

**Черный С. П., Охотников А. В.**  
**S. P. Chernii, A. V. Okhotnikov**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТОЙ НЕЧЁТКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
С ИНТЕГРАЦИЕЙ ВНУТРЕННИХ МОДУЛЕЙ НА ОСНОВЕ ОПЕРАТОРА УМНОЖЕНИЯ**

**MODELING OF A DEVELOPED FUZZY CONTROL SYSTEM WITH INTEGRATION  
OF INTERNAL MODULES BASED ON THE MULTIPLICATION OPERATOR**

**Черный Сергей Петрович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: керару@knastu.ru.

**Sergei P. Chernii** – PhD in in Engineering, Associate Professor, Head of the Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: керару@knastu.ru.

**Охотников Александр Владимирович** – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ерапу@knastu.ru.

**Alexander V. Okhotnikov** – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ерапу@knastu.ru.

**Аннотация.** В представленной работе рассматривается один из возможных подходов к моделированию развитой нечёткой системы управления с интеграцией внутренних модулей, организующих вложенный каскад, на основе оператора умножения. Выделены особенности функционирования технологического процесса, и с учётом этого проведено моделирование процедур интеллектуального управления, реализованных на основе нечёткого многокаскадного подхода, в условиях воздействия существенного количества возмущающих воздействий, как недетерминированных, так и вполне определённых, и показано наличие взаимного влияния элементов системы регулирования. Проведён анализ динамических характеристик переходных процессов в интеллектуальной системе управления сложным технологическим объектом.

**Summary.** In the present paper, one of the possible approaches to modeling a developed fuzzy control system with the integration of internal modules organizing a nested cascade based on the multiplication operator is considered. The features of the functioning of the technological process are highlighted, and with this in mind, the simulation of intelligent control procedures implemented on the basis of a fuzzy multi-stage approach is carried out under the influence of a significant number of disturbing influences, both non-deterministic and well-defined, and the presence of mutual influence of the elements of the control system is shown. The analysis of dynamic characteristics of transients in an intelligent control system of a complex technological object is carried out.

**Ключевые слова:** нечёткий логический регулятор, терм-множество, нечёткое множество, лингвистическая переменная, интеллектуальная система управления.

**Key words:** fuzzy logic controller, term, fuzzy set, linguistic variable, intelligent control system.

*Исследования проводятся в рамках гранта № ВН010/2021 «Разработка принципов построения интеллектуальных систем управления сложными техническими объектами на основе критериев энергоэффективности».*

УДК 681.5.01:658.5

**Введение.** Применение интеллектуальных подходов к реализации систем управления технологическими процессами на текущий момент связано с такими объектами регулирования, для которых характерно наличие целого ряда формальных признаков. Среди таких признаков можно выделить наличие информации об объекте регулирования в количественном и качественном виде, существенное количество различных возмущающих факторов, а также большое число координат

системы, зависящих друг от друга как напрямую, так и косвенно. Подвесные системы транспортных модулей конструктивно состоят из большого числа регулируемых гидравлических или пневматических элементов, регулирование которых зачастую производится на основе знаний оператора в ручном режиме. В случае соединения нескольких траловых платформ в единую систему с целью повышения грузоподъёмности возникает дополнительная задача стабилизации такой системы в горизонтальном положении. Для решения совокупности указанных задач предлагается использовать развитую нечёткую систему управления, позволяющую не только контролировать положение гидроцилиндров локального уровня регулирования, но и выполнять выравнивание платформы в горизонтальном положении [1; 2].

**Особенности функционирования объекта управления.** Для формализации математической модели развитой нечёткой системы управления с реализацией внутренних модулей на основе оператора умножения рассмотрим упрощённую функциональную схему гидравлической системы полуплатформы, представленную на рис. 1. Для приведённой ниже функциональной схемы приняты следующие допущения: количество активных элементов подвесной системы сокращено до четырёх, поверхность платформы представляет собой абсолютно жёсткую пластину [5]. В процессе функционирования представленного технологического объекта возникает целый ряд ограничивающих факторов, которые не только определяются его конструктивными особенностями, но и диктуются условиями внешней среды.

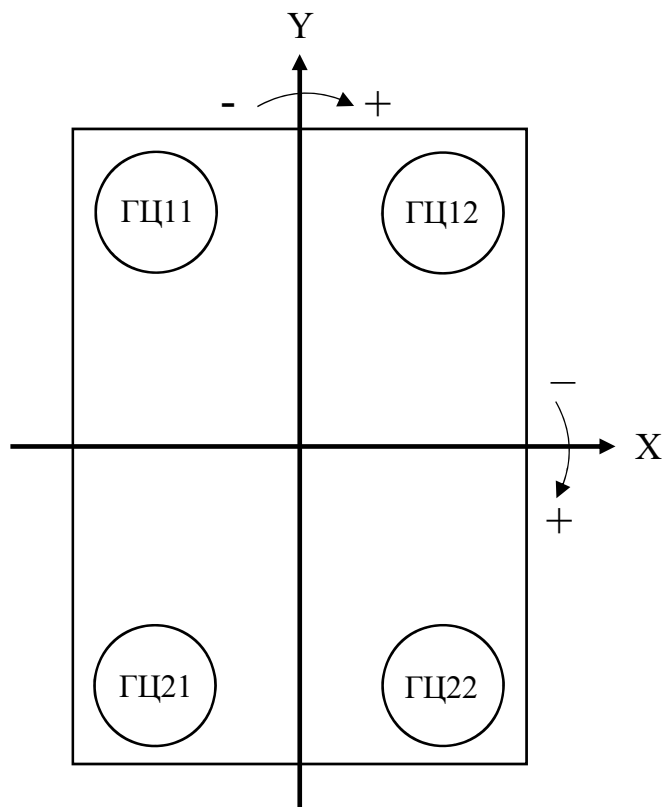


Рис. 1. Упрощённая функциональная схема гидравлической системы полуплатформы

С учётом того, что грузы, транспортируемые на подобного рода траловых системах, представляют собой объекты с существенными массогабаритными характеристиками и в дополнение к этому крепление таких объектов не представляется возможным, одним из важнейших критериев при реализации процедур управления является стабилизация кренов всей системы, возникающих вследствие кривизны дорожного покрытия.

**Моделирование многокаскадного нечёткого регулятора.** Интеллектуальная система управления, реализующая стабилизацию высокотоннажной траловой системы, структурно может

быть реализована с использованием подхода, основанного на применении развитых нечётких регуляторов. Внутренний вложенный каскад такого регулятора представляет собой набор простейших нечётких модулей с единственным информационным входом и выходом, реализующим закон управления отдельным гидроцилиндром подвесной системы. Внешний каскад нечёткой системы управления реализует функцию стабилизации платформы относительно горизонтального положения за счёт изменения уставок внутренних нечётких модулей.

Входные лингвистические переменные «X» и «Y», соответствующие отклонению системы от горизонтального положения, формализуются пятью элементами в базовом терм-множестве и имеют аппроксимированные функции принадлежности треугольного вида [3; 4]. Выходные переменные реализуют набор констант, который задаёт соответствующее положение каждому модулю подвесной системы вложенного каскада объекта регулирования. Регулирование гидроцилиндрами во внутреннем каскаде выполнено с использованием элементарных нечётких логических регуляторов Сугено с единственными лингвистическими переменными на входе и выходе. На рис. 2-4 представлена настройка нечёткого логического регулятора с алгоритмом вывода Такаги-Сугено.

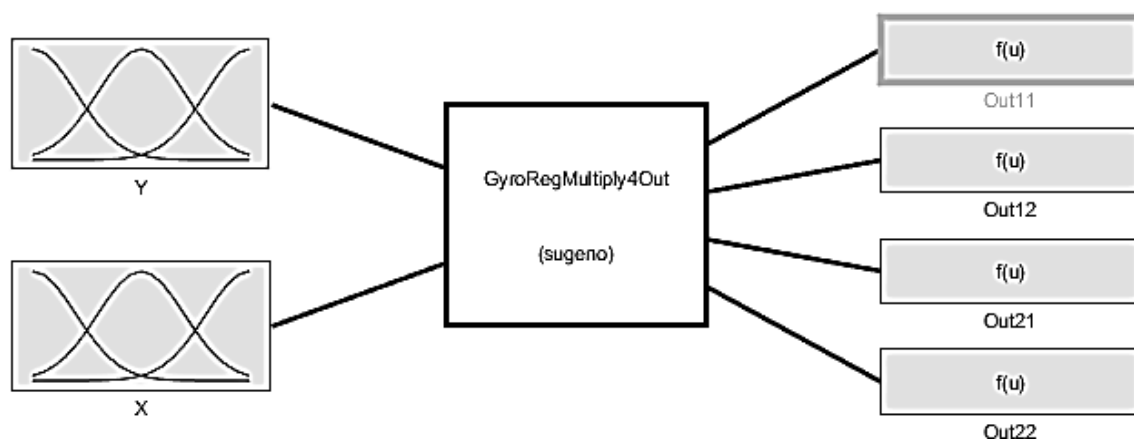


Рис. 2. Нечёткий логический регулятор, реализующий классификацию внутренних модулей по пропорциональному принципу с применением оператора умножения

Нечёткая продукционная база знаний регулятора представляет собой перечень из 25 правил, и её фрагмент имеет следующий вид:

1. Если (Y есть null) и (X есть null) тогда (Out11 = 1) (Out12 = 1) (Out21 = 1) (Out22 = 1);
2. Если (Y = lowIncline) и (X есть null) тогда (Out11 = 0,5) (Out12 = 1) (Out21 = 0,5) (Out22 = 1);
- ...
24. Если (Y есть lowMidIncline) и (X есть highIncline) тогда (Out11 = 1) (Out12 = 50) (Out21 = 1) (Out22 = 0,5);
25. Если (Y есть lowMidIncline) и (X есть highMidIncline) тогда (Out11 = 1) (Out12 = 25) (Out21 = 1) (Out22 = 0,75).

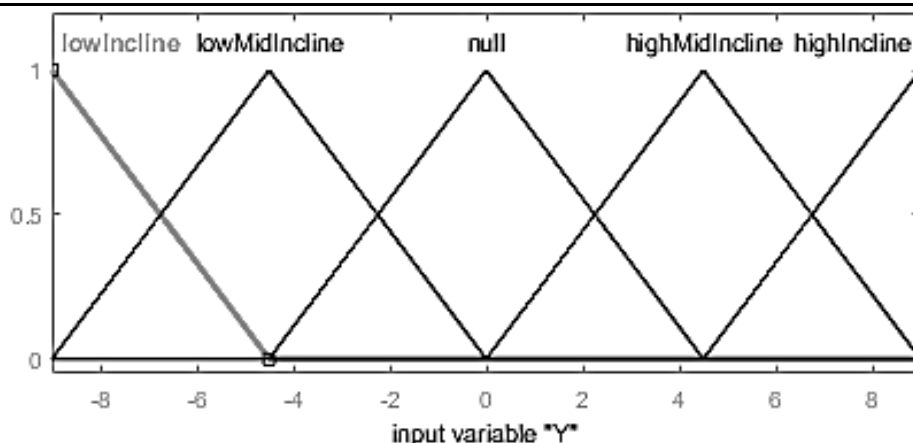


Рис. 3. Входная лингвистическая переменная «Y»

**Результаты моделирования.** На рис. 5 представлен график переходного процесса в гидроприводах с использованием нечёткого логического регулятора, реализующего классификацию внутренних модулей по пропорциональному принципу с их интеграцией в общую многокаскадную структуру на основе оператора умножения. Сверху вниз показаны переходные характеристики в гидроцилиндрах ГЦ11, ГЦ12, ГЦ21, ГЦ22.

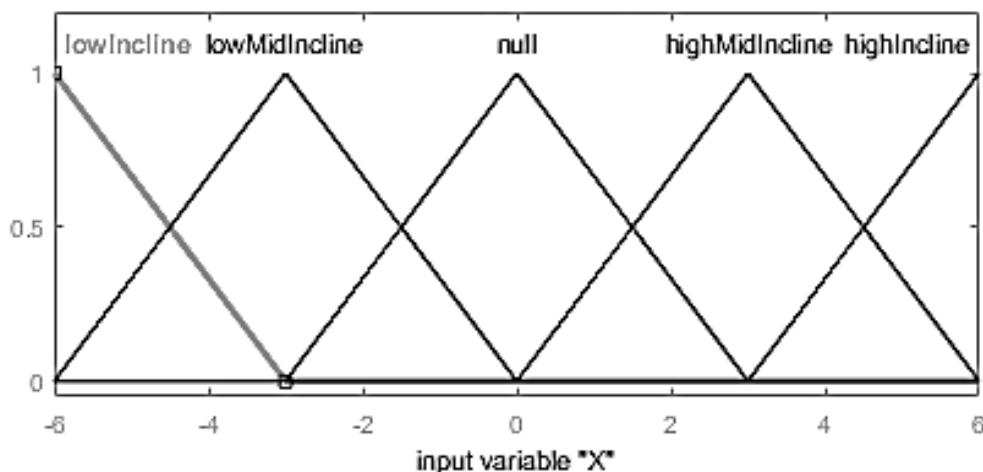


Рис. 4. Входная лингвистическая переменная «X»

На рис. 5 выделен ряд наиболее характерных зон, в которых представлено изменение уставок гидроцилиндров в случаях изменения кривизны дорожного покрытия, обусловленного ландшафтом местности.

В момент времени с 0,5 до 1 с (зона I) на вход к нечёткому логическому регулятору (НЛР) поступают сигналы  $X = +0^\circ$ ,  $Y = +9^\circ$ , соответствующие отклонению платформы от горизонтального положения на определённый угол. Данные значения интерпретируются интеллектуальной системой как «произошёл наклон транспортной платформы относительно оси Y». Реагируя на входные значения, НЛР формирует управляющий выходной сигнал – выдвинуть гидроцилиндры 12 и 22 (см. рис. 1), позволяющие скорректировать отклонение платформы.

В момент времени с 1,5 до 2 с (зона II) на вход к НЛР поступают сигналы:  $X = -6^\circ$ ,  $Y = 0^\circ$ , соответствующие отклонению платформы от горизонтального положения на определённый угол. Данные значения интерпретируются интеллектуальной системой как «произошёл наклон транспортной платформы относительно оси X». Реагируя на входные значения, НЛР формирует управ-

ляющий выходной сигнал – выдвинуть гидроцилиндры 11 и 12 (см. рис. 1), позволяющие скорректировать отклонение платформы.

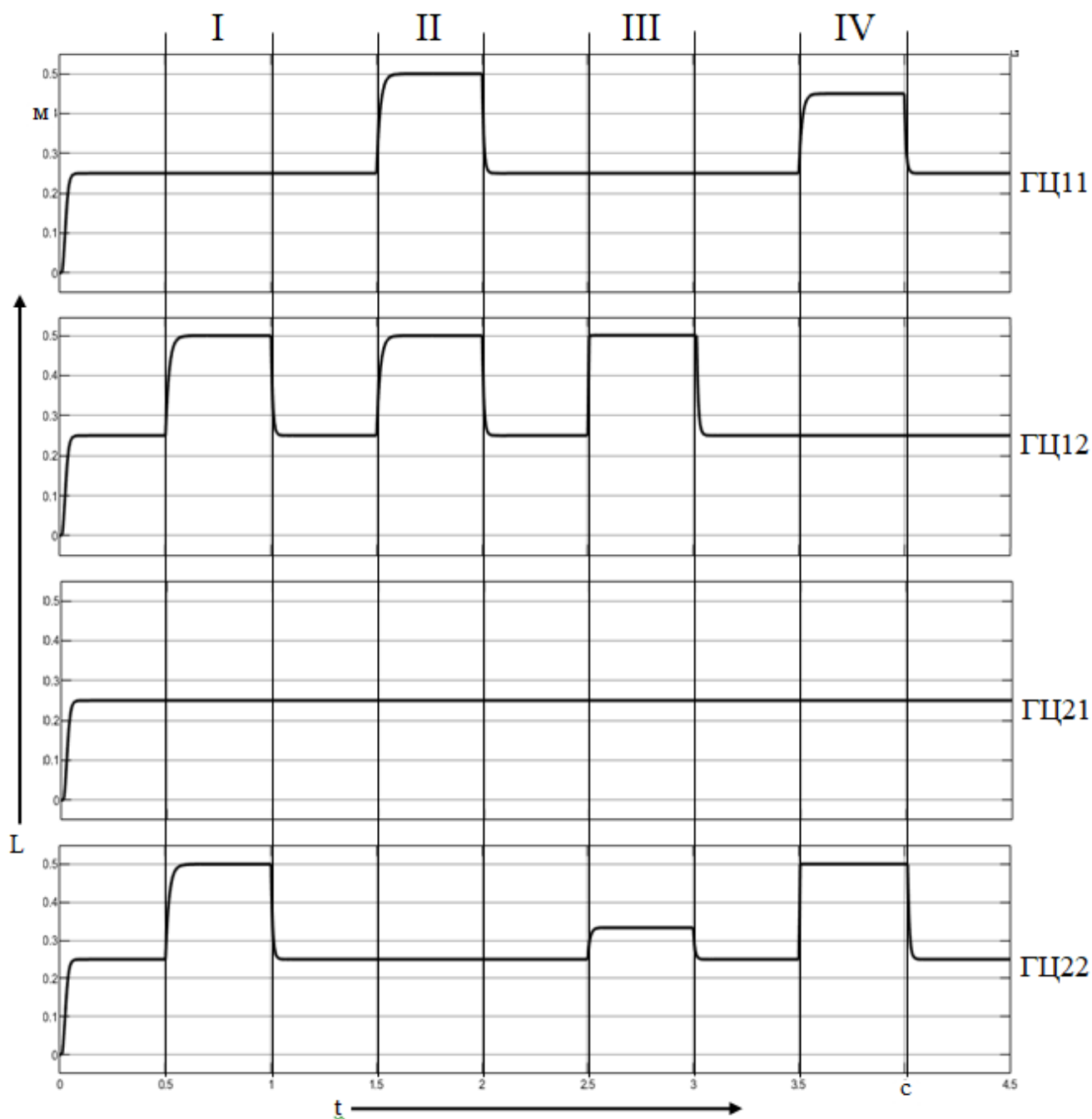


Рис. 5. Графики переходных процессов в гидроприводах при подаче на систему управляющего воздействия без учёта возмущения

На рис. 6 изображён график переходного процесса при подаче на систему возмущающих воздействий в виде синусоидального сигнала с белым шумом, что позволяет провести моделирование поведения системы с учётом неровностей, обусловленных непосредственно дорожным покрытием.

Анализ рис. 5 и 6 в моменты времени от 2,5 до 3 с и от 3,5 до 4 с (зоны III и IV) показал, что система управления работает некорректно. Такая реакция связана с тем, что классификация внутренних модулей производится по пропорциональному принципу с применением оператора умно-

жения и, как следствие, происходит накопление ошибки интегрирования. Во время скачкообразного изменения входного сигнала НЛР внешнего каскада генерирует управляющий сигнал, который резко увеличивает входной сигнал модуля внутреннего каскада, что приводит к некорректному изменению уставок гидроцилиндров подвесной системы объекта регулирования.

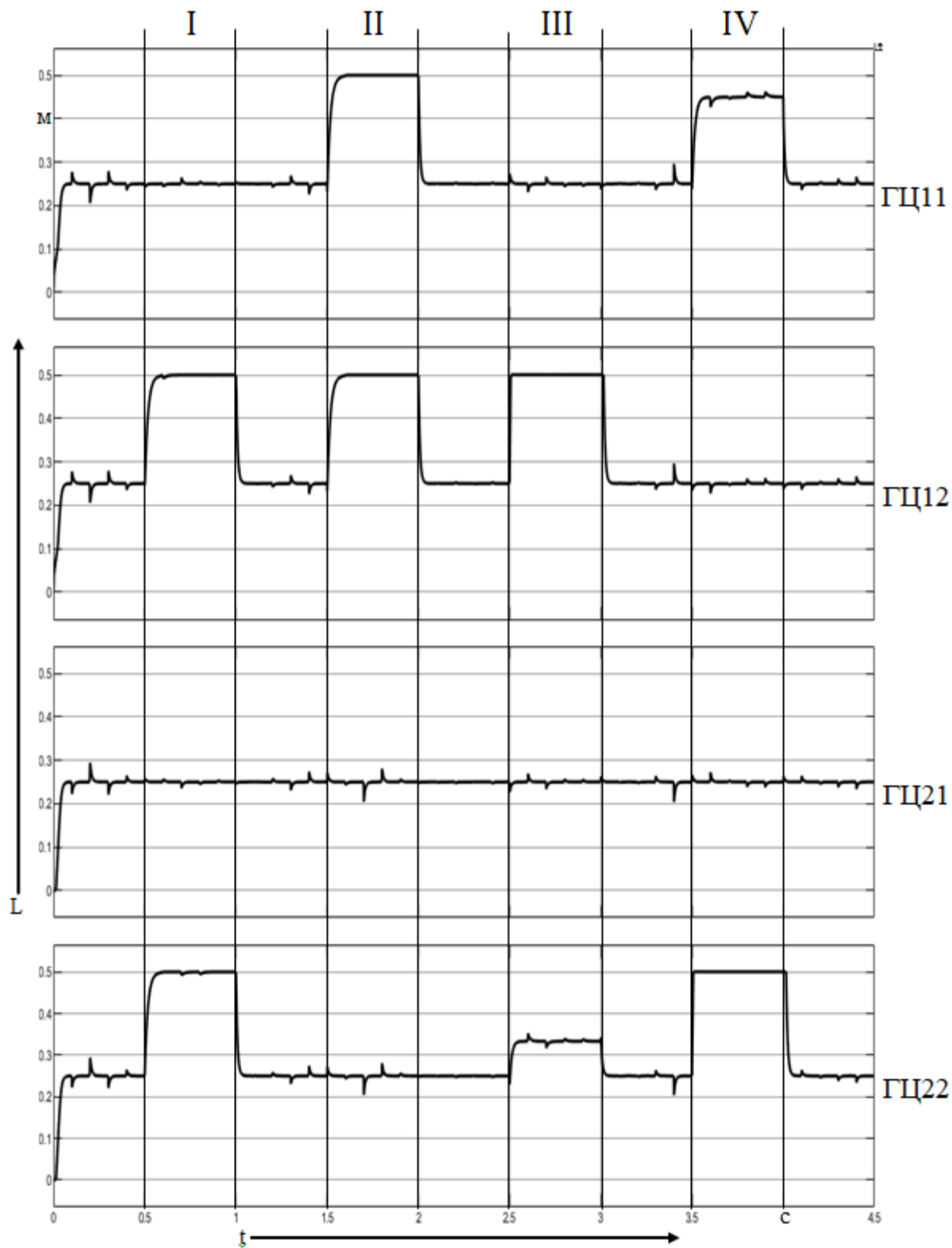


Рис. 6. Графики переходных процессов в гидро приводах при подаче на систему возмущающего воздействия в виде белого шума

**Заключение.** Исходя из анализа результатов моделирования, можно сделать вывод, что предложенная реализация нечёткого логического регулятора внешнего каскада, реализующего классификацию внутренних модулей (нечётких логических регуляторов внутреннего каскада) с их интеграцией по пропорциональному принципу с применением оператора умножения, позволяет реализовать процедуры интеллектуального управления сложным технологическим процессом. Однако такой подход не лишён некоторых недостатков, связанных с накоплением ошибки регулирования вследствие внедрения в систему звена, реализующего функцию произведения управляющих координат между каскадами. Выходом из подобной ситуации может стать замена оператора умножения при интеграции вложенных каскадов на оператор суммирования.

Применение интеллектуальных систем управления технологическими процессами на основе многокаскадного нечёткого управления позволяет проводить гибкую настройку системы на целый ряд возмущающих факторов, как внешних, так и внутренних, ряд из которых имеет недетерминированный характер. Для траловых систем применение такого подхода позволит не только повысить скорость перемещения высокотоннажных объектов, но и использовать дороги общего пользования с учётом возможных неровностей, обусловленных наличием подъёмов, кривизной траектории и качеством покрытия, и, как следствие, избавит от необходимости строительства специализированных дорог.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Cherniy S. P., Susdorf V. I., Buzikaeva A. V., Khrulkov V. N. Analysis of approaches to modelling the fuzzy control systems with extension of their functional capabilities // EAI Endorsed Transactions on Energy Web (2021), 31, P. e4. DOI: 10.4108/eai.13-7-2018.165496.
2. Один из подходов к моделированию двухкаскадной нечёткой системы управления электроприводом постоянного тока с двухзонным регулированием скорости / С. П. Черный, В. А. Соловьев, А. В. Бузикаева, С. И. Сухоруков // Электротехнические системы и комплексы. – 2022. – № 2 (55). – С. 32-39.
3. Пегат, А. Нечёткое моделирование и управление / А. Пегат; пер. с англ. А. Г. Подвесовский, Ю. В. Тюменцев; под ред. Ю. В. Тюменцева. – М.: Лаборатория знаний, 2020. – 801 с.
4. Соловьев, В. А. Искусственный интеллект в задачах управления. Интеллектуальные системы управления технологическими процессами: учеб. пособие / В. А. Соловьев, С. П. Черный. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2006. – 74 с.
5. Хрульков, В. Н. Один из подходов к моделированию процесса стабилизации высокотоннажной платформы / В. Н. Хрульков, С. П. Черный, А. В. Охотников // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы V Междунар. науч.-практ. конф., г. Комсомольск-на-Амуре, 6-11 декабря 2021 г. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2022. – С. 100-103.