

ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА

**ҚАЗАҚСТАН ҒЫЛЫМЫ
МЕН ТЕХНИКАСЫ**

2001 ЖЫЛДАН БАСТАП ШЫҒАДЫ



**НАУКА И ТЕХНИКА
КАЗАХСТАНА**

ИЗДАЕТСЯ С 2001 ГОДА

ISSN 2788-8770

№ 3 (2025)

ПАВЛОДАР

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТ**
выходит 1 раз в квартал

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания
№ KZ51VPY00036165

выдано

Министерством информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

Публикация научных исследований по широкому спектру проблем
в области металлургии, машиностроения, транспорта, строительства,
химической и нефтегазовой инженерии, производства продуктов питания

Подписной индекс – 76129

<https://doi.org/10.48081/QXJM4576>

Импакт-фактор РИНЦ – 0,216

Импакт-фактор КазБЦ – 0,406

Касенов Асылбек Жумабекович – к.т.н., профессор (главный редактор);
Сулейменов Ансаган Дюсембаевич – PhD (ответственный секретарь);
Шокубаева Зауреш Жанатовна – технический редактор.

Члены редакционной коллегии:

Богомолов Алексей Витальевич – к.т.н., ассоц. профессор (Павлодар, Казахстан);
Калиакпаров Алтай Гиндуллинович – д.т.н., профессор (Нур-Султан, Казахстан);
Шеров Карибек Тагаевич – д.т.н., профессор (Караганда, Казахстан);
Кажиева Галия Тулеуевна – к.т.н., профессор (Павлодар, Казахстан);
Жунусов Аблай Каиртасович – к.т.н., асс. профессор (доцент) (Павлодар, Казахстан);
Зарубежные члены редакционной коллегии:
Baigang Sun – PhD, профессор (Пекин, Китай);
Gabriele Comodi – PhD, профессор (Анкона, Италия);
Jianhui Zhao – профессор (Харбин, Китай);
Khamid Mahkamov – д.т.н., профессор (Ньюкасл, Великобритания);
Magain Lapuerta – д.т.н., профессор (Сьюдад Реал, Испания);
Mareks Mezitis – д.т.н., профессор (Рига, Латвия);
Petr Bouchner – PhD, профессор (Прага, Чехия);
Барзов Александр Александрович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);
Витвицкий Евгений Евгеньевич – д.т.н., профессор (Омск, Россия);
Иванчина Эмилия Дмитриевна – д.т.н., профессор (Томск, Россия);
Лазарев Владислав Евгеньевич – д.т.н., профессор (Челябинск, Россия);
Мягков, Леонид Львович – д.т.н., профессор (Москва, Россия);
Янюшкин Александр Сергеевич – д.т.н., профессор (Чебоксары, Россия);
Ребезов Максим Борисович – д.с/х.н., профессор (Москва, Россия).
Чайкин Владимир Андреевич – д.т.н., доцент (Сафоново, Россия);

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов
При использовании материалов журнала ссылка на журнал «Наука и техника Казахстана» обязательна

© Торайгыров университет

МРНТИ 55.30.31

<https://doi.org/10.48081/WPKV1070>***А. Ж. Абекова¹, М. Ж. Куатова², Н. С. Камзанов³, А. Ю. Бектилезов⁴**^{1,2}Институт механики и машиноведения имени академика

У. А. Джолдасбекова, Республика Казахстан, г. Алматы;

²Международный инженерно-технологический университет,
Республика Казахстан, г. Алматы;^{3,4}Satbayev University, Республика Казахстан, г. Алматы¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0881-8707>²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7614-6124>³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2420-8362>⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0865-6023>*e-mail: Abekova310792@gmail.com

УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С УПРУГОЙ СВЯЗЬЮ ДЛЯ ГИБРИДНОГО КРИВОШИПНОГО ПРЕССА С ДВУМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

В данной статье рассматривается задача управления скоростью электромеханического привода с упругой связью, используемого в составе гибридного кривошипного пресса с двумя степенями свободы. Такие прессы сочетают в себе кинематическую структуру семизвенного механизма и высокоточные сервоприводы, что позволяет реализовывать адаптивные законы движения ползуна в зависимости от технологических требований и обеспечить формирование оптимального профиля хода. Для описания динамики электромеханической части используется модель с разделённой инерцией, учитывающая упругие свойства связующего вала между приводом и исполнительным звеном механизма. Предложен подход к синтезу регулятора на основе обратной связи по состоянию, позволяющий обеспечить устойчивую и точную реализацию движения даже при изменяющихся нагрузках. Проведены численные моделирования и экспериментальные исследования на лабораторном стенде, подтвердившие эффективность разработанного алгоритма управления. Также проанализировано влияние различных параметров модели на точность и устойчивость системы. Особое внимание уделено компенсации упругих колебаний и устойчивости при параметрических возмущениях. Полученные результаты могут быть полезны при проектировании современных адаптивных систем управления для высокоточных серво-прессов с механической трансмиссией, работающих в условиях переменных технологических нагрузок.

Ключевые слова: адаптивное управление, гибридный кривошипный пресс, обратная связь, математическая модель, динамическая система.

Введение

В промышленных применениях электроприводов основными проблемами являются надежность структуры управления, динамика реакции системы и способность управлять состоянием установки. Удовлетворительный уровень этих свойств трудно получить, когда механическая структура системы является составной [1;2;3]. Когда двигатель соединен с нагрузочной машиной через длинную тонкую шестерню, машины могут начать вращаться с различной скоростью, часто колебательным образом. Высоко резонансные системы с упругим валом и тяжелой нагрузочной машиной (такие как прокатные станы [4], ветряные турбины [5] и манипуляторы [6;7], часто называемые двух массовыми системами, можно широко встретить во многих промышленных решениях. Проблемы прессуемых машин усложняются многозвенной механикой, высокими нагрузками и требованиями к точности движения. Подавление колебаний и синтез адаптивных систем управления становится критически важным для повышения надёжности, точности и ресурса механизма. Когда вал подвергается кручению, угловая скорость двигателя отличается от угловой скорости нагрузочной машины, вызывая колебания. В результате в структуре управления возникает множество нежелательных эффектов: может ухудшиться качество производственного процесса, конечный продукт может быть дефектным или поврежденным [8], кручение может привести к повреждению механической конструкции привода (разрыв вала), и даже может быть потеряна устойчивость [9]. Самым основным методом подавления колебаний является использование механических демпферов. Однако для этого подхода необходимо модифицировать механическую конструкцию привода.

Помимо вмешательства в механическую часть привода, можно выделить пассивные и активные методы управления. Пассивные методы, используемые для подавления этих колебаний, фокусируются на снижении динамики опорного сигнала за счет использования фильтрации сигнала [10]. Однако это очень вредит динамическим возможностям структуры управления и усложняет генерацию командного сигнала. Активные методы основаны на использовании усовершенствованных структур управления для смягчения влияния упругой связи на качество управления. Самым основным методом, используемым для управления скоростью таких приводов, является каскадное управление с двумя ПИ-регуляторами — один из них отвечает за управление током, а другой управляет скоростью двигателя. Это решение не использует никакой дополнительной информации о нагрузочной машине, поэтому демпфирование колебаний неэффективно [11]. В литературе представлено множество модификаций ПИ-регулирования с дополнительными контурами обратной связи от крутящего момента и угловой скорости нагрузки [12;13]. Очень многообещающие результаты получаются при использовании регулятора состояния [14]. Однако для применения этого метода необходимо знать все переменные пространства состояний (угловая скорость двигателя и нагрузки, крутящий момент) [15]. Упомянутый метод очень чувствителен к внешним возмущениям (таким как шум измерения,

трение и дополнительные динамические изменения нагрузки), нелинейностям и неточной идентификации параметров установки [16]. Для получения информации о состоянии установки следует использовать соответствующие датчики или алгоритмы оценки.

Очевидно, что второй вариант предпочтительнее из-за снижения общей стоимости и повышения надежности привода. Хотя можно использовать математические модели переменных, их зависимость от неопределенностей параметров представляет собой существенную проблему [17]. Для получения надежного инструмента для расчета переменных состояния обычно применяются наблюдатели состояния [18], наблюдатели Люенбергера [19] и фильтры Калмана [20].

Результаты, достигнутые с помощью контроллера состояния, могут представлять эффективное демпфирование колебаний переменных состояния. Более того, аппаратная реализация топологии контроллера состояния проста и осуществима. Наиболее проблемный вопрос заключается в устойчивости структуры к изменениям резонансной частоты объекта. Для улучшения реакции структуры управления на неточность идентификации и устойчивости к внешним возмущениям интересным решением кажутся структуры с адаптивными свойствами [21;22]. Согласно анализу структуры контроллеров, приложения, предложенные в научных работах, можно в целом разделить на решения, основанные на нейронных сетях (NN) [23], моделях нечеткой логики (FL) [24;25] или классических реконфигурируемых контроллерах [26].

В данной статье представлен регулятор состояния с адаптивным вектором параметров, и рассматриваются два типа регулятора. Первый использует только пересчет параметров, связанных со скоростью привода. Второй реализует полную адаптацию коэффициентов усиления. Общая конструкция регулятора основана на структуре адаптивного управления с эталонной моделью (MRAC).

Идея систем MRAC основана на использовании разницы между выходными данными эталонной модели и фактическими выходными данными системы [27]. Разностный сигнал используется для изменения значений коэффициентов усиления контроллера с помощью выбранного алгоритма адаптации. Контроллер изменяется таким образом, чтобы минимизировать разницу между выходными данными модели и системы. Преимущество систем MRAC заключается в том, что разработчик системы имеет прямой способ определения желаемого поведения системы посредством выбора эталонной модели.

Материалы и методы

Адаптивное управление с использованием MRAC

Рассмотренные методы получили экспериментальное подтверждение в рамках моделирования и физической реализации на механизмах с PMSM-приводом.

Представлено упрощенное изображение механической части привода (рисунок–1). Структура управления основана на регуляторе состояния и привод с упругой связью (рисунок–2).

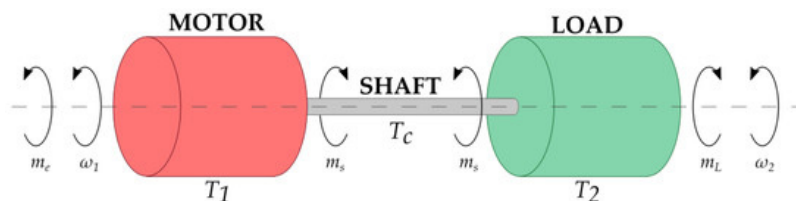


Рисунок 1 – Общий вид системы с упругой связью

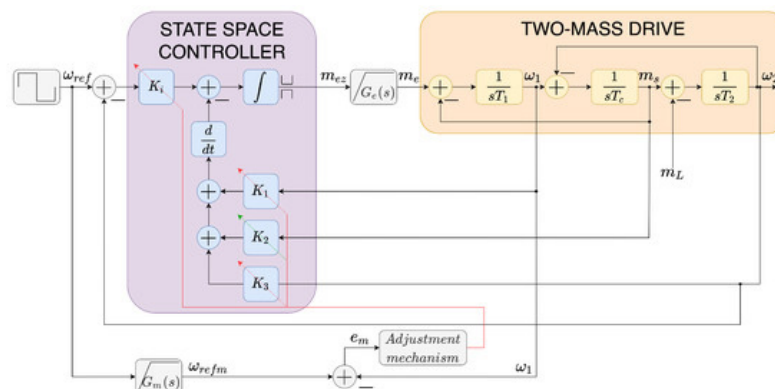


Рисунок 2 – Предлагаемая схема управления

Представленную модель механической части привода можно описать с помощью следующей системы дифференциальных уравнений [27;28;29]:

$$\frac{d\omega_1}{dt} = \frac{m_e - m_s}{T_1} \quad (1)$$

$$\frac{d\omega_2}{dt} = \frac{m_s - m_L}{T_2} \quad (2)$$

$$\frac{dm_s}{dt} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{T_c} \quad (3)$$

Где ω_1 и ω_2 представляют собой скорость вращения двигателя и нагрузки (соответственно), m_e электромагнитный крутящий момент, m_s крутящий момент и m_L – это крутящий момент нагрузки. T_1 , T_2 и T_c – механические постоянные времени двигателя, нагрузки и вала, соединяющего две массы. Силы трения не учитываются.

Для более наглядного представления структуры управления контур управления крутящим моментом упрощается до передаточной функции первого порядка. G_e постоянной времени T_{me}

$$G_e = \frac{1}{T_{me}s + 1} \quad (4)$$

Вся предлагаемая схема управления основана на каскадной структуре. Она состоит из внутреннего контура управления с ПИ-регулятором (Пропорционально-интегральный регулятор), отвечающим за формирование электромагнитного момента, и внешнего контура с предлагаемым адаптивным регулятором состояния с обратной связью, который управляет угловой скоростью привода. Следует отметить, что привод полностью управляется наблюдением (все переменные пространства состояний доступны для измерения). Несмотря на то, что контур управления моментом представлен в виде простой передаточной функции, в практической реализации выходной сигнал регулятора момента ограничен. Упрощение электромагнитного контура G_e . Это также связано с малой постоянной времени токового контура. Следует отметить, что с учётом современных достижений силовой электроники задержка, вызванная переключением преобразователя мощности, не превышает 5 мс, что пренебрежимо мало по сравнению с механической постоянной времени, отвечающей за формирование выходной скорости.

Регулятор состояния с параметрами, реализованный для системы с двумя подвижными элементами

Адаптивный регулятор скорости основан на классическом регуляторе состояния. Начальные значения коэффициентов усиления для процесса адаптации выбраны как для классической версии. В следующем анализе: G_e предполагается равным 1.

В дополнение к системе уравнений (1)–(3) электромагнитный момент можно описать как

$$m_e = \int (K_1(\omega_{ref} - \omega_2) - \frac{D}{dt}(K_1\omega_1 + K_2\omega_m + K_3\omega_2))dt \quad (5)$$

который, используя оператор Лапласа s , можно переписать как

$$m_e = \frac{K_1}{c} (\omega_{ref} - \omega_2) - (K_1\omega_1 + K_2\omega_m + K_3\omega_2) \quad (6)$$

Параметры K_1 , K_2 и K_3 – коэффициенты усиления регулятора (скалярные величины, то есть безразмерные). Объединяя уравнения (-1)–(-3) и (-6), передаточную функцию замкнутого контура можно представить как

$$\frac{\omega_2}{\omega_{ref}} = \frac{K_1}{c^4 T_1 T_2 T_c + c^3 K_1 T_2 T_c + c^2 (T_1 + T_2 + K_2 T_2) + c(K_1 + K_3) + K_1} \quad (7)$$

и, в результате получены выражения, описывающие коэффициенты обратной связи регулятора состояния:

$$K_1 = 4\sigma_r \omega_0 T_1 \quad (8)$$

$$K_2 = T_1 T_2 (2\omega_0^2 + 4\sigma_0^2 - \frac{1}{T_1 T_c} - \frac{1}{T_2 T_c}) \quad (9)$$

$$K_3 = T_1 T_2 T_c 4 \sigma_r \omega_0^3 - K_1 \quad (10)$$

$$K_t = \omega_0^4 T_1 T_2 T_c \quad (11)$$

Представленные выше выражения будут применены для настройки регулятора с фиксированными параметрами. Эти значения также используются в качестве начальных точек для адаптивных версий регулятора скорости.

Результаты и обсуждение

Имитационное тестирование проводилось в среде MATLAB/Simulink. Структура управления была реализована в Simulink, а данные передавались через рабочее пространство MATLAB. Во время моделирования $t_{sim} = 20$ с, привод совершает реверсы с амплитудой $\omega_{ref} = 0,25$ pu. Крутящий момент нагрузки прикладывается в $t_{ml} = 13,2$ с моделирования с номинальным значением. Все переменные пространства состояний были сохранены во время моделирования.

Основная цель данной статьи — показать, что адаптивный контроллер пространства состояний может быть реализован различными способами. Показано сравнение классического адаптивного регулятора состояния и новой структуры (рисунок–3). Как видно из рисунков, наблюдается значительное увеличение адаптации скорости при адаптации всех коэффициентов. Реакция не только быстрее, но и перерегулирование заметно меньше (рисунок–3).

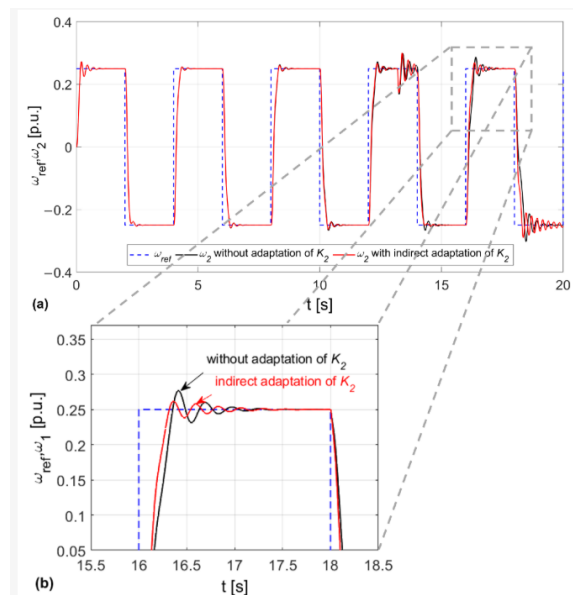


Рисунок 3 – Сравнение изменений переменных пространства состояний в приводе без адаптации K_2 и новая косвенная адаптация

K_2 : (а) весь переходный процесс,
(б) масштабирование переходного процесса скорости.
 ω_2 – скорость груза

Также была проверена устойчивость к изменениям постоянной времени нагрузки (рисунок–4).

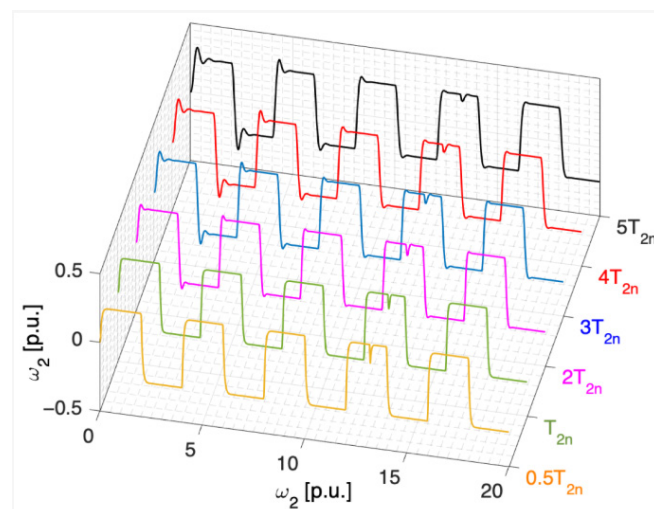


Рисунок 4 – Влияние изменения постоянной времени двигателя нагрузки в системе с оптимизированным параметром обучения

С увеличением постоянной времени нагрузки наблюдается рост перерегулирования при запуске привода. Однако, благодаря корректировке коэффициентов регулятора, оно снижается. При пятикратном увеличении постоянной времени максимальное перерегулирование составляет около 36 %. Снижение постоянной времени повышает чувствительность к нагрузочному моменту, но в остальном поведение привода остаётся стабильным.

Для верификации модели были проведены эксперименты на лабораторной установке с двумя электродвигателями мощностью 0,5 кВт, соединёнными гибким валом. Один двигатель служил объектом управления, другой — нагрузкой. Параметры инерции менялись заменой вала и маховиков. Управление реализовано на плате dSPACE 1103, с обратной связью по току (датчики LEM) и скорости (энкодеры). Испытания при номинальных параметрах подтвердили соответствие моделируемой и реальной динамики привода.

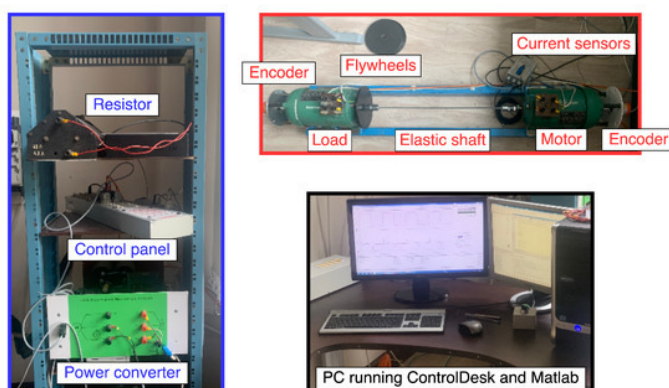


Рисунок 5 – Лабораторное оборудование, использованное для экспериментальной проверки (синий – силовая электроника; красный – привод; черный – ПК, программное обеспечение)

На следующем этапе предложен новый адаптивный регулятор с косвенной адаптацией коэффициента K_2 . Результаты с его применением (рисунок–6) демонстрируют стабильную работу системы и точное отслеживание заданной траектории скорости как на двигателе, так и на нагрузке. Испытания проводились при номинальных параметрах привода и оптимизированном состоянии стандартного регулятора. Управление отличается высокой динамикой и эффективным формированием крутящего момента.

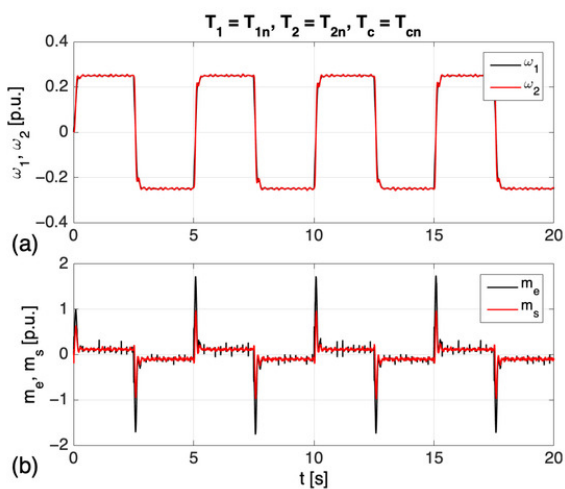


Рисунок 6 – Переходные процессы переменных состояния при номинальных постоянных времени в структуре управления с адаптивным регулятором состояния: (а) скорость двигателя и нагрузки, (б) электромагнитный и крутящий моменты

Были проведены испытания при изменённых условиях, когда объект был неточно идентифицирован или нагрузка увеличена за счёт добавления маховиков ко второму двигателю, что привело к увеличению постоянной времени до 14

$3T_2^n$ и $5T_2^n$ В ходе экспериментов использовались разные значения коэффициента адаптации ($\alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3$).

Результаты подтвердили выводы моделирования: с ростом коэффициента адаптации уменьшается перерегулирование и ускоряется затухание колебаний. Система стабилизируется быстрее, демонстрируя корректную работу даже при параметрических отклонениях.

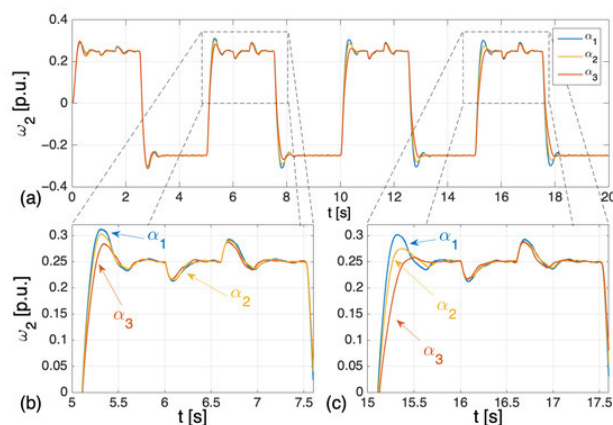


Рисунок 7 – Переменные состояния управляющей структуры с адаптивным регулятором скорости: (а) весь переходный процесс скорости нагрузки (б, с) масштабирование, использованное для отдельных частей результатов.

Испытания, проведенные для $T_2 = 3T_2^n$

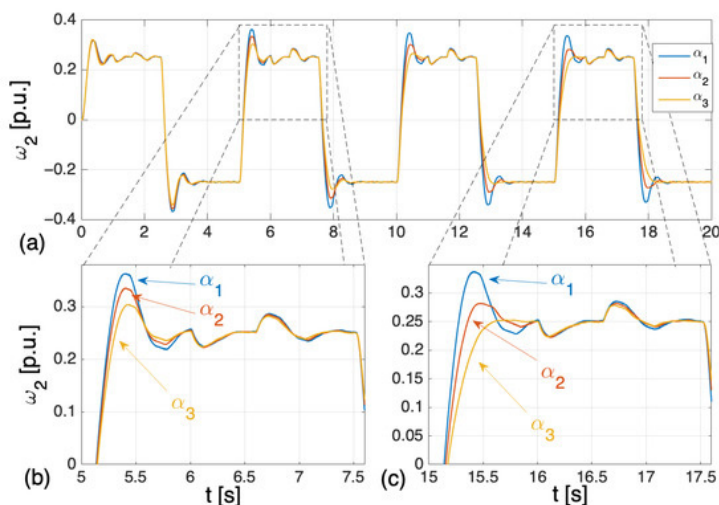


Рисунок 8 – Влияние α параметр на переменных состояния структуры управления с адаптивным регулятором скорости: (а) весь переходный процесс скорости нагрузки (б, в) масштаб, используемый для выбранных частей результатов – испытания, выполненные для $T_2 = 5T_2^n$

Даже значительное увеличение T_2 может быть обработана предлагаемым адаптивным контроллером. Переходные процессы, представленные ниже, показывают отсутствие нежелательных колебаний, даже в ситуации, когда $T_2 = 5$.

Информация о финансировании

Работа выполнена в рамках проекта грантового финансирования МНВО РК AP19577094.

Выводы

В статье рассматриваются различные подходы к построению регулятора состояния, применяемого для электромеханической системы с упругой связью. Исходная структура имеет типовой вид, использующий сигналы от механической части привода. Затем реализуется дополнительная адаптация параметров регулятора. Рассматриваются два решения адаптивного управления скоростью (также рассматривается новый косвенный метод адаптации одного из коэффициентов). Для оптимизации значения скорости обучения регулятора, а также начальных значений используются выбранные методы оптимизации. Использование метаэвристических алгоритмов обеспечивает простой и эффективный инструмент для этапа проектирования.

Косвенный метод адаптации (для K_2 параметр) улучшает динамику привода и его работу при изменении параметров объекта. Необходимость реализации другого закона адаптации для этого коэффициента обусловлена зависимостью этого параметра от быстро меняющегося крутящего момента (остальные коэффициенты усиления зависят от угловых скоростей). Результаты моделирования показывают высокую эффективность демпфирования колебаний, вызванных крутящим моментом в электроприводе с упругим шарниром. Это подтверждает возможность корректного применения представленной структуры. Первые экспериментальные результаты были получены с использованием карты dSPACE для подтверждения корректной работы предлагаемой структуры управления. Сравнение эффективности, достигнутой с помощью представленной адаптивной структуры и базовых регуляторов, таких как ПИ-регулятор или регулятор в пространстве состояний, показывает значительное улучшение. Колебания не только демпфируются, но и перерегулирование минимизируется, что приводит к снижению значения целевой функции примерно на 40 %. Дальнейшие исследования будут сосредоточены на реализации алгоритмов на недорогом устройстве и анализе устойчивости.

REFERENCES

- 1 Dhaouadi, R., Kubo, K., Tobise, M. Two-Degree-of-Freedom Robust Speed Controller for High Performance Rolling Mill Drives [Text] // Proc. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. – Houston, USA. – 1992. – 4–9 October.
- 2 Brock, S., Łuczak, D., Nowopolski, K., Pajchrowski, T., Zawirski, K. Two Approaches to Speed Control for Multi-Mass System With Variable Mechanical Parameters [Text] // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2017. – Vol. 64. – P. 3338–3347.

3 **Brock, S., Łuczak, D., Pajchrowski, T., Zawirski, K.** Selected Methods for a Robust Control of Direct Drive with a Multi-mass Mechanical Load [Text] // Advanced Control of Electrical Drives and Power Electronic Converters, Springer. – 2017. – Vol. 75. – P. 75–98.

4 **Lukyanov, X. I., Pishnograev, R. S., Schvidchenko, N. V.** Wide Strip Hot Rolling Mill Runout Roll Table Electric Drive Control System [Text] // Proc. IX Int. Conf. Power Drives Systems (ICPDS). – Perm, Russia. – 2016. – P. 1–5.

5 **Neshati, M., Jersch, T., Wenske, J.** Model Based Active Damping of Drive Train Torsional Oscillations for Wind Turbine Nacelle Test Rig [Text] // Proc. American Control Conf. (ACC). – Boston, USA. – 2016. – P. 2283–2288.

6 **Hillsley, K. L., Yurkovich, S.** Vibration Control of a Two-Link Flexible Robot Arm [Text] // Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation. – Sacramento, USA. – 1991. – P. 2121–2126.

7 **Cheng, X., Zhang, Y., Liu, H., Wollherr, D., Buss, M.** Adaptive Neural Backstepping Control for Flexible-Joint Robot Manipulator [Text] // Neurocomputing. – 2021. – Vol. 458. – P. 70–86.

8 **Jung, H., Jeon, K., Oh, S.** Iterative Feedback Tuning of Cascade Control for Two-Mass System [Text] // IFAC-PapersOnLine. – 2020. – Vol. 53. – P. 8357–8362.

9 **Zhang, R., Yang, Y., Chen, Z., Tong, C.** Torsional Vibration Suppression in Rolling Mill Drive [Text] // Proc. IEEE Conf. Control and Automation. – Guangzhou, China. – 2007. – P. 2172–2177.

10 **Lin, M.-H., Zhang, L., Zhang, Y.-H., Li, P.-F., Wang, X.-H.** Backstepping Control with Error Compensation [Text] // Proc. Chinese Control And Decision Conf. – Hefei, China. – 2020. – P. 3696–3701.

11 **Tang N., Yang, M., Hu, K., Xu, D.** State Feedback of Two-Mass System Based on Weight Coefficient [Text] // Proc. IEEE Conf. Transportation Electrification (ITEC Asia-Pacific). – China. – 2017. – P. 1–6.

12 **Sonawane, R., Apte, A. A.** State Observer Based Speed Control for PMSM [Text] // Proc. Int. Conf. Advances in Communication and Computing Technology. – India. – 2018. – P. 524–527.

13 **Li, Y., Yang, M., Long, J., Liu, Z., Xu, D.** Sensorless Predictive Control for PMSM [Text] // Proc. IEEE Transportation Electrification Conf. (ITEC Asia-Pacific). – China. – 2017. – P. 1–6.

14 **Wei, M., Liu, T.** Adaptive Controller for Synchronous Reluctance Motor Drives [Text] // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2013. – Vol. 60. – P. 3644–3657.

15 **Chiang, H., Hsu, K., Li, I.** Adaptive Motion Control for Linear Induction Motors [Text] // IEEE/ASME Trans. Mechatronics. – 2015. – Vol. 20. – P. 348–360.

16 **Belov, M. P., Lanh, N. V., Khoa, T. D.** State Observer with Elman RNN for Electric Drive [Text] // Proc. IEEE Conf. Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). – Russia. – 2021. – P. 802–805.

17 **Lukichev, D. V., Demidova, G. L., Brock, S.** Fuzzy Adaptive PID Control for Two-Mass Drive [Text] // Proc. IEEE Int. Conf. Cybernetics (CYBCONF). – Poland. – 2015. – P. 443–448.

18 Song, G., Tao, G. Partial-State Feedback Adaptive Control Scheme [Text] // IEEE Trans. Autom. Control. – 2020. – Vol. 65. – P. 44–57.

19 Al-Waeli, K. H., Ramli, R., Haris, S. M., Zulkoffli, Z. B., Amiri, M. S. ANN-PID Controller for Lower Limb Exoskeleton [Text] // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 107360–107374.

20 Kodakkal, A., Veramalla, R., Kuthuri, N. R., Salkuti, S. R. ALO Optimized Controller for Wind Power Unit [Text] // Designs. – 2021. – Vol. 5. – Art. 65.

Поступило в редакцию 14.07.25.

Поступило с исправлениями 24.07.25.

Принято в печать 07.08.25.

***А. Ж. Абекова¹, М. Ж. Куатова², Н. С. Камзанов³, Б. Ю. Бектилезов⁴**

^{1,2}У. А. Джолдасбеков атындағы механика және машинатану институты, Қазақстан Республикасы, Алматы қ;

²Халықаралық инженерлі-технологиялық университеті
Қазақстан Республикасы, Алматы қ;

^{3,4}Сәтпаев университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

14.07.25 ж. баспаға түсті.

24.07.25 ж. түзетулерімен түсті.

07.08.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЕКІ ЕРКІНДІК ДӘРЕЖЕСІ БАР ГИБРИДТІ ИІНДІ ПРЕССКЕ АРНАЛҒАН СЕРПІМДІ БАЙЛАНЫСЫ БАР ЭЛЕКТР ЖЕТЕГІН БАСҚАРУ

Бұл мақалада екі еркіндік дәрежесі бар гибриді қосынды пресс құрамында қолданылатын серпімді байланысы бар электрмеханикалық жетекті басқару мәселесі қарастырылады. Мұндай пресс түрлері жетібуынды механизмнің кинематикалық құрылымын және жоғары дәлдіктегі сервожетектерді біріктіріп, технологиялық талаптарға байланысты ползун қозғалысының бейімделгіш заңдарын жүзеге асыруға және жүріс профилінің оңтайлы қалыптасуын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Электрмеханикалық бөліктің динамикасын сипаттау үшін жетек пен механизмнің атқарушы буыны арасындағы байланыстыру білігінің серпімді қасиеттерін ескеретін, инерциясы бөлінген модель қолданылады. Өзгермелі жүктемелер жағдайында да қозғалысты тұрақты және дәл орындауға мүмкіндік беретін, күй бойынша кері байланыс негізінде реттегішті синтездеу тәсілі ұсынылған. Зерттеу нәтижелері зертханалық стендте жүргізілген сандық модельдеу және эксперименттік зерттеулер арқылы дәлелденді. Серпімді тербелістерді компенсациялауға және параметрлік бұзылыстар жағдайындағы тұрақтылыққа ерекше назар аударылды. Алынған нәтижелер айнымалы технологиялық жүктемелер жағдайында жұмыс істейтін механикалық

берілістері бар жоғары дәлдіктегі серво-престерге арналған заманауи бейімделгіш басқару жүйелерін жобалауда пайдалы болуы мүмкін.

Кілтті сөздер: адаптивті басқару, гибридті қосиінді прес, кері байланыс, математикалық модель, динамикалық жүйе.

***A. Zh. Abekova¹, M. Zh. Kuatova², N. S. Kamzanov³, A. Y. Bektilevov⁴**

^{1,2}Institute of Mechanics and Engineering named after academician

U. A. Dzholdasbekov, Republic of Kazakhstan, Almaty;

²International Engineering and Technology University,
Republic of Kazakhstan, Almaty;

^{3,4}Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 14.07.25.

Received in revised form 24.07.25.

Accepted for publication 07.08.25.

ELECTRIC DRIVE CONTROL WITH ELASTIC COUPLING FOR A TWO DEGREE OF FREEDOM HYBRID CRANK PRESS

This paper addresses the problem of speed control for an electromechanical drive with elastic coupling employed in a hybrid crank press possessing two degrees of freedom. Such presses integrate the kinematic structure of a seven-link mechanism with high-precision servo drives, enabling the implementation of adaptive slider motion laws that meet specific technological requirements and yield an optimal stroke profile.

To describe the dynamics of the electromechanical subsystem, a split inertia model is adopted that captures the elastic properties of the shaft linking the drive to the mechanism's actuating member. A state feedback based controller-synthesis approach is proposed, ensuring stable and accurate trajectory tracking even under varying load conditions.

Comprehensive numerical simulations and experimental studies on a laboratory test bench confirm the effectiveness of the developed control algorithm. Particular emphasis is placed on compensating elastic oscillations and maintaining robustness against parametric disturbances. The findings can be applied to the design of modern adaptive control systems for high precision servo presses with mechanical transmissions operating under variable technological loads.

Keywords: adaptive control, hybrid crank press, state feedback, mathematical model, dynamic system.

Теруге 27.08.25 ж. жіберілді. Басуға 30.09.25 ж. қол қойылды.

Электрондық баспа

5,07 Mb RAM

Шартты баспа табағы 1,09 Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: Е. Е. Калихан

Корректорлар: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4434

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов көш., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

e-mail: kereku@tou.edu.kz

nitk.tou.edu.kz