використовувати асинхронний електропривод, а також підвищити надійність. Це вимагає розв'язання проблеми пошуку закономірностей, які б лягли в основу системи лінгвістических знань об'єкті моделювання, з існуючих статистических (експериментальних) даних, що характеризують досліджувану систему. Такі моделі зазвичай є «грубими» і вимагають ефективних методів тонкої налаштування. В існуючих літературних джерелах не формалізовані питання ідентифікації динаміческих об'єктів лінгвістическими моделями [6].

Метою роботи є створення математического і інформаційного забезпечення комп'ютеризованих комплексів для дослідження і налаштування систем управління електромеханіческими об'єктами, що дозволить проводити автоматическую ідентифікацію і емулювати сигнали об'єктів з достатньою точністю.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Реалізувати відтворення об'єкта управління цілесобразно без його структурної ідентифікації, без висунення і перевірки гіпотез про порядок і лінійності об'єкта.

Предлагаемый метод розв'язання задачі відтворення поведінки об'єкта управління базується на ідеї визначення найближчих підходящих експериментальних послідовностей і розрахунку на їх основі точок нової послідовності, яка відповідає входному керуючому сигналу. В даній роботі проведено дослідження для динаміческих об'єктів, що мають один входний і один вихідний сигнал, однак використовуваний метод може бути застосований і для об'єктів з великою кількістю сигналів.

Результаты данной работы необходимы при построении компьютеризированных комплексов для настройки и исследования реальных промышленных систем регулирования и управления с высококачественной автоматической эмуляцией сигналов объекта управления. Пример структуры комплекса показан на рис. 1. Основным элементом комплекса является управляющий компьютер, дополненный аппаратными компонентами для эмуляции осведомительных и чтения управляющих сигналов, вырабатываемых исследуемым контроллером. Отдельные аспекты таких комплексов изложены в [7]. Для реализации задачи эмуляции объекта управления необходимо создание специализированного программного и математического обеспечения, которое базируется на предлагаемом методе поиска и данных обработки натурных испытаний. В результате комплекс позволит не только определить работоспособность компонент системы управления, но и выработать оптимизированные настройки или лучший закон изменения задающего воздействия.

Получение экспериментальных данных.

Для оценки качества эмуляции реальных сигналов в электромеханических системах были проведены серии опытов на компьютеризированных исследовательских стендах кафедры систем автоматического управления и электропривода Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского.

В первом случае использовался стенд для исследования ААЭП, в котором привод переменного тока по схеме преобразователь частоты–асинхронный двигатель (ПЧ–АД) жестко соединен валом с приводом системы широтно-импульсный преобразователь–двигатель постоянного тока независимого возбуждения от постоянных магнитов (ШИП–ДПТ НВ). Структурная схема комплекса с приводами ПЧ–АД и ШИП–ДПТ НВ показана на рис. 2. Двигатель постоянного тока ($U=24$ В, $I=7,15$ А,

$\omega = 2600 - 2900$ об/мин, $P_{vih} = 170$ Вт, $\eta = 70\%$) используется для эмуляции технологической нагрузки для привода ПЧ–АД (FREQROL-U120S-0,2K-ER, 4AA63A4Y3 ($P_{nom} = 120$ Вт, $\eta = 68\%$)).

Для исследования пусковых характеристик и дальнейшего контроля режима работы в контуре ПЧ–АД используются датчики тока (ДТ) и напряжения (ДН), которые связаны с персональным компьютером (ПК) через USB-устройство сбора данных и подачи управляющего сигнала. С помощью ШИП и регулятора тока обеспечивается эмуляция технологической нагрузки по заданной нагрузочной характеристике. Между валами двигателей установлен импульсный датчик скорости (ДС), который дает возможность следить за изменением скорости привода. Для контроля работы в контуре ШИП–ДПТ используются датчики тока и напряжения. Благодаря использованию USB-устройства сбора данных и подачи управляющего сигнала осуществляется автоматическое управление комплексом путем задания необходимых управляющих воздействий на ПЧ и ШИП, а также для получения графических характеристик работы комплекса.

На рис. 3 приведено графическое интерфейсное окно системы управления автоматизированным электроприводом. На диаграммах видны мгновенные сигналы тока и скорости АД, сигналы задающего воздействия и настройки ПИД-регулятора скорости. На рис. 4 показана графическая интерфейсная вкладка задания нагрузки и настройки регулятора тока нагрузочного двигателя системы ШИП–ДПТ. Для исследуемого примера задана нагрузочная диаграмма, описывающая зависимость момента сопротивления от скорости и соответствующая экскаваторной характеристике.

Сигнал мгновенной скорости, контролируемый одноконтурным ПИД-регулятором, был использован для анализа качества эмуляции сигналов нечеткой системой.

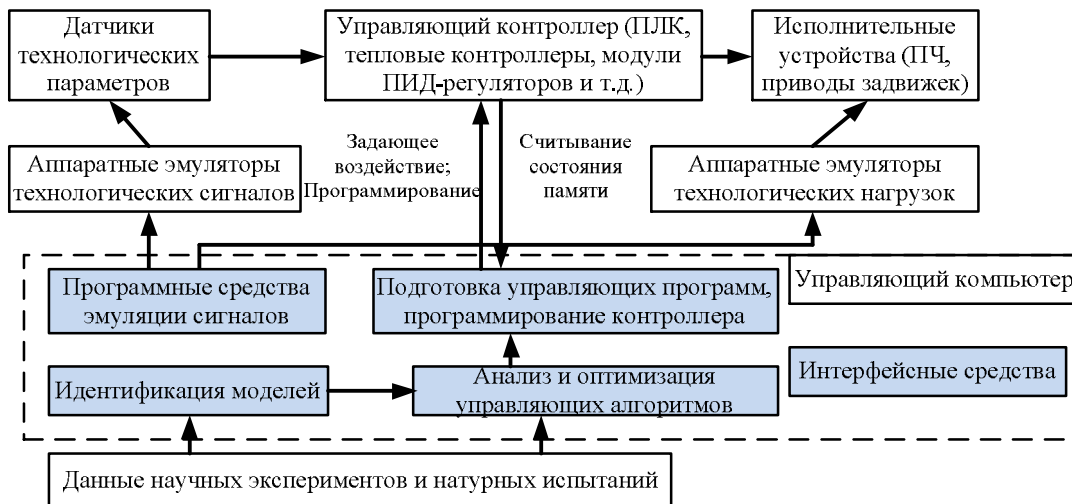


Рисунок 1 – Структура компьютеризированного комплекса для имитации объектов управления и настройки систем управления

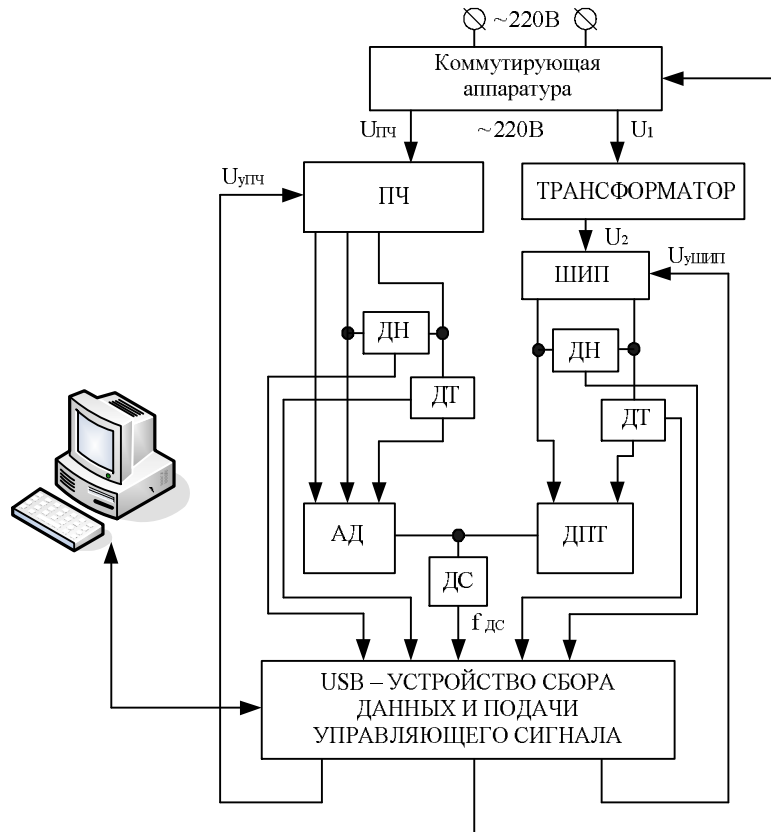


Рисунок 2 – Структурная схема комплекса с приводами ПЧ–АД и ШИП–ДПТ НВ

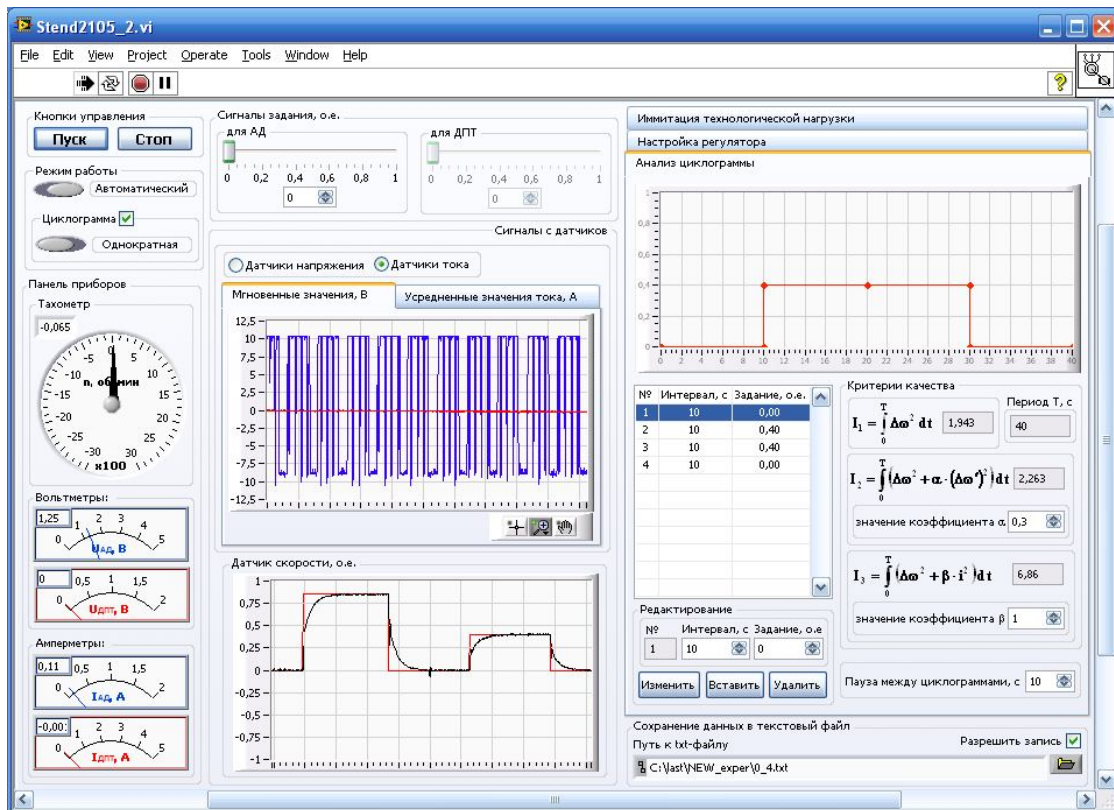


Рисунок 3 – Графическое интерфейсное окно управления автоматизированным электроприводом

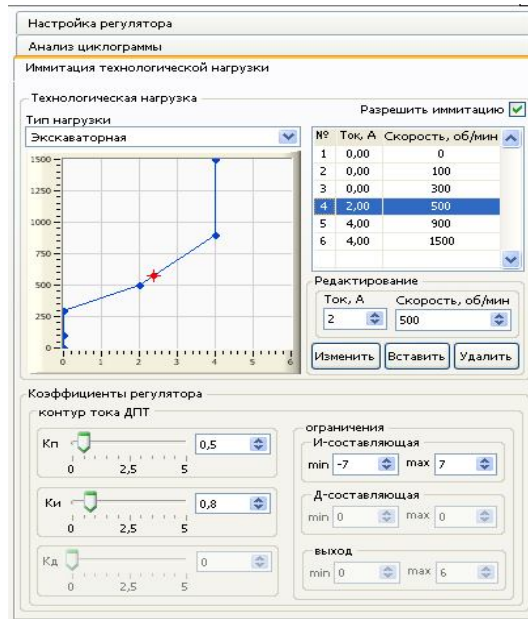


Рисунок 4 – Графическая интерфейсная вкладка задания нагрузки и настройки регулятора тока нагрузочного двигателя

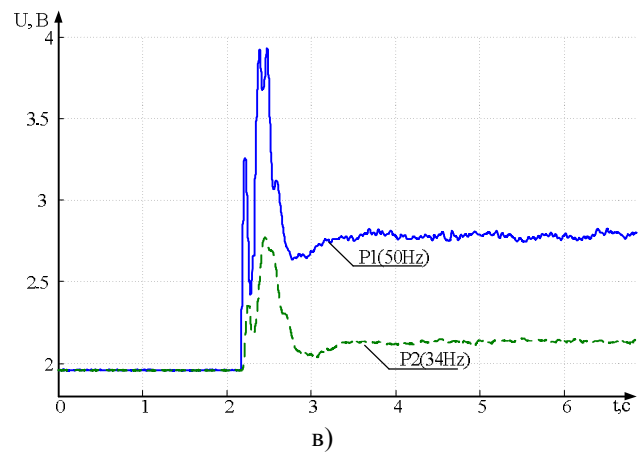
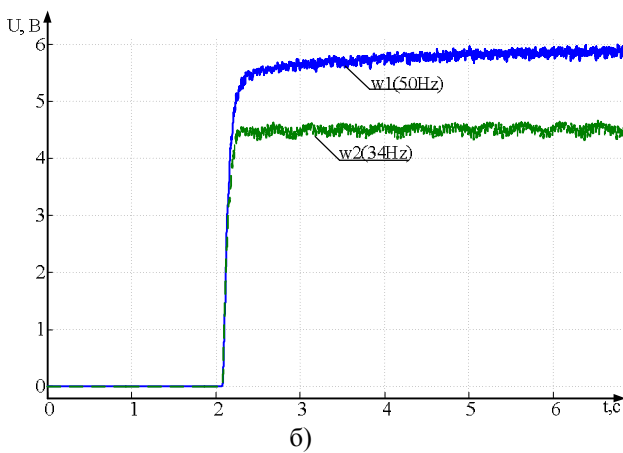
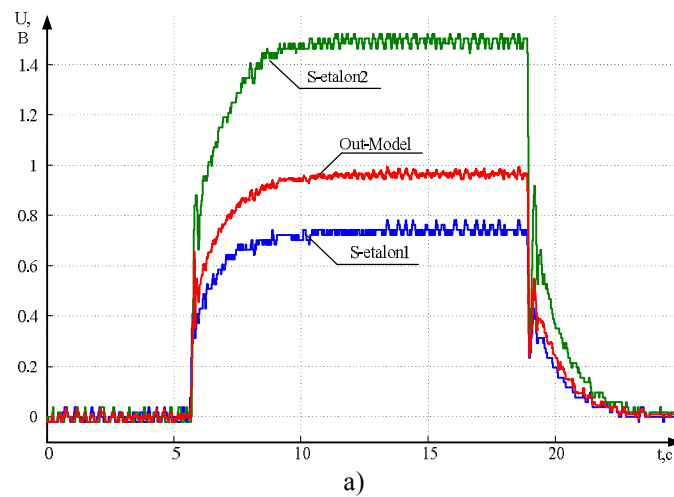


Рисунок 5 – Экспериментальные сигналы:
 а) угловая скорость системы ПЧ–АД–ШИП–ДПТ НВ; б) угловая скорость насосного агрегата;
 в) давление насосного агрегата перед задвижкой при пятидесятипроцентном открытии

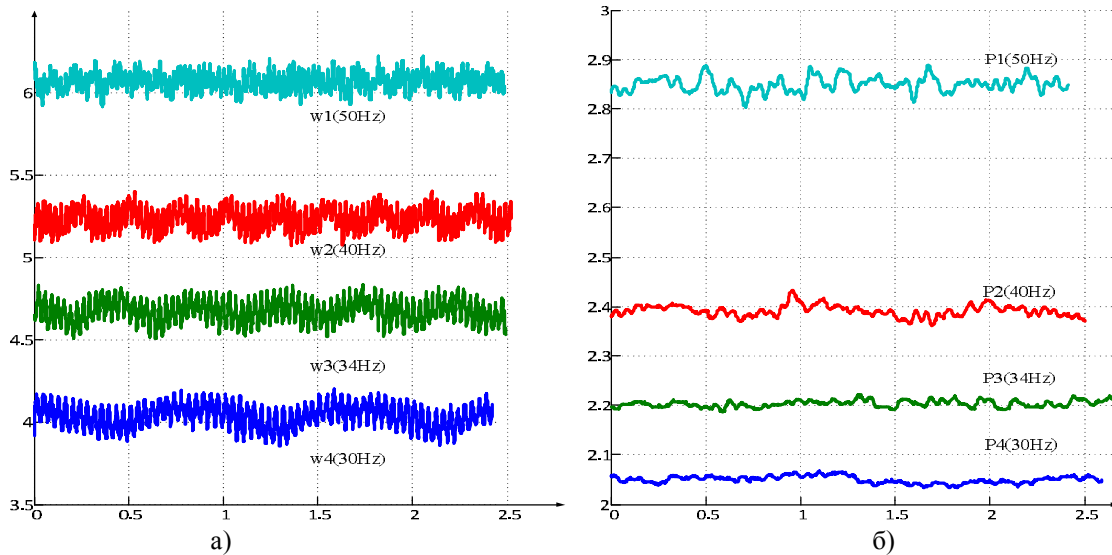


Рисунок 6 – Экспериментальные сигналы:

а) угловая скорость насосного агрегата при разных частотах питания; б) давление насоса перед задвижкой при пятидесятипроцентном открытии и разных частотах питания

Были записаны переходные процессы при ступенчатых сигналах задания скорости на уровне 0,3, 0,4, и 0,6 от максимальной.

Во втором случае использовался стенд для исследования гидротранспортного комплекса, структура и характеристики которого описаны в [8, 9]. В состав комплекса входит преобразователь частоты, асинхронный двигатель, водяной насос, трубопроводы и запорная арматура. По результатам измерений был получен ряд экспериментальных отчетов мгновенных сигналов, которые включали сигналы времени, напряжение на выходе преобразователя частоты (фазы А, В, С), ток на выходе преобразователя частоты (фазы А, В), частота вращения $n1$, производительность системы Q1, давление на выходе насоса до задвижки Н1, давление в сети после задвижки Н2. Запись производилась в реальном времени в текстовый файл в виде последовательностей оцифрованных сигналов напряжения на входе АЦП, являющихся аналогами физических сигналов гидротранспортного комплекса.

Для анализа были взяты сигнал угловой скорости насосного агрегата с приводом ПЧ–АД и сигнал давления до задвижки при изменении частоты преобразователя от 0 до 34 Гц, от 0 до 40 Гц и от 0 до 50 Гц, а также в обратном направлении. Дополнительно были произведены опыты по снятию точек статической характеристики при различных частотах силового преобразователя (30, 35, 40, 50 Гц). Положение задвижки для каждого случая изменялось последовательно и дискретно от полностью открытого до полностью закрытого состояния.

Графики некоторых экспериментальных последовательностей показаны на рис. 5, 6. Следует заметить, что для сигнала давления технологический ноль соответствует напряжению в 2 В. Все сигналы прошли процедуры медианного сглаживания, аналогичные тем, которые использовались САР данных

исследовательских комплексов.

Порядок работы системы эмуляции и идентификации. В общем виде последовательность действий при автоматической идентификации содержит этапы получения данных натурных испытаний (экспериментов), структурирование результатов, считывание управляющих воздействий, определения ближайших экспериментальных последовательностей из всего массива экспериментальных данных, поиск необходимых точек в выбранных последовательностях, комбинирование и определение искомой текущей реакции объекта управления средствами нечетких вычислений. UML-диаграмма состояния [10], описывающая общую последовательность работы, представлена на рис. 7.

Количество экспериментов определяется несколькими факторами:

- требуемой точностью идентификации;
- характером объекта и наличием в нем составляющих: аperiodической, колебательной, форсирующей и т.д.;
- стационарностью параметров объекта;
- степенью нелинейности объекта, которую надо учесть;
- характером управляющих воздействий, их формой и дискретностью.

По результатам исследования можно рекомендовать следующее: для расчета текущей реакции объекта управления достаточно иметь две экспериментальные последовательности, с большим и меньшим выходом, с общей формой управляющего воздействия, идентичной текущему, и близкими начальными значениями состояний объекта. При этом для сохранения точности необходимо, чтобы в последовательностях, используемых для расчета, проявлялись те же свойства объекта (нелинейности, нестационарности), что и для рассчитываемой последовательности.

творюють умови пошуку, необхідно визначити окремі точки в них і розрахувати інтерполювані значення. В результаті виконання початкових етапів системного аналізу визначено, що для об'єктів з неперервною передаточною функцією другого порядку достатньо учити наступну інформацію:

- значення амплитуди сигналу на попередньому моменті часу;
- значення амплитуди сигналу на моменті часу, який відстоїть від поточного на визначений часовий інтервал;
- значення амплитуди керуючого впливу;
- тип керуючого впливу, який може бути ступінчастим або лінійно змінюючимся.

Для універсальності методу необхідно на основі цієї інформації розрахувати відносні відхилення сигналів і подати їх на входи нечіткого контролера.

Нечітка експертна система розрахування реакції об'єкта управління. Кількість точок, які слід учити в розрахунках, обумовлено старшою гармонікою корисного сигналу. Це вимога не жорстке, воно є рекомендаційним, і, наприклад, для об'єктів з постійним часом від 0,05 до 0,2 с період можна вибрати один і той же в 0,3 с і використовувати одну минулу точку.

Характеристики нечітких контролерів, які розраховують невідому реакцію об'єкта при заданих керуючих впливах на основі експериментальної послідовності, наведені в табл. 1, 2 [10]. Нечіткий контролер має чотири входні змінні:

- *type* – тип керуючого впливу (ступінчасте або лінійне);
- *impact* – відносна амплітуда керуючого впливу;
- *Sprev* – минуле відносне значення виходу об'єкта;
- *Scurrent* – відносне значення виходу об'єкта в момент часу, безпосередньо передшлюючий розраховувану точку.

Єдина вихідна змінна (*out*) визначає коефіцієнт, на який слід помножити поточне значення експериментального сигналу, щоб отримати шукане значення.

Для досліджуваних прикладів були вибрані діапазони лінгвістических змінних і кількість термів (рис. 8). База правил (табл. 3) містить 23 правила, які визначають в лінгвістических термінах вихід нечіткого контролера [11].

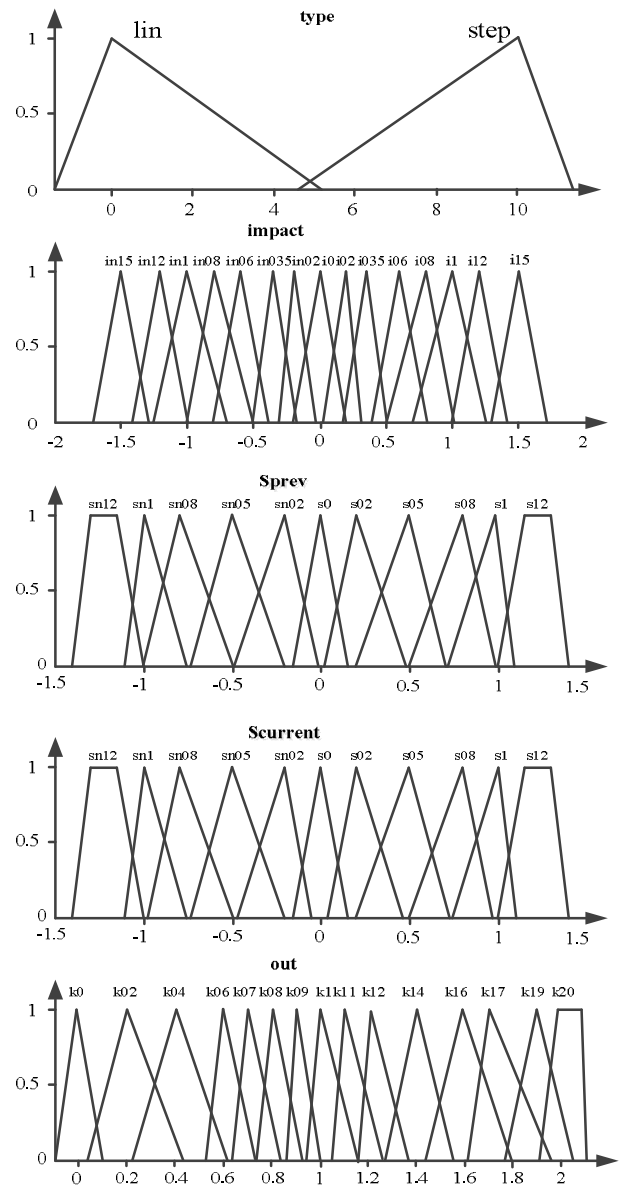


Рисунок 8 – Функції належності входних і вихідних змінних нечіткого контролера розрахування виходу об'єкта по експериментальній послідовності

Таблиця 1 – Основні характеристики нечіткого контролера розрахування виходу об'єкта по експериментальній послідовності

Імя	'ident2_2'
Алгоритм	Мамдани
Метод розрахування «нечітке І»	'prod'
Метод розрахування «нечітке ІЛИ»	'probor'
Метод імплікації	'min'
Метод агрегації	'probor'
Метод деффазифікації	'centroid'

Таблица 2 – Лингвистические переменные нечеткого контроллера

Нечеткая переменная	Диапазон	Количество функций принадлежности
Вход 1: 'type'	[-1,367; 11,34]	2
Вход 2: 'impact'	[-1,7; 1,7]	15
Вход 3: 'Sprev'	[-1,4; 1,4]	11
Вход 4: 'Scurrent'	[-1,4; 1,4]	11
Выход 1: 'out'	[-0,1093; 2,094]	15

Схема экспериментальных исследований и настройка нечеткого контроллера выполнялась путем модельных экспериментов с сигналами, формируемыми динамическими звеньями первого и второго порядков (1):

$$\begin{aligned}
 W_1(s) &= \frac{3}{0,2s+1}; \\
 W_2(s) &= \frac{3}{0,1s^2+0,2s+1}; \\
 W_3(s) &= \frac{0,4s+3}{0,05s^2+0,1s+1}.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Для экспериментальной проверки были выбраны двухступенчатые управляющие воздействия, при которых искомая последовательность имела такие воздействия, что ее значения в одно время были близки к первой, а в другое – ко второй последовательности, полученной от одного и того же звена. Таким образом, схема проведения модельных экспериментов включает модули задания управляющих воздействий и две одинаковые передаточные функции, моделирующие экспериментальные данные. Их выход моделирует найденные точки, по которым можно определить следующее значение выхода объекта. Начальные условия – нулевые. Два нечетких контроллера, каждый из которых на основании входной информации оценивает близость искомой последовательности к экспериментальной, и формируют расчетный коэффициент (рис. 9). Выходная информация нечетких контроллеров усредняется на основании значений расчетных коэффициентов по следующему выражению:

$$\begin{aligned}
 S &= 0,5 \frac{(1-|1-k1|)}{(1-|1-k2|)} u1(t) + \\
 &+ (1-0,5 \frac{(1-|1-k1|)}{(1-|1-k2|)}) u2(t),
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

где $u1(t), u2(t)$ – текущие значения реальных экспериментальных сигналов; $k1, k2$ – расчетные коэффициенты, определенные нечеткими контроллерами для каждой последовательности в отдельности. Выражение (2) описывает логику потоковых вычислений для формирования итогового результата.

Таблица 3 – База правил нечеткого контроллера

№ п/п	Экспертные правила
1	If (type is step) and (impact is i0) and (Sprev is s0) and (Scurrent is s0) then (out is k1)
2	If (type is step) and (impact is i02) and (Sprev is s0) and (Scurrent is s02) then (out is k09)
3	If (type is step) and (impact is i02) and (Sprev is sn02) and (Scurrent is s02) then (out is k08)
4	If (type is step) and (impact is i02) and (Sprev is s02) and (Scurrent is s05) then (out is k07)
5	If (type is step) and (impact is in08) and (Sprev is s0) and (Scurrent is sn08) then (out is k17)
6	If (type is step) and (impact is in1) and (Sprev is s0) and (Scurrent is sn1) then (out is k20)
7	If (type is step) and (impact is in1) and (Sprev is sn08) and (Scurrent is sn1) then (out is k20)
8	If (type is step) and (impact is i0) and (Sprev is sn1) and (Scurrent is sn05) then (out is k14)
9	If (type is step) and (impact is i0) and (Sprev is sn05) and (Scurrent is s0) then (out is k11)
10	If (type is step) and (impact is i0) and (Sprev is sn02) and (Scurrent is s0) then (out is k1)
11	If (type is step) and (impact is in1) and (Scurrent is sn1) then (out is k20)
12	If (type is step) and (impact is in08) then (out is k17)
13	If (type is step) and (impact is i0) and (Sprev is sn1) and (Scurrent is sn1) then (out is k17)
14	If (type is step) and (impact is i0) and (Sprev is sn1) and (Scurrent is sn08) then (out is k16)
15	If (type is step) and (impact is i0) and (Sprev is sn08) and (Scurrent is sn02) then (out is k12)
16	If (type is step) and (impact is i0) and (Sprev is sn08) and (Scurrent is s0) then (out is k1)
17	If (type is step) and (impact is i0) and (Sprev is sn05) and (Scurrent is s0) then (out is k1)
18	If (type is step) and (impact is i02) and (Sprev is s0) and (Scurrent is s0) then (out is k08)
19	If (type is step) and (impact is i02) and (Sprev is s0) and (Scurrent is s02) then (out is k08)
20	If (type is step) and (impact is i0) and (Sprev is s02) and (Scurrent is s02) then (out is k09)
21	If (type is step) and (impact is i0) and (Sprev is sn02) and (Scurrent is sn02) then (out is k11)
22	If (type is step) and (impact is i0) and (Sprev is sn02) and (Scurrent is s02) then (out is k08)
23	If (type is step) and (impact is i0) and (Sprev is s02) and (Scurrent is sn02) then (out is k12)
24	If (type is step) and (impact is in035) and (Scurrent is sn02) then (out is k12)
25	If (type is step) and (impact is in035) and (Scurrent is sn05) then (out is k14)
26	If (type is step) and (impact is i035) and (Scurrent is s02) then (out is k06)
27	If (type is step) and (impact is i0) and (Scurrent is s05) then (out is k06)
28	If (type is step) and (impact is i0) and (Scurrent is s02) then (out is k07)

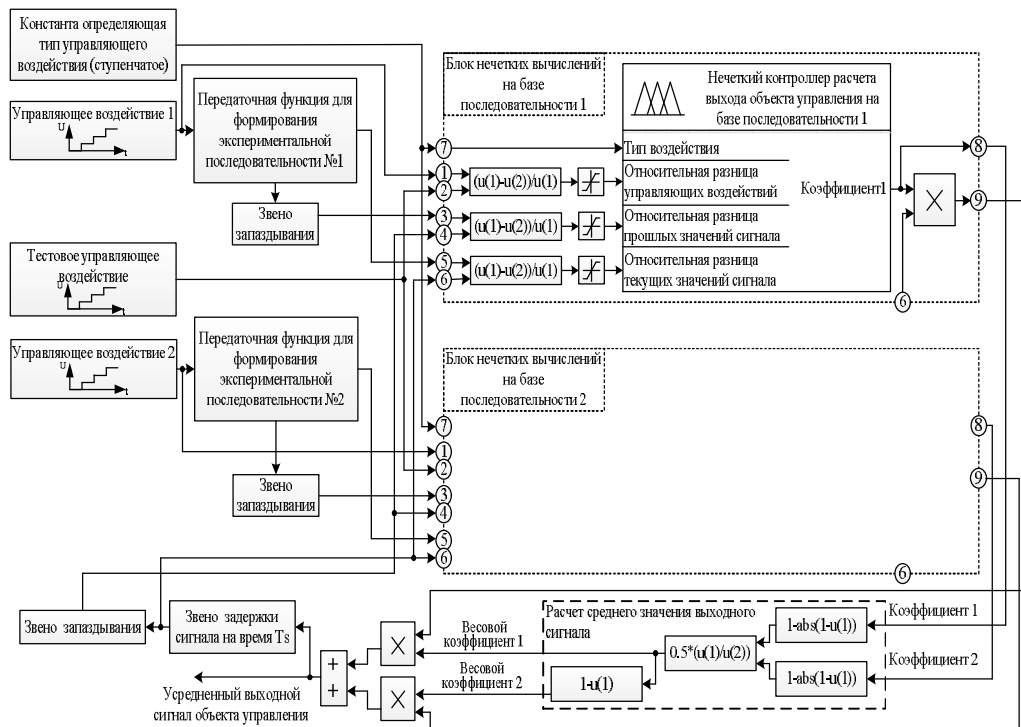


Рисунок 9 – Схема выполнения модельных экспериментов

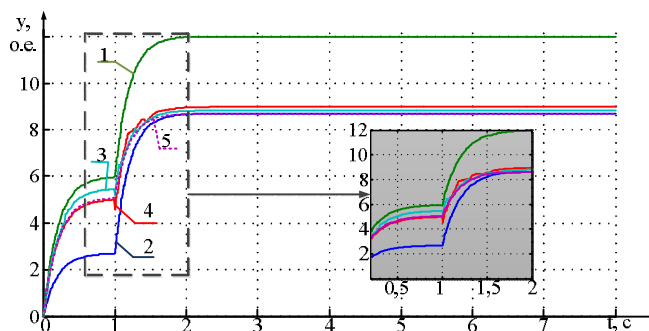


Рисунок 10 – Результаты модельных экспериментов по эмуляции выходного сигнала динамического звена первого порядка: 1, 2 – входные последовательности; 3, 4 – выходы нечетких контроллеров; 5 – усредненный итоговый результат

Такая зависимость обеспечивает больший вес для того результата, чей коэффициент ближе к единице, что дает преимущество более близкой последовательности и позволяет лучше учесть нелинейные свойства объекта управления, если они есть. Рассчитанное и усредненное значение управляемой переменной используется для поиска новых точек в экспериментальных последовательностях и расчетах новых значений входных лингвистических переменных.

Так как в наличии имеется эталонный результат (рис. 10), то настройку нечеткой экспертной системы можно производить по технологии гибридных нейро-нечетких систем [9] или путем последовательного пересмотра точек переходного процесса и формулирования экспертных правил для равномерно разбитых на термы лингвистических переменных. Выполнив такой процесс для объекта первого порядка, были сформулированы первые 17 эксперт-

ных правил. Аналогичные исследования для колебательного звена второго порядка позволили добавить еще 11 правил без изменения уже найденных.

На рис. 10 приведены графики модельных экспериментов, иллюстрирующие результат расчета искомой последовательности в сравнении с эталоном для идеальных сигналов. Объект колебательно-форсирующего характера служит в качестве контрольного примера для оценки общего качества работы системы без коррекции правил. Максимальные погрешности при использовании нечетких систем приведены в табл. 4.

Результаты экспериментальных исследований эмуляции реальных сигналов. Экспериментальные исследования позволили оценить работоспособность предложенного способа воспроизведения сигналов электромеханических систем и выявить направления дальнейших исследований на пути создания компьютеризированного комплекса для имита-

ции объектов управления и настройки САР.

На рис. 11, 12 показаны результаты эмуляции сигналов скорости для ступенчатого задающего воздействия амплитудой 0,4 от максимальной в сравнении с эталонным сигналом, полученным в результате работы исследовательского комплекса. Сигнал скорости снимался с тахогенератора и проходил процедуру медианного сглаживания в компьютеризированной системе управления (рис. 2).

На рис. 13, 14 приведены результаты сравнений реальных и эмулированных сигналов для отдельных опытов, проведенных на гидротранспортном комплексе. Следует отметить, что высокочастотные гармоники в сигналах давления и угловой скорости, обусловленные наличием оборотных, лопастных составляющих и другими гидродинамическими процессами, воспроизводятся идентично экспериментальным эталонным результатам.

В обоих случаях (рис. 11, 13) в сигналах наблюдаются шумы, имеющие стохастический и системный характер. Повторяющиеся составляющие

объясняются влиянием питающей сети переменного тока, влиянием коллекторного узла тахогенераторов и работой преобразователей частоты. Даже после процедуры сглаживания разработчикам САР следует учитывать наличие шума в сигналах обратной связи и принимать дополнительные меры к его снижению и производить коррекцию настроек регуляторов для обеспечения требуемой устойчивости и точности систем. Таким образом, предложенный способ идентификации и эмуляции объектов управления оправдывает себя с точки зрения близости характеристик синтезированных сигналов к реальным сигналам электромеханических систем. Статические и динамические ошибки в воспроизводимых сигналах не носят принципиального характера для синтеза систем управления и могут быть еще существенно уменьшены при добавлении новых термов и правил в разработанную структуру нечеткого контроллера.

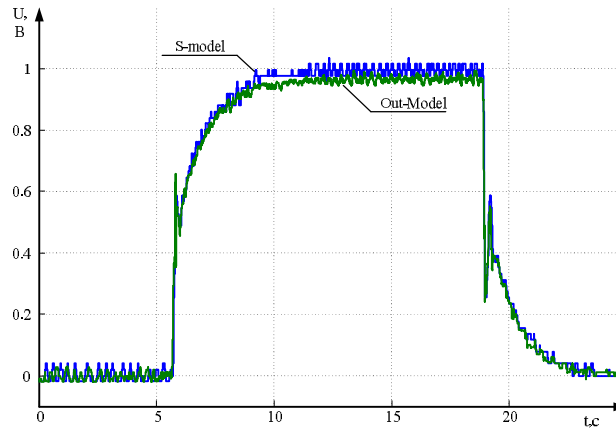


Рисунок 11 – Результаты эмуляции сигнала скорости (Out-Model) системы ПЧ–АД–ШИП–ДПТ НВ в сравнении с экспериментальными данными (S-Model)

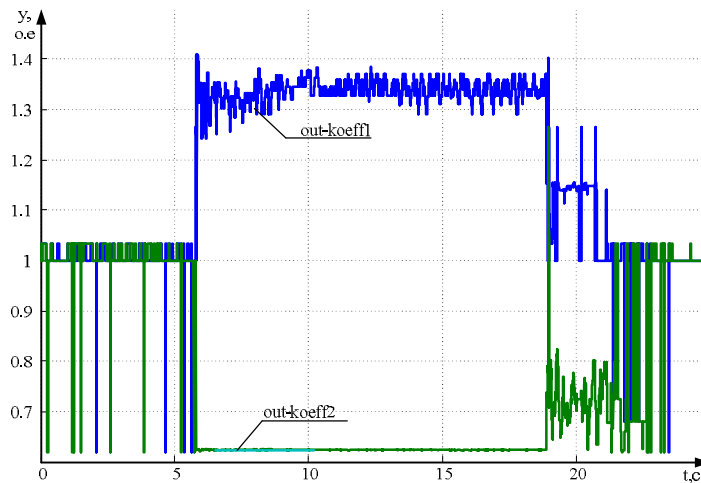


Рисунок 12 – Выходные сигналы нечетких контроллеров при эмуляции сигнала скорости системы ПЧ–АД–ШИП–ДПТ НВ

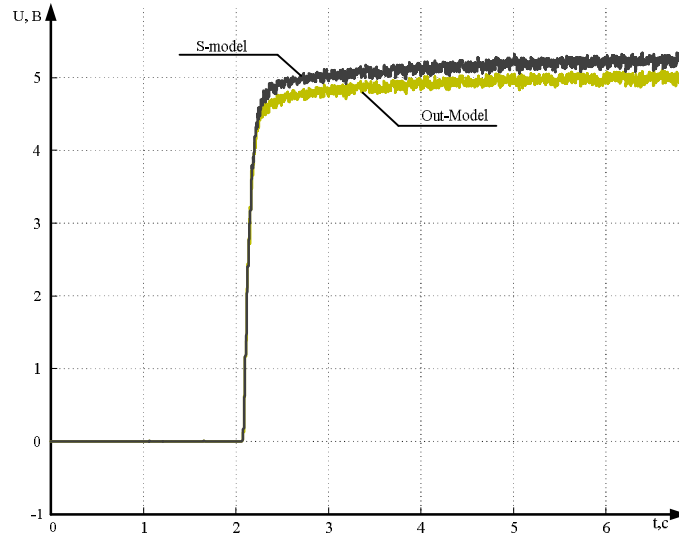


Рисунок 13 – Результаты эмуляции сигнала скорости (Out-Model) системы насосного агрегата в сравнении с экспериментальными данными (S-Model)

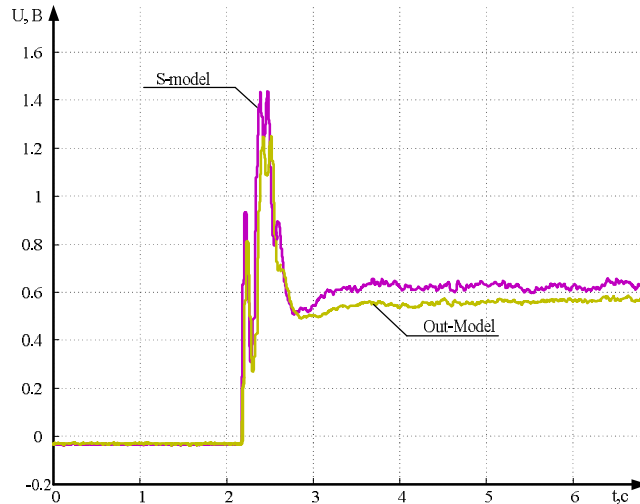


Рисунок 14 – Результаты эмуляции сигнала давления (Out-Model) системы насосного агрегата в сравнении с экспериментальными данными (S-Model)

ВЫВОДЫ. Применение систем анализа качества открывает возможность решить проблему снижения стоимости разработки и наладки систем автоматического управления и регулирования. Полученные результаты дают основание утверждать, что предложенный способ эмуляции сигналов электромеханических систем позволит улучшить эффективность автоматизированных отладочных комплексов для целей разработки САПР и обучения персонала.

В табл. 4 приведены максимальные рассогласования реальных и эмулированных сигналов, причем меньшая цифра соответствует установившемуся режиму, а большая – переходному.

Таблица 4 – Оценка точности нечеткой системы расчета выхода объекта по экспериментальным последовательностям

Тип сигнала	Максимальная погрешность, %
Апериодическое звено	6
Колебательное звено	9
Колебательно-форсирующее звено	12,5
Сигнал скорости системы ПЧ–АД–ШИП–ДПТ НВ	4–10
Сигнал скорости насосного агрегата	3–4
Сигнал давления насосного агрегата	4–7

Так как экспериментальные данные для серии опытов в системе ПЧ–АД–ШИП–ДПТ описывают работу замкнутой САР по угловой скорости, то результаты идентификации целесообразно использовать для оптимизации закона изменения сигнала программируемых задающих устройств или оптимизации регуляторов для многоконтурных САР.

Проведенные исследования позволяют утверждать следующее.

1. Предложенный метод, дополненный программными модулями поиска точек интерполяции в экспериментальных последовательностях, способен обеспечить адекватное воспроизведение реакции объекта управления, причем точность линейно и прямо зависит от количества термов входных и выходной переменных.

2. Для получения удовлетворительных результатов не требуется выдвигать гипотезы о порядке объекта управления, его структуре и имеющихся нелинейностях.

3. Для сохранения свойств реального объекта управления достаточно того, чтобы экспериментальные последовательности включали случаи, когда проявляются все важные свойства объекта, такие как колебательность, нелинейности, нестационарность.

4. Метод позволяет эмулировать сигналы объекта управления автоматически, т.к. основывается на загружаемых экспериментальных данных и неизменной структуре блоков нечетких вычислений, которые настраиваются один раз.

5. Выходные сигналы объекта управления будут иметь такие же метрологические характеристики, что и реальные сигналы, т.к. получены из них путем масштабирования и усреднения, что крайне важно при настройке систем управления на базе компьютеризованного комплекса, эмулирующего объект управления.

6. Точность результатов вполне удовлетворительная при существующей структуре и обеспечивает интегральную точность для сигналов скорости и давления до 0,6.

ЛИТЕРАТУРА

1. Архангельский В.И., Богаенко И.М., Грабовский Г.Г., Рюмшин М.О. Системы фuzzi-управления. – Киев: Техника, 1997. – 208 с.
2. Ушаков В. Использование унифицированных

имитационных комплексов при создании информационно-управляющих систем в судостроении [Электронный ресурс] // Современные технологии автоматизации. – 2013. – № 3. – С. 102–108. – Режим доступа: <http://www.cta.ru/cms/f/449467.pdf>

3. Ковалев С.Э. Схемная эмуляция в основе системы графического программирования судостроения [Электронный ресурс] // Промышленные измерения, контроль, автоматизация, диагностика (ПиКАД). – Вып. 4/2006. – С. 16–20. – Режим доступа: <http://www.picad.com.ua/0406/0406.htm>

4. Ковалев С.Э. Схемная эмуляция в основе системы графического программирования (часть 2) судостроения [Электронный ресурс] // Промышленные измерения, контроль, автоматизация, диагностика (ПиКАД). – Вып. 1/2007. – С. 10–15. Режим доступа: <http://www.picad.com.ua/0107/0107.htm>

5. Волов Г.Я. Энергосбережение и имитационное моделирование судостроения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.energovent.com/myfiles/Articles/EnergySaving.pdf>

6. Мітюшкін Ю.І., Мокін Б.І., Ротштейн О.П. Soft Computing: ідентифікація закономірностей нечіткими базами знань: монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2002. – 145 с.

7. Конох І.С., Найда В.В., Гула І.С. Комп'ютеризований лабораторний комплекс для дослідження інтелектуальних цифрових систем керування електроприводом // Вісник КДПУ. – Кременчук: КДПУ ім. М. Остроградського, 2008. – Вип. 6 (53), част. 2. – С. 17–21.

8. Сердюк А.А., Коренькова Т.В. Характеристики физической модели насосного комплекса с учетом кавитационных процессов // Електромеханічні і енергозберігаючі системи: щоквартальний наукововиробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 4/2012 (20). – С. 57–62.

9. Пат. 58707 Україна, МПК' F04D 27/00. Тренажер гідротранспортної установки / Коренькова Т.В., Родькін Д.Й., Сердюк О.О., Шоколов В.Н.; заявник та власник Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського. – № u201010703; заявл. 06.09.10.; опубл. 26.04.11; Бюл. № 8. – 7 с.

10. Дьяконов В., Круглов В. Математические пакеты расширения MATLAB: Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2001. – 480 с.

EMULATION OF THE OBJECT CONTROL SIGNALS FOR ELECTROMECHANICAL SYSTEMS BY USING FUZZY LOGICAL CONTROLLERS

I. Konoh, V. Nayda

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchug, 39600, Ukraine. E-mail: vaha303@yandex.ru

Describes a method for the automated construction of a model of control object, which is based on the definition of the next experimental sequences and interpolating the results of fuzzy expert system. A distinguishing feature of the method is to preserve the frequency characteristics and the output waveform identical to the experimental data. The requirements for the experimental sequences. An algorithm works are the final results of fuzzy controller settings. Shows the simulation model for research.

Analyzed the performance of the method on real experimental velocity signals obtained in the system inverter-induction motor with static loading excavator-style. Also, the pressure and velocity signals obtained hydrotransport system comprising a frequency converter, an induction motor, the water pump and the isolating valve. Proven ability to use the results of simulation for building systems and identification, as well as to adjust the real control devices out of process plants.

Key words: fuzzy controller, identification, interpolation.

REFERENCES

1. Arkhangelskij, V.I., Bogayenko, I.M., Grabovskiy, G.G. and Ryumshin, M.O. (1997), *Sistemy futstsi-upravleniya* [Futstsi-management system], Tekhnika, Kiev, Ukraine. (in Russian)
2. Ushakov, V. (2013), "The use of standardized simulation systems to create information management systems in shipbuilding", *Zhurnal "Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii"*, Vol. 3, pp. 102–108, available at: <http://www.cta.ru/cms/f/449467.pdf>. (in Russian)
3. Kovalev, S.E. (2006), "The circuit emulation system based on graphical programming", *Promyshlennye izmereniya, kontrol, avtomatizatsiya, diagnostika (PiKAD)*, Vol. 4, pp. 16–20, available at: <http://www.picad.com.ua/0406/0406.htm>. (in Russian)
4. Kovalev, S.E. (2007), "The circuit emulation system based on graphical programming (part 2)", *Promyshlennye izmereniya, kontrol, avtomatizatsiya, diagnostika (PiKAD)*, Vol. 1, pp. 10-15, available at: <http://www.picad.com.ua/0107/0107.htm>. (in Russian)
5. Volov, G.Y. (2013), "Energy conservation and simulation", available at: <http://www.energovent.com/myfiles/Articles/EnergySaving.pdf>. (in Russian)
6. Mityushkin Yu.I., Mokin, B.I. and Rotshteyn, O.P. (2002), *Soft Computing: identyfikatsiya zakonmirnostey nechitkymy bazamy znan* [Soft Computing: identification of patterns of fuzzy knowledge bases], UNIVERSUM-Vinnitsa, Vinnitsa, Ukraine. (in Russian)
7. Konoh, I.S., Nayda, V.V. and Hula, I.S. (2008), "Computerized laboratory system for the study of intelligent digital control systems of electric", *Visnyk KDPU: Naukovi pratsi KDPU*, Vol. 6, no. 53, pp. 17–21. (in Ukrainian)
8. Serdyuk, A.A. and Korenkova T.V. (2012), "Characteristics of a complex physical model of the pump taking into account the cavitation processes", *Elektromehanični i energozberigayuchi systemy. Schokvartalnyi naukovo-virobnichyi zhurnal*, Vol. 4, no. 20, pp. 57–62. (in Russian)
9. Korenkova, T.V., Rodkin, D.Y., Serdyuk, O.O. and Shokolov, V.N. Pat. 58707 Ukraine, IPC 'F04D 27/00. The simulator hydrotransport install, *Applicant and owner Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, no. u201010703; appl. 06.09.10., Publ. 26.04.11, Bull. 8. (in Ukrainian)
10. Dyakonov, V. and Kruglov, V. (2001), *Matematicheskie pakety rasshireniya MATLAB. Spetsialnyi spravochnik* [Mathematical expansion packs MATLAB. A special handbook], Piter, St. Peterburg, Russia. (in Russian)

Стаття надійшла 18.11.2013.