

**Лямин М. А., Черный С. П.**  
**M. A. Lyamin, S. P. Cherny**

**СИСТЕМА СОВМЕСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ МОТОР-КОЛЕСО  
РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ  
ТРУБОПРОВОДОВ**

**JOINT CONTROL SYSTEM OF MOTOR-WHEEL ELECTRIC DRIVES OF ROBOTIC  
TRANSPORTATION SYSTEM FOR TRUNK PIPELINES**

**Лямин Михаил Андреевич** – студент магистратуры кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: lyamin.ma@email.knastu.ru.

**Mikhail A. Lyamin** – Master's Degree Student, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: lyamin.ma@email.knastu.ru.

**Черный Сергей Петрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: керару@knastu.ru.

**Sergey P. Cherny** – PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: керару@knastu.ru.

**Аннотация.** В работе предложена концепция модульной робототехнической транспортной системы широкого назначения для проведения комплексного обслуживания трубопроводов. Особенностью рассматриваемой системы является реализация системы позиционирования на основе ряда блоков функционально связанных электроприводов. В статье описывается синтез системы совместного управления электроприводами типа мотор-колесо робототехнического транспортного комплекса для магистральных трубопроводов. Рассчитана классическая система управления на основе ПИД-регулятора для случаев усреднённого и относительного движения. Выполнено моделирование системы совместного управления электроприводами с использованием ПИД-закона, и получена переходная характеристика с учётом влияния возмущающего воздействия.

**Summary.** The paper proposes the concept of a modular robotic transport system with a broad name for carrying out complex maintenance of pipelines. A feature of the system under consideration is the implementation of a positioning system based on a number of blocks of functionally connected electric drives. The article describes the synthesis of a system of joint control of motor-wheel electric drives of a robotic transport complex for trunk pipelines. A classical control system based on a PID controller is calculated for cases of averaged and relative motion. The simulation of the system of joint control of electric drives using the PID law is carried out and a transient characteristic is obtained taking into account the influence of the disturbing effect.

**Ключевые слова:** совместное управление, робототехнический транспортный комплекс, взаимосвязанный электропривод.

**Key words:** joint control, robotic transport complex, interconnected electric drive.

УДК 681.5

**Введение.** Системы и средства автоматизации на сегодняшний момент характеризуются высокой степенью гибкости, роботизации, интеллектуальности и, как следствие, универсальности [8–10]. При этом сочетание обозначенных характеристик зачастую приводит к возникновению различных коллизий, связанных как с формализацией технологического процесса, так и с форми-

рованием процедур регулирования в условиях действия ряда критериев, ограничений и требований к объекту управления. Транспортировка энергетических ресурсов с применением магистральных трубопроводов в настоящее время является приоритетной областью в условиях действия ограничений не только технического, экономического, но и политического характера. Это обуславливает создание и разработку специализированных робототехнических устройств для автоматизации целого ряда технологических процессов, протекающих внутри магистральных трубопроводов, при выполнении работ по его прокладке и обслуживанию. К числу таких устройств может быть отнесён и разрабатываемый робототехнический транспортный комплекс (РТК), предназначенный для выполнения технологических операций внутри трубопроводов переменного сечения. Одним из ключевых элементов РТК является система регулируемых автономных электроприводов, располагаемых на регулируемых опорах. Техническую реализацию электропривода предложено выполнять в виде законченного конструктива мотор-колесо, основное назначение которого обеспечить перемещение РТК по внутренней поверхности трубопровода. Поскольку система автономно регулируемых приводов жёстко привязана к телу РТК, то возникает необходимость оценки целесообразности построения системы совместного управления электроприводами.

**Описание объекта управления.** На рис. 1 приведён общий вид одного из возможных вариантов технического исполнения РТК. Данный робот оснащён набором радиально расположенных упорных ног с зафиксированными на концах каждой мотор-колёсами. Система упоров выполнена регулируемой, снабжена системой датчиков, осуществляющих измерение расстояния от тела транспортной платформы до поверхности трубы, что в итоге позволяет центрировать положение РТК в трубе и осуществлять повороты робота за счёт смещения его центра относительно центральной оси трубопровода. Кроме того, изменение длины упора позволяет регулировать усилие прижима мотор-колеса к поверхности трубы. Реализация системы перемещения на основе группы автономных электроприводов предполагает два возможных варианта построения систем управления электроприводами:

- с индивидуальной системой регулирования скорости каждого мотор-колеса с контролем его скорости;
- с совместным управлением скоростями мотор-колёс с контролем среднего значения скорости.

Первый вариант относительно прост в реализации, ориентирован на стандартные настройки регуляторов и обеспечит приемлемые характеристики электропривода в статических режимах работы.

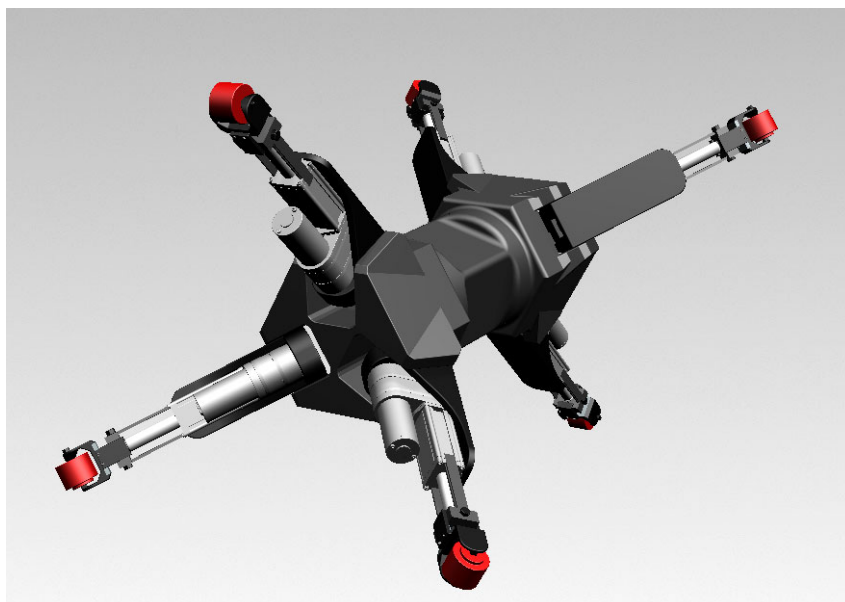


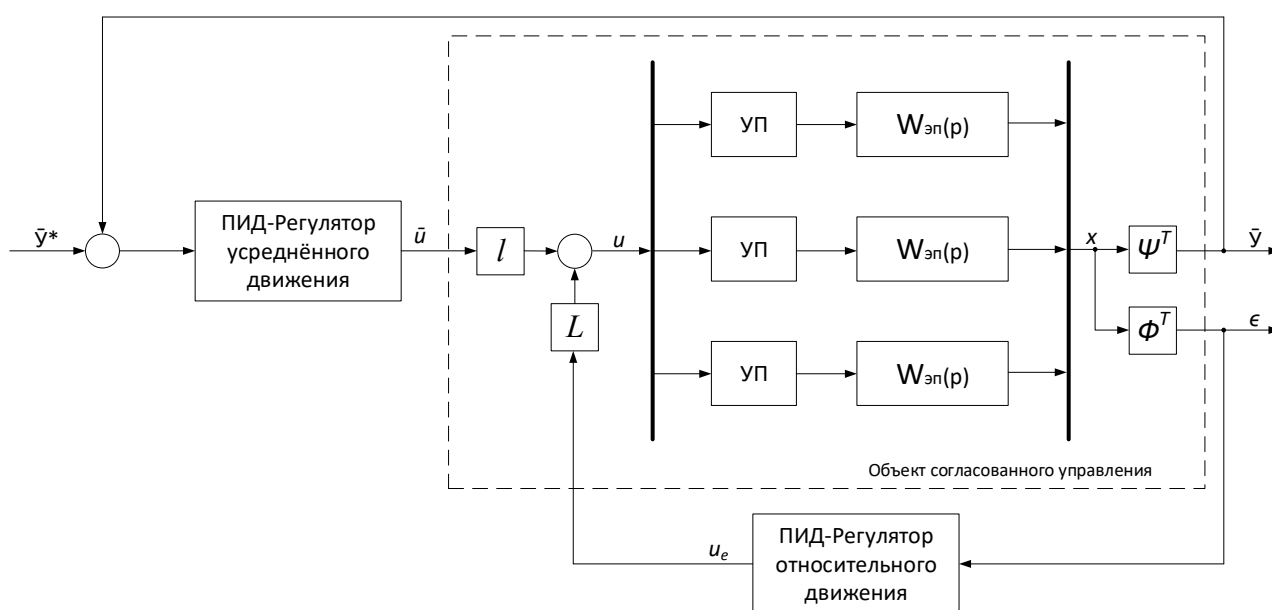
Рис. 1. Модель РТК для магистральных трубопроводов

В динамических режимах работы, при необходимости учёта специфических особенностей трубопровода (наличие поворотных сегментов, изменение диаметра, различная структура поверхности, загрязнённость и т. п.), предпочтение следует отдать второму варианту.

Дальнейший материал ориентирован на исследование второго варианта системы управления перемещением РТК.

**Постановка задачи.** При разработке и исследовании будем полагать, что каждая система мотор-колесо представляет собой систему автономного электропривода, содержащую собственно двигатель с индивидуальным управляемым преобразователем. Связь между электроприводами абсолютно жёсткая. Электроприводы реализованы на базе машины постоянного тока. За базовый электропривод, контролирующий среднее значение скорости перемещения принимается любой из трёх электроприводов.

В таком случае функциональную схему совместного управления перемещением РТК можно представить в виде, показанном на рис. 2.



УП – управляющий преобразователь напряжения электропривода;  $W_{эл}(p)$  – передаточная функция электропривода;  $\Phi$  – матрица коэффициентов уравнения относительного движения;

$\Psi$  – матрица коэффициентов уравнения усреднённого движения;  $L$  – матрица коэффициентов относительного управления;  $l$  – вектор коэффициентов усреднённого управления

Рис. 2. Функциональная схема совместного управления электроприводами РТК

**Синтез регулятора.** Движение РТК обеспечивают мотор-колёса, установленные на конце упоров распорного механизма. Примем следующее допущение: механизм позиционирования идеально фиксирует РТК внутри стенок трубы, за счёт чего нагрузка на мотор-колёса распределена равномерно. Критерием для задачи согласованного управления будет являться регулирование среднего значения скоростей приводов при условии равенства этих скоростей между собой:

$$\bar{y} = \frac{1}{3}(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3); \quad \omega_1 = \omega_2; \quad \omega_2 = \omega_3.$$

Тогда матрицы коэффициентов

$$\Phi^T = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}; \quad \Psi^T = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix}; \quad L = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ -1 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix}; \quad l = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

В электродвигателе постоянного тока протекают как электрические, так и механические процессы в соответствии с законом равновесия моментов (механические) и законом Кирхгофа

(электрические). В соответствии с уравнениями, описывающими эти процессы, составим детализированную структурную схему двигателя, учитывая, что она включает в себя два интегратора (объект второго порядка,  $n = 2$ ), выходы которых и являются переменными состояния  $\omega(t)$ ,  $I_{\text{я}}(t)$  (см. рис. 3) [2].

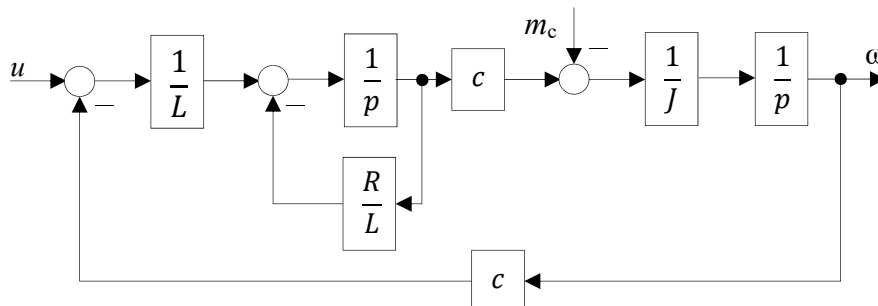


Рис. 3. Детализированная структурная схема электродвигателя

Детализированную структурную схему двигателя при необходимости можно привести к структурной схеме (см. рис. 4) с общепринятыми в электроприводе обозначениями:

$K_{\text{д}} = \frac{1}{c}$  – передаточный коэффициент двигателя;

$T_{\text{я}} = \frac{L}{R}$  – постоянная времени якорной цепи;

$T_{\text{эм}} = \frac{RJ}{c^2}$  – электрохимическая постоянная времени.

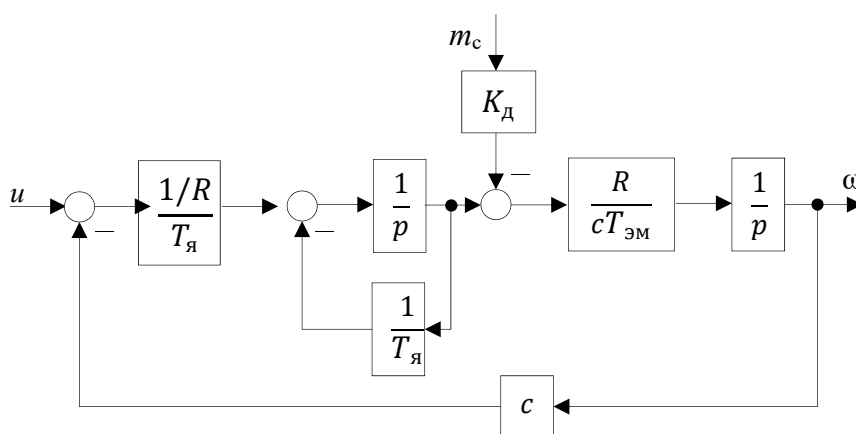


Рис. 4. Структурная схема электродвигателя

За передаточную функцию управляемого преобразователя примем функцию, широко используемую при инженерных расчётах:

$$W_{\text{п}} = \frac{K_{\text{п}}}{T_{\text{п}}p + 1},$$

где  $K_{\text{п}}$  – коэффициент усиления УП;  $T_{\text{п}}$  – постоянная времени цепи управления преобразователем.

Путём преобразований структурной схемы двигателя, а также с учётом наличия управляемого преобразователя напряжения получим передаточную функцию по задающему воздействию:

$$\frac{\omega(p)}{u(p)} = \frac{K_{\text{п}} \cdot K_{\text{д}}}{(T_{\text{п}}p + 1) \cdot (T_{\text{эм}}T_{\text{я}}p^2 + T_{\text{эм}}p + 1)}$$

В соответствии с методом согласованного управления [1, 3] матричная передаточная функция объекта канала относительного движения

$$W_{0e}(p) = \begin{bmatrix} \frac{K_{\Pi} \cdot K_{\text{д}}}{(T_{\Pi} p + 1) \cdot (T_{\text{эм}} T_{\text{я}} p^2 + T_{\text{эм}} p + 1)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_{\Pi} \cdot K_{\text{д}}}{(T_{\Pi} p + 1) \cdot (T_{\text{эм}} T_{\text{я}} p^2 + T_{\text{эм}} p + 1)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_{\Pi} \cdot K_{\text{д}}}{(T_{\Pi} p + 1) \cdot (T_{\text{эм}} T_{\text{я}} p^2 + T_{\text{эм}} p + 1)} \end{bmatrix}.$$

Для настройки системы регулирования с учётом возможных возмущений используем ПИД-регулятор. Настройку будем осуществлять на стандартную форму:

$$W_{0e}(p) = \frac{\left( K_{ep} + \frac{K_{ei}}{p} + K_{ed} p \right) \cdot \frac{K_{\Pi} \cdot K_{\text{д}}}{(T_{\Pi} p + 1) \cdot (T_{\text{эм}} T_{\text{я}} p^2 + T_{\text{эм}} p + 1)}}{1 + \left( \left( K_{ep} + \frac{K_{ei}}{p} + K_{ed} p \right) \cdot \frac{K_{\Pi} \cdot K_{\text{д}}}{(T_{\Pi} p + 1) \cdot (T_{\text{эм}} T_{\text{я}} p^2 + T_{\text{эм}} p + 1)} \right)};$$

$$W_{0e}(p) = \frac{K_{\Pi} \cdot K_{\text{д}} \cdot (K_{ep} p + K_{ei} + K_{ed} p^2)}{T_{\Pi} T_{\text{эм}} T_{\text{я}} p^4 + (T_{\text{эм}} T_{\text{я}} + T_{\Pi} T_{\text{эм}}) p^3 + (T_{\Pi} + T_{\text{эм}} + K_{\Pi} K_{\text{д}} K_{ed}) p^2 + (K_{\Pi} K_{\text{д}} K_{ep} + 1) p + K_{\Pi} K_{\text{д}} K_{ei}};$$

$$T_{\Pi} T_{\text{эм}} T_{\text{я}} p^4 + (T_{\text{эм}} T_{\text{я}} + T_{\Pi} T_{\text{эм}}) p^3 + (T_{\Pi} + T_{\text{эм}} + K_{\Pi} K_{\text{д}} K_{ed}) p^2 + (K_{\Pi} K_{\text{д}} K_{ep} + 1) p + K_{\Pi} K_{\text{д}} K_{ei} = p^4 + 4\omega_0 p^3 + 6\omega_0^2 p^2 + 4\omega_0^3 p + \omega_0^4.$$

Приравнявая коэффициенты членов знаменателей при равных степенях, получим выражения для коэффициентов ПИД-регулятора:

$$K_{ep} = \frac{2.6\omega_0^3 - 1}{K_{\Pi} K_{\text{д}}}; \quad K_{ei} = \frac{\omega_0^4}{K_{\Pi} K_{\text{д}}}; \quad K_{ed} = \frac{3.4\omega_0^2 - T_{\Pi} - T_{\text{эм}}}{K_{\Pi} K_{\text{д}}},$$

где  $K_{ep}$  – коэффициент пропорциональной части регулятора;  $K_{ei}$  – коэффициент интегрирующей части регулятора;  $K_{ed}$  – коэффициент дифференцирующей части регулятора;  $\omega_0$  – значение модуля корней характеристического уравнения стандартной формы.

По аналогии параметры регулятора канала усреднённого движения будут определяться так же, как и регулятора канала относительного движения.

На рис. 5 представлена структурная схема системы управления электродвигателями мотор-колесо.

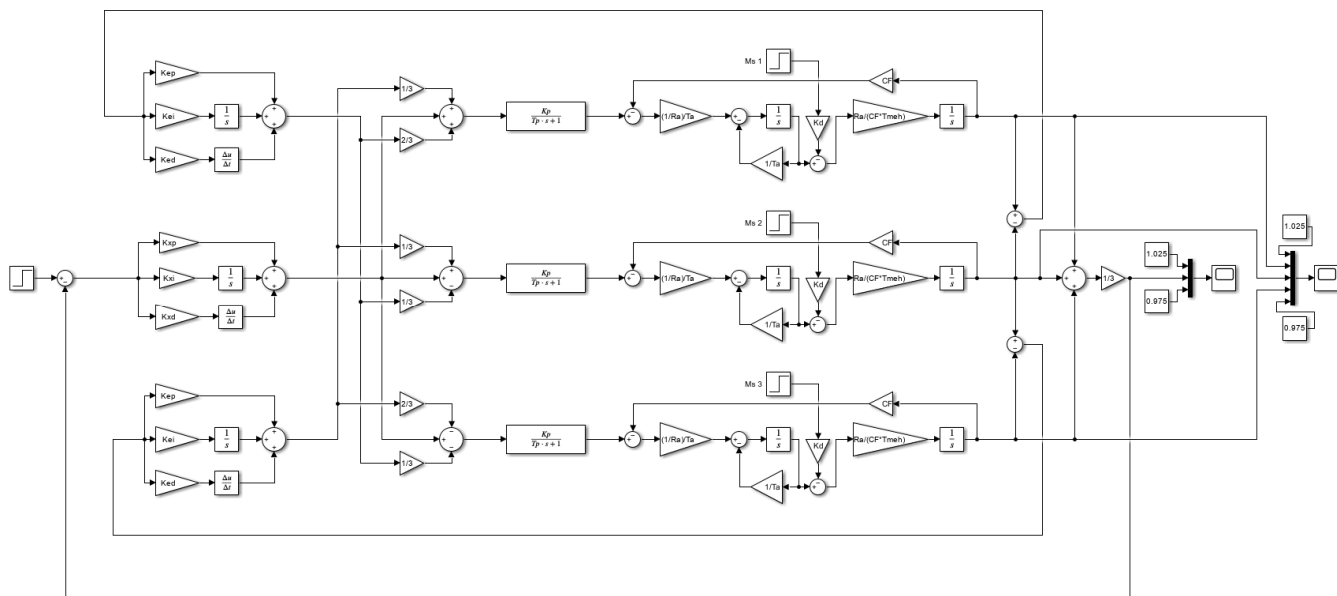


Рис. 5. Структурная схема системы совместного управления электродвигателями мотор-колесо

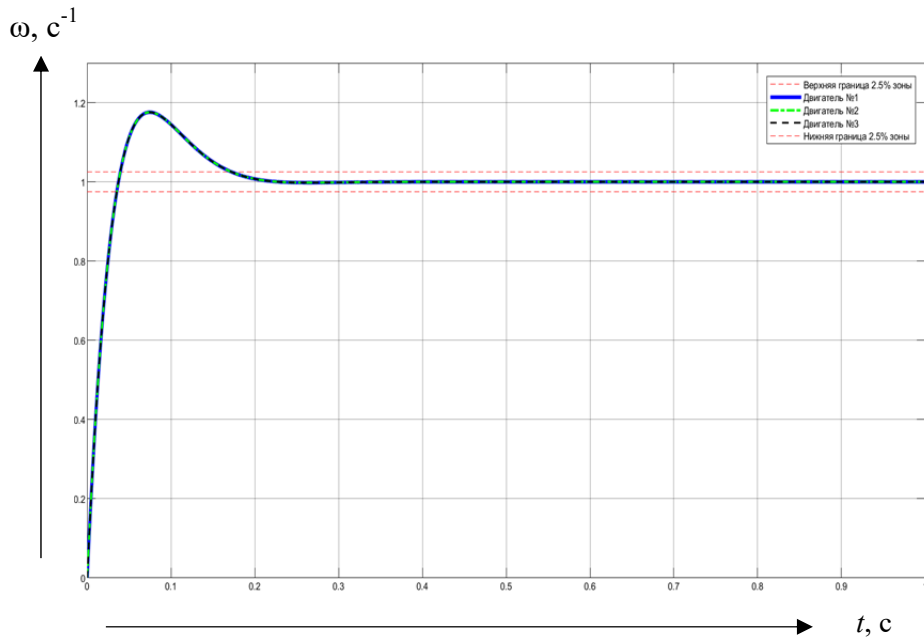


Рис. 6. Переходные характеристики системы управления по скорости электродвигателей типа мотор-колесо

На рис. 6 представлены графики переходных характеристик системы. На рис. 7 показана реакция системы на согласованную нагрузку. На рис. 8-9 показана реакция системы на рассогласованную нагрузку.

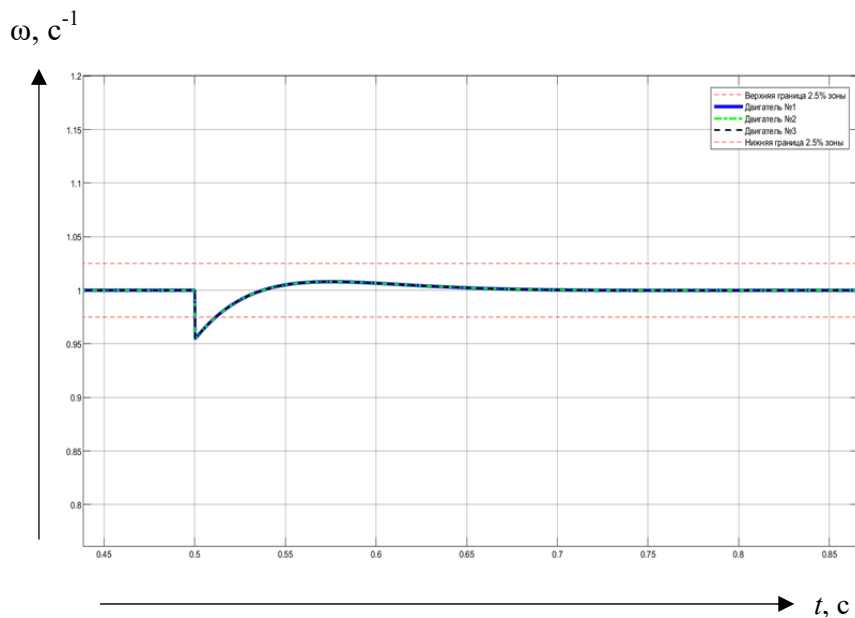


Рис. 7. Реакция системы на согласованное возмущающее воздействие

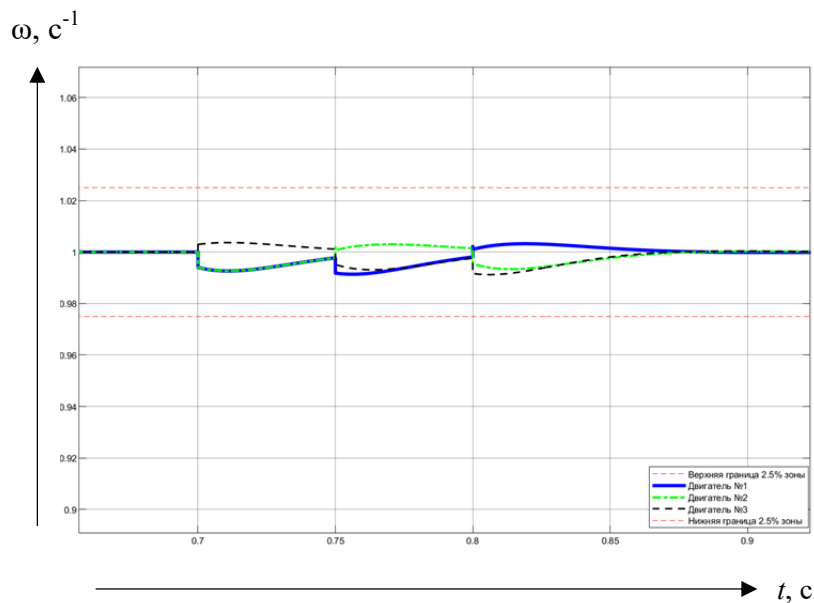


Рис. 8. Реакция системы на рассогласованное по времени возмущающее воздействие

**Выводы.** В рамках предложенной концепции построения робототехнического комплекса для выполнения специальных технологических операций внутри трубопроводных магистралей разработана система совместного управления электроприводами мотор-колёс. Выполнен синтез параметров регуляторов относительного и усреднённого движения. Результаты моделирования показали работоспособность системы управления. Система устраняет возникшие возмущения в автономных каналах за сравнительно небольшой промежуток времени (в зависимости от характера нагрузки от 0.1 до 0.15 с). Однако стоит учитывать, что в данной статье расчёт параметров движения проводился с допущением, что движение РТК проходит в линейном участке трубопровода. При введении ряда условий, связанных с возможной криволинейностью траектории, наклоном трубопровода и др., более рациональным видится использование регуляторов на базе нечёткой логики.

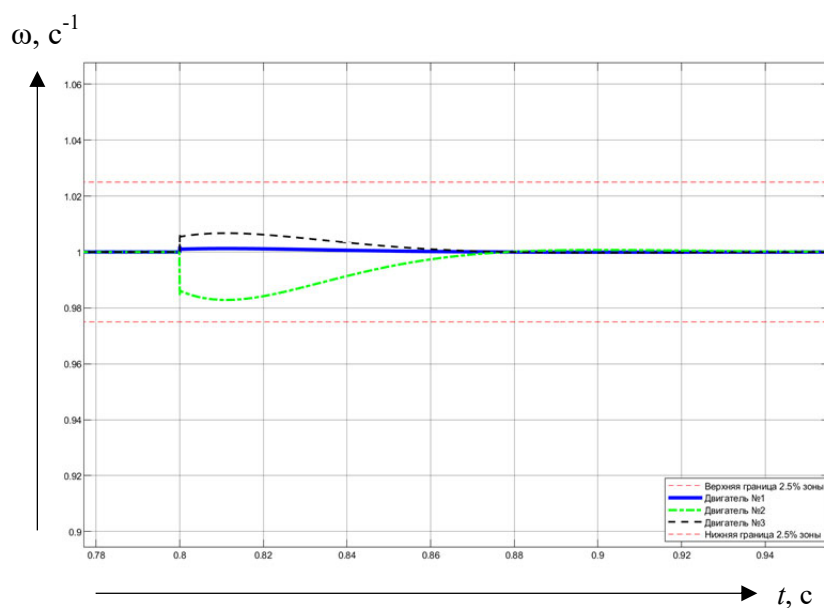


Рис. 9. Реакция системы на рассогласованное по значению возмущающее воздействие

Развитие предложенной концепции с применением развитых нечётких систем управления технологическими процессами в дальнейшем позволит расширить применение таких систем путём внедрения дополнительных модулей приводов. Такой подход позволит гибко адаптировать предложенный робототехнический комплекс для выполнения сварочных и дефектных работ в трубопроводных системах различных масс и диаметров. Интеграция модулей электроприводных систем мотор-колесо в общую систему управления будет реализована на основе многокаскадного нечёткого регулирования.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Стельмашук, С. В. Согласованное управление однотипными объектами без учёта перекрёстных связей между сепаратными каналами / С. В. Стельмашук, В. А. Челухин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № VII-1 (47). – С. 48-58.
2. Горькавый, А. И. Математические основы элементов, систем и процессов управления: учеб. пособие / А. И. Горькавый, М. А. Горькавый. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2016. – 70 с.
3. Мирошник, И. В. Согласованное управление многоканальными системами / И. В. Мирошник. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 128 с.
4. Анализ влияния параметров объекта управления на основные характеристики нечёткого регулятора / С. П. Черный, А. В. Бузикаева, Е. О. Полей, Чжо Мин У // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2018. – № I-1 (33). – С. 28-33.
5. Востриков, А. С. Теория автоматического регулирования: учеб. пособие / А. С. Востриков, Г. А. Французова. – М.: Высшая школа, 2004. – 365 с.
6. 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 ВПО «КНАГТУ», 2010. – 267 с.
7. Арискин, И. В. Анализ робототехнических устройств, предназначенных для внутритрубной диагностики / И. В. Арискин // Политехнический молодежный журнал МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2019. – № 9 (38). – С. 12.
8. Лямин, М. А. Робототехнический транспортный комплекс для магистральных трубопроводов / М. А. Лямин, С. П. Черный // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы VI Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных. В 3 ч. Ч. 1. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2023. – С. 235-238.
9. Система управления модулем подачи и позиционирования проволоки для роботизированного комплекса трёхмерной печати металлических изделий / С. И. Сухоруков, С. П. Черный, А. В. Бузикаева, А. Р. Овсянников // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2022. – Т. 65. – № 3. – С. 66-73.
10. 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.