

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

№ 2 (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/VJZF6109>

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);
Majin 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 55.01.77

<https://doi.org/10.48081/ZMYU5973>

***А. Ж. Абекова¹, Б. Д. Жунисбеков²,
Ж. Т. Шәріпов³, Б. У. Асанов⁴, Н. С. Төлебаев⁵**

^{1,5}Институт механики и машиноведения имени академика

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

^{2,3,4}Satbayev University, Республика Казахстан, г. Алматы

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0881-8707>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0067-2178>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7150-2227>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4363-0808>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6842-194X>

*e-mail: Abekova310792@gmail.com

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГИБРИДНОГО КРИВОШИПНОГО ПРЕССА С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

В данной статье представлена математическая модель адаптивного управления гибридного кривошипного пресса с обратной связью. Рассмотрена динамическая модель пресса, включающая механическую и электрическую составляющие, а также учтены изменения параметров системы в реальном времени. Предложен адаптивный закон управления, основанный на методах идентификации параметров и корректировки управляющего воздействия в зависимости от текущего состояния пресса. Приведены алгоритмы адаптации, использующие обратную связь для минимизации ошибки и обеспечения высокой точности работы пресса. Проведен анализ устойчивости системы и показаны преимущества предложенного подхода перед классическими методами управления.

Статье рассматриваются методы синтеза систем управления при решении задач слежения для многомерных стохастических моделей объектов, функционирующих в условиях неполной информации о состоянии объекта и его параметров. При этом проектирование систем управления осуществляется путем постепенного добавления и усложнения используемых методов и алгоритмов: от оптимального управления для детерминированных моделей, до адаптивных следящих систем для стохастических моделей при неполном измерении с ошибками. В связи со сложностью рассматриваемых задач единственным способом их решения является имитационное моделирование.

Результаты моделирования подтверждают эффективность разработанной системы управления при изменяющихся нагрузках и внешних воздействиях. Также рассмотрено влияние помех и непредсказуемых отклонений в работе оборудования на точность управления. Предложенная

система демонстрирует высокую устойчивость и способность адаптироваться к широкому спектру эксплуатационных условий.

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

Введение

В современной промышленности кривошипные прессы широко применяются для выполнения технологических операций штамповки, вырубки и формовки. Однако традиционные механические прессы обладают рядом ограничений, связанных с жесткостью механической передачи и невозможностью оперативной корректировки режимов работы в процессе эксплуатации [1]. Введение гибридных систем управления, сочетающих механические, электрические и программные компоненты, позволяет существенно повысить эффективность работы прессов за счет адаптации их параметров к изменяющимся условиям [1].

Одним из ключевых элементов гибридного прессы является система адаптивного управления с обратной связью, обеспечивающая коррекцию параметров в реальном времени. Разработка математической модели такой системы управления играет важную роль в повышении точности, надежности и энергосбережения оборудования.

Актуальность данной работы обусловлена необходимостью повышения точности, надежности и энергоэффективности кривошипных прессов за счет внедрения адаптивных систем управления с обратной связью. Традиционные механические прессы имеют ограниченные возможности регулирования и адаптации к изменяющимся условиям, что снижает их производительность и ресурс [2]. Разработка математической модели гибридного управления позволит оптимизировать рабочие параметры прессы, снизить энергопотребление, увеличить срок службы оборудования и улучшить качество обработки, что актуально для современной промышленности [2].

Целью данной работы является построение математической модели адаптивного управления гибридного кривошипного прессы с обратной связью, учитывающей динамику механической системы, характеристики исполнительных механизмов и алгоритмы корректировки управляющих воздействий. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- анализ существующих методов управления кривошипными прессами;
- разработка математической модели гибридного прессы с учетом обратной связи;
- исследование алгоритмов адаптивного управления и их влияние на динамические характеристики системы;
- оценка эффективности предложенного подхода на основе моделирования.

Материалы и методы

Анализ существующих методов управления кривошипными прессами. Кривошипные прессы широко применяются в промышленности для штамповки,ковки и обработки материалов. Их управление играет ключевую роль в обеспечении

точности, надежности и эффективности работы. Рассмотрим основные методы управления такими прессами:

Классическое релейное управление В традиционных системах кривошипные прессы управляются с помощью релейных схем, которые обеспечивают включение и выключение привода по заранее заданным условиям [3]. Этот метод прост в реализации, но не обладает достаточной гибкостью для адаптации к изменяющимся нагрузкам и условиям работы.

Программируемое логическое управление (ПЛК). Современные прессы часто оснащаются ПЛК, который позволяет задавать сложные алгоритмы управления, интегрировать датчики и обеспечивать точное слежение за состоянием пресса. Такой метод дает больше возможностей для автоматизации и диагностики неисправностей [4].

Управление с обратной связью. В системах с обратной связью используются датчики для измерения параметров работы пресса (например, положения ползуна, усилия прессования, скорости движения) [4]. Контроллер анализирует эти данные и корректирует управляющие воздействия в режиме реального времени. Это значительно улучшает стабильность и повторяемость работы.

Применение адаптивного управления. Адаптивные системы управления позволяют изменять параметры регулятора в зависимости от изменения характеристик пресса, например, из-за нагрева, износа механизмов или изменения нагрузки. Использование ПДИ-контроллеров с адаптацией коэффициентов делает пресс более устойчивым к неопределенностям.

Применение интеллектуальных систем управления. В последнее время активно развивается применение нейронных сетей, машинного обучения и алгоритмов предсказательного управления (МРС). Эти методы позволяют анализировать большие объемы данных и находить оптимальные стратегии управления для различных условий эксплуатации.

Математическая модель адаптивного управления гибридного кривошипного пресса с обратной связью может включать несколько ключевых компонентов, отражающих динамику самого пресса, систему управления и процесс адаптации параметров управления. Важнейшим элементом модели является описание механической части пресса, включающее кинематические и динамические характеристики кривошипно-шатунного механизма, а также учет силовых и инерционных нагрузок. Система управления представляет собой совокупность алгоритмов регулирования, обеспечивающих коррекцию усилия и скорости в зависимости от технологических условий. Обратная связь играет ключевую роль в адаптации, анализируя параметры работы пресса в реальном времени и внося необходимые корректировки для повышения точности, надежности и эффективности работы оборудования.

Кинематические и динамические характеристики кривошипно-шатунного механизма определяют его движение и силовые воздействия в процессе работы пресса. Кинематические параметры включают зависимости перемещения, скорости и ускорения ползуна от угла поворота кривошипа, что важно для

анализа рабочего цикла пресса. Динамические характеристики описывают силы, действующие в механизме, включая инерционные нагрузки, моменты, возникающие в подвижных соединениях, а также влияние массы и упругих деформаций элементов конструкции. Учет этих факторов в математической модели позволяет повысить точность управления, минимизировать вибрации и перегрузки, а также оптимизировать энергозатраты при работе пресса.

На рисунке 1 представлена кинематическая схема исполнительного механизма гибридного кривошипного пресса (ГКП). В качестве основных параметров движения рассматриваются: Φ – угол вращения кривошипа OA и Δ и – линейное перемещение кулисной пары D . Введены обозначения переменных координат: θ – угловая координата звена AB ; ψ – угловая координата звена BC ; ϑ – угловая координата звена EB ; S – перемещение рабочего ползуна, также постоянные параметры: $r, l_1, l_2, d, x_E = a, y_E = b$ – длина кривошипа, длины шатунов AB и BC, BD , координата шарнира E соответственно.

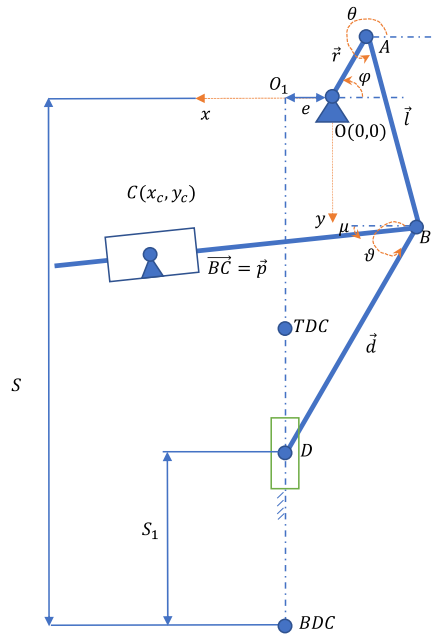


Рисунок 1 – кинематическая схема исполнительного механизма гибридного кривошипного прессы

Построение системы кинематических уравнений, описывающих движение узлов кривошипного пресса:

$$x = R\cos\theta + \sqrt{L^2 - R^2\sin^2\theta} \quad (1)$$

$$\vartheta = \frac{dx}{dt} = -R \sin \theta \cdot \dot{\theta} - \frac{R^2 \sin \theta \cos \theta \cdot \dot{\theta}}{\sqrt{L^2 - R^2 \sin^2 \theta}} \quad (2)$$

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (3)$$

Таким образом установлены аналитические функций скоростей и ускорений звеньев, которые позволяют построить явный алгоритм кинематического анализа механизма. Эти зависимости используются для вывода уравнений динамики гибридного пресса.

Определение уравнения движения, основанного на законах Ньютона:

$$F = ma + B\dot{\vartheta} + kx \quad (4)$$

где m – масса ползуна,

B – коэффициент вязкого трения,

k – жесткость системы.

Представлено решение, основанное на предложенном алгоритме (таблица 1)

Таблица 1 – Этапы алгоритма решения

№	Этап	Описание
1	Задание параметров механизма	Ввод исходных данных: длина кривошипа R , длина шатуна L , масса ползуна m , коэффициент сопротивления B , жесткость возвратной пружины k .
2	Определение угловой скорости ω	Назначается или вычисляется значение угловой скорости вращения кривошипа.
3	Вычисление кинематических параметров	Для каждого момента времени t : - Координата ползуна $x(t)$ - Скорость $\dot{x}(t)$ - Ускорение $\ddot{x}(t)$ на основе геометрических уравнений механизма.
4	Определение силы $F(t)$	Вычисляется сила, действующая на ползун, с учётом инерционных, упругих и сопротивляющихся сил: $F = m\ddot{x} + B\dot{x} + kx$
5	Численная реализация в MATLAB	Численное моделирование алгоритма в среде MATLAB для анализа точности, визуализации и верификации результатов.

На примере по заданному параметру:

$R = 0.1$; % длина кривошипа, м

$L = 0.4$; % длина шатуна, м

$m = 5$; % масса ползуна, кг

$B = 0.1$; % коэффициент вязкого трения

$k = 1000$; % жесткость системы, Н/м

$\omega = 10$; % угловая скорость кривошипа, рад/с получены результаты вычисления параметров визуальном виде (рисунке 2)

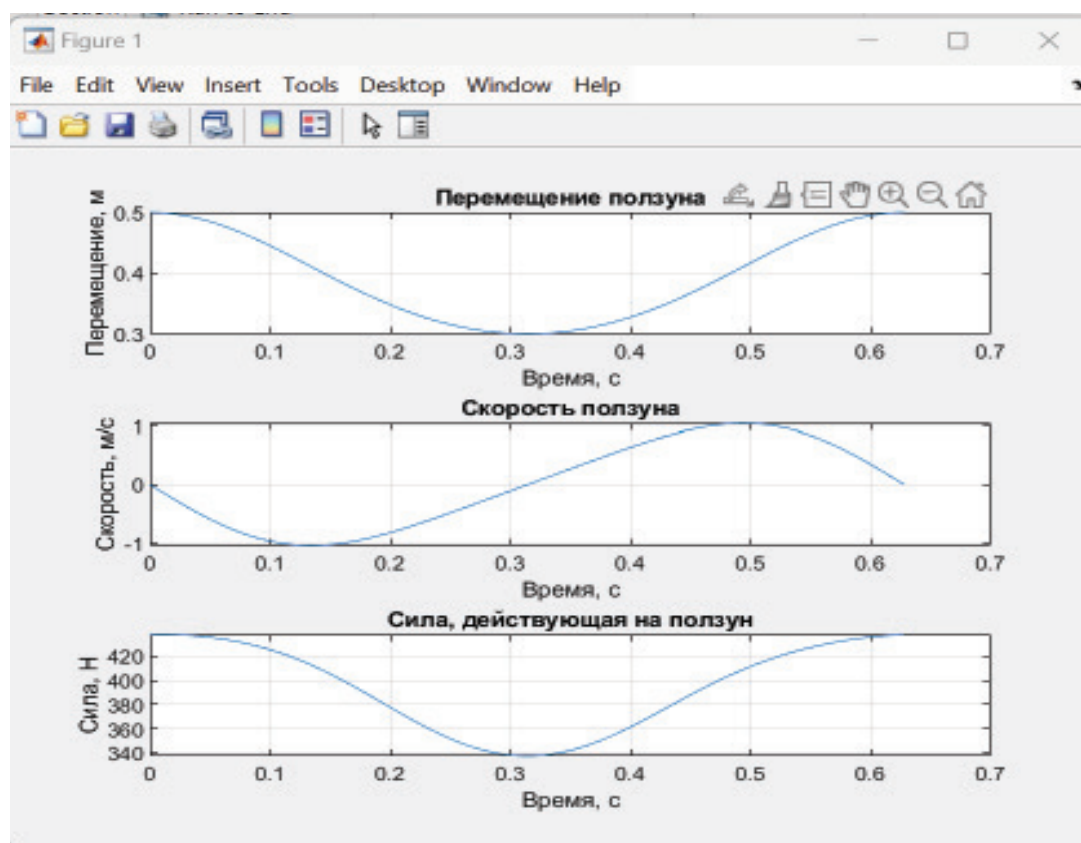


Рисунок 2 – Движение ползуна кривошипно-шатунного механизма

Эти результаты показывают движение ползуна кривошипно-шатунного механизма и вычисляет действующую на него силу.

Модель динамики гибридного пресса учитывает как статические, так и динамические аспекты работы устройства, что позволяет глубже понять поведение системы и оптимизировать её характеристики для повышения производительности и точности работы пресса. Гибридный кривошипный пресс сочетает механические и электрические компоненты, такие как двигатели, трансмиссии, редукторы и другие. Для описания динамики можно использовать дифференциальные уравнения второго порядка, которые моделируют движение кривошипа:

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = T(t) \quad (4)$$

где:

$M(\theta)$ – момент инерции, зависящий от угла поворота;

$C(\theta, \dot{\theta})$ – корригирующий момент, зависящий от угла и угловой скорости;

$G(\theta)$ – сила сопротивления (например, сила тяжести);

$T(t)$ – приложенный момент от двигателя;

θ – угол поворота кривошипа

Система управления может быть представлена как контроллер с обратной связью, использующий данные о текущем положении и скорости для вычисления управляющего сигнала. Например, классический пропорционально-дифференциально-интегральный (ПДИ) контроллер может быть использован:

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \dot{e}(t) + K_i \int e(t) dt \quad (5)$$

где:

$e(t) = \theta_{ref} - \theta(t)$ – ошибка положения;

K_p, K_d, K_i – коэффициенты пропорциональной, дифференциальной и интегральной частей контроллера.

Адаптивная система управления необходима для корректировки параметров контроллера в зависимости от изменений в динамике системы, таких как изменения нагрузки или износ компонентов [5]; [6]. Для этого часто используется метод адаптации параметров в реальном времени, например, на основе метода наименьших квадратов (НМК) или алгоритма LMS (Least Mean Squares). Математически это можно выразить как:

$$\dot{\theta}_i = \alpha_i e(t) \quad (6)$$

где θ_i – адаптируемые параметры контроллера, α_i – скорость адаптации.

Обратная связь используется для корректировки действий контроллера в зависимости от ошибки и её производной. Это позволяет системе поддерживать стабильность и минимизировать отклонения от заданной траектории. С учетом параметров адаптивного управления обратная связь становится более гибкой и точной, чем в классических системах управления.

Таким образом, полная модель может включать систему дифференциальных уравнений, описывающих динамику пресса, систему управления с PID контроллером, а также механизм адаптации параметров управления в ответ на изменения внешних условий. В классических системах с обратной связью контроллер вычисляет ошибку $e(t)$ как разницу между заданным значением и текущим состоянием:

$$e(t) = y_{ref}(t) - y(t) \quad (7)$$

где:

Y_{ref} – желаемое значение (или траектория);
 $y(t)$ – текущее значение состояния системы.

В адаптивных системах с обратной связью контроллер использует информацию об ошибке и её производной, а также адаптирует параметры управляющего воздействия для обеспечения устойчивости и оптимальности. Например, для ПИ контроллера, который регулирует систему на основе ошибки и её интеграла, его параметры могут адаптироваться следующим образом:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (8)$$

где:

K_p , K_i – параметры пропорциональной и интегральной частей контроллера, которые могут изменяться в зависимости от текущих условий работы системы.

Пример применения адаптивного управления с обратной связью: Рассмотрим задачу управления роботом с изменяющейся нагрузкой. Если известна исходная модель робота, но в процессе работы его динамика меняется (например, меняется масса груза), адаптивный контроллер с обратной связью будет корректировать параметры управления, чтобы компенсировать эти изменения и поддерживать желаемую траекторию.

В этом случае контроллер будет использовать ошибки, такие как разница между текущим положением и целевым, а также скорости и ускорения, чтобы определить требуемое управляющее воздействие, в то время как параметры контроллера адаптируются для компенсации изменений динамики.

Для симуляции динамики системы с учётом внешних воздействий и использования адаптивного ПИ-контроллера, заданы следующие параметры модели и контроллера:

Исходная масса $m=5$ кг, коэффициент трения $b=2$, жёсткость пружины $k=50$ Н/м. Шаг дискретизации $T_s=0.01$ с., время моделирования $T_{end}=10$ с.

Параметры адаптивного ПИ-контроллера пропорциональный коэффициент $K_p=10$, интегральный коэффициент $K_i=5$ то есть коэффициент интегральной части ПИ-контроллера, который учитывает накопленную ошибку во времени для повышения точности управления.

Начальные условия системы положение равно $x=0$, начальная скорость объекта, равная нулю $v=0$. Заданное положение $x_{ref}=1$, к которому система должна стремиться. Начальное значение интеграла ошибки для ПИ-контроллера, отражающее суммарную ошибку за все предыдущие шаги $integral_error=0$. Параметр, определяющий скорость адаптации коэффициентов ПИ-контроллера в процессе моделирования, что позволяет изменять параметры управления в зависимости от динамики системы. $\alpha=0.1$

Получены результаты вычисления параметров визуальном виде: (рисунке 3)

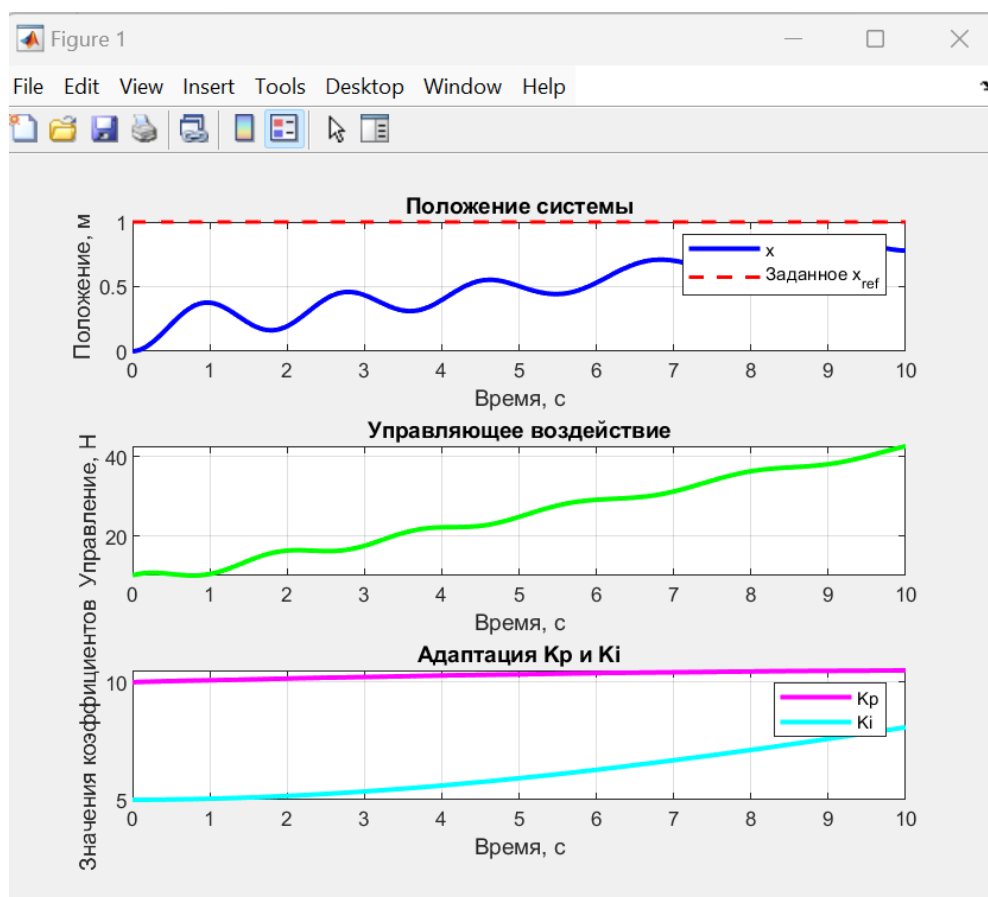


Рисунок 3 – Положение системы, управляющие воздействие и коэффициенты адаптации

Результаты и обсуждение

Эти результаты показывают положение системы, управляющие воздействие и коэффициенты адаптации и вычисляет действующую на него силу.

Объединенный модель систему дифференциальных уравнений, описывающих динамику прессы, систему управления с ПИД контроллером.

Объединенный модель включает систему дифференциальных уравнений, описывающих динамику прессы, систему управления с ПИД контроллером, а также механизм адаптации параметров управления в ответ на изменения внешних условий.

Получены результаты вычисления параметров визуальном виде (рисунк 4)

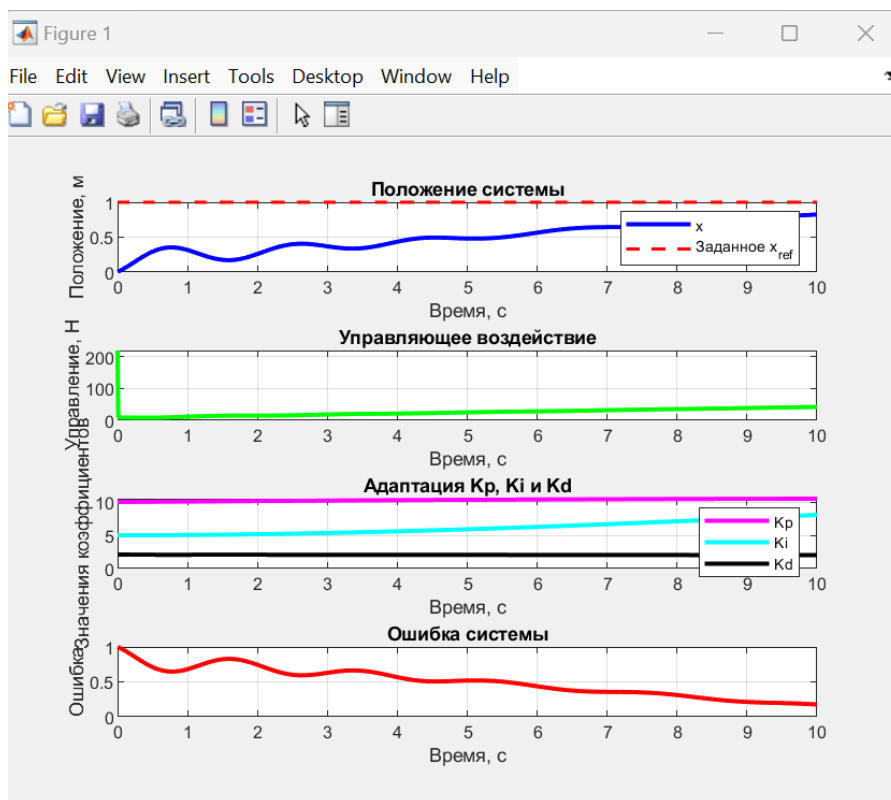


Рисунок 4 – Положение системы, управляющие воздействие и коэффициенты адаптации и ошибка системы

Эти результаты показывают положение системы, управляющие воздействие и коэффициенты адаптации, ошибка системы и вычисляет действующую на него силух [7]; [8].

Выводы

Разработка математической модели адаптивного управления гибридного кривошипного пресса с обратной связью является важной задачей для повышения эффективности и устойчивости работы такого оборудования. В данной модели учитываются динамика системы, принципы адаптивного управления и влияние внешних факторов, что позволяет обеспечивать высокую точность и стабильность процесса. Использование ПИД-контроллера в сочетании с механизмами адаптации параметров управления позволяет компенсировать изменения нагрузки, износ компонентов и другие внешние возмущения, что делает пресс более надежным и производительным [8]; [9]; [10]. Представленный подход может быть использован для оптимизации работы прессового оборудования и повышения его энергоэффективности, а также может быть адаптирован для управления другими сложными мехатронными системами.

REFERENCES

- 1 **Murata, C., Endou, J., Futamura, S.** Development of direct drive digital servo press [Steel Grips-Journal and related materials] [Text] // Supplement 10th Metal Forming. – 2004. – P. 371–374.
- 2 **Murata, C., Machira, T., Futamura, S., Endou, J.** Intelligent control system for direct drive digital servo press [Text] // Proceeding of the 5th International Conference on «Intelligent Proceeding and Manufacturing of Materials». – IPMM. – № 05. – 2005.
- 3 **Hasegawa, K., Endou, J., Inada, A., Kawachi, N.** Effect of control of press with eccentric force [Text] // Steel Research International. Special Edition: 13th Metal Forming. – 2010. – Vol. 81-9. – P. 690–693.
- 4 **Kütük, M., Halicioglu, R., Dülger, L. C.** Kinematics and Simulation of a Hybrid Mechanism [Text] // MATLAB/SimMechanics «Journal of Physics» : Conference Series. – 01. – 2016. – Vol. 574. – P. 215.
- 5 **Ichikawa, K., Murata, C., Takahashi, T.** Nonsimultaneous press forming using 4-axes direct drive digital servo press [Text] // [Procedia Engineering] // Proceedings of the 11th International Conference on Technology of Plasticity. – 2014.
- 6 **Hollerbach, J. M.** Dynamic Scalling of Manipulator Trajectories [Text] // Trans ASME, J. Dyn. Systems, Measurement and Control. – 1984. – P. 102–106.
- 7 **Rooney, R. H., Shapiro, E. Y.** The use modal control to minimize errors in the analytical reconstruction of flight control sensor signals [Text] // Proc. IEEE Nat, Aerospace and Electron. Conf. NAECON 1982. Dayton, Ohio, 1982. New York. – 1982. – № 4.
- 8 **Luh, J. Y. S., Walker, M.W., Paul, R. P.** On Line – Computational Scheme for Mechanical Manipulators [Text] // Trans. ASME, J. Dyn. Systems, Measurement and Control. – 1980. – Vol. 120. – P. 69–76.
- 9 **Lee, C. S. G., Lee, B. H., Nigam, R.** Development of the Generalized d'Alembert Equations of Motion for Mechanical Manipulators [Text] // Proc. 2nd Conf. Decision and Control, San Antonio, Tex. – 1983. – P. 1205–1210.
- 10 **Walker, M. W., Orin, D. E.** Efficient Dynamic Computer Simulation of [Text] // Mechanisms Trans. ASME, J. Systems, Measurement and Control. – 1982. – Vol. 104. – P. 205–211.

Поступило в редакцию 25.05.25.

Поступило с исправлениями 25.05.25.

Принято в печать 09.06.25.

***А. Ж. Абекова¹, Б. Д. Жунисбеков²,
Ж. Т. Шәріпов³, Б. У. Асанов⁴, Н. Төлебаев⁵**

^{1,5}У. А. Джолдасбеков атындағы механика және машинатану институты,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

^{2,3,4}Satbayev University, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

25.05.25 ж. баспаға түсті.

25.05.25 ж. түзетулерімен түсті.

09.06.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ГИБРИДТІ ҚОСИІНДІ БАСПАҚТЫҢ КЕРІ БАЙЛАНЫСЫ БАР АДАПТИВТІ БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІНІҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛІ

Бұл жұмыс кері байланысы бар гибриді қосиінді пресі адаптивті басқарудың математикалық моделін ұсынады. Пресінің динамикалық моделі, оның ішінде механикалық және электрлік құрамдас бөліктер қарастырылып, нақты уақыттағы жүйе параметрлерінің өзгерістері есепке алынады. Баспаның ағымдағы жағдайына байланысты параметрлерді анықтау және бақылау әрекетін реттеу әдістеріне негізделген адаптивті бақылау заңы ұсынылады. Қателерді азайту және прес жұмысының жоғары дәлдігін қамтамасыз ету үшін кері байланысты пайдаланатын бейімдеу алгоритмдері ұсынылған. Жүйе тұрақтылығына талдау жүргізіліп, ұсынылған тәсілдің классикалық басқару әдістеріне қарағанда артықшылықтары көрсетілген.

Мақалада объект жағдайы мен оның параметрлері туралы толық емес ақпарат жағдайында жұмыс істейтін объектілердің көп өлшемді стохастикалық үлгілерін бақылау есептерін шешу кезінде басқару жүйелерін синтездеу әдістері қарастырылады.

Бұл жағдайда басқару жүйелерін жобалау қолданылатын әдістер мен алгоритмдерді бірте-бірте қосу және қиындату арқылы жүзеге асырылады: детерминирленген модельдер үшін оңтайлы басқарудан қателері бар толық емес өлшеуі бар стохастикалық модельдер үшін адаптивті бақылау жүйелеріне дейін. Қарастырылып отырған мәселелердің күрделілігіне байланысты оларды шешудің бірден-бір жолы имитациялық модельдеу болып табылады.

Модельдеу нәтижелері өзгермелі жүктемелер мен сыртқы әсерлер кезінде әзірленген басқару жүйесінің тиімділігін растайды. Жабдық жұмысындағы кедергілер мен болжанбайтын ауытқулардың басқару дәлдігіне әсері де қарастырылады. Ұсынылған жүйе жоғары тұрақтылықты және жұмыс жағдайларының кең ауқымына бейімделу мүмкіндігін көрсетеді.

Кілтті сөздер: адаптивті басқару, гибриді иінді прес, кері байланыс, математикалық модель, динамикалық жүйе.

***A. Zh. Abekova¹, B. D. Zhunisbekov²,
Zh. T. Sharipov³, B. U. Asanov⁴, N. Tolebayev⁵**

^{1,5}Institute of mechanics and engineering named after academician
U. A. Dzholdasbekov, Republic of Kazakhstan, Almaty;

^{2,3,4}Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 25.05.25.

Received in revised form 25.05.25.

Accepted for publication 09.06.25.

MATHEMATICAL MODEL OF ADAPTIVE CONTROL OF A HYBRID CRANK PRESS WITH FEEDBACK

This paper presents a mathematical model of adaptive feedback control of a hybrid crank press. The dynamic model of the press, including mechanical and electrical components, is considered, and the changes in the system parameters in real time are taken into account. An adaptive control law based on the methods of parameter identification and adjustment of the control action depending on the current state of the press is proposed. Adaptation algorithms using feedback to minimise the error and ensure high accuracy of the press are given. The stability of the system is analysed and the advantages of the proposed approach over classical control methods are shown.

The article considers methods of synthesis of control systems when solving tracking problems for multidimensional stochastic models of objects functioning under conditions of incomplete information about the state of the object and its parameters. In this case, the design of control systems is carried out by gradual addition and complication of the methods and algorithms used: from optimal control for deterministic models, to adaptive tracking systems for stochastic models under incomplete measurement with errors. Due to the complexity of the considered problems, the only way to solve them is simulation modelling.

Modelling results confirm the effectiveness of the developed control system under varying loads and external influences. The influence of disturbances and unpredictable deviations in equipment operation on control accuracy is also considered. The proposed system demonstrates high stability and ability to adapt to a wide range of operating conditions.

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

Теруге 16.05.25 ж. жіберілді. Басуға 30.06.25 ж. қол қойылды.
Электрондық баспа
257,8121 Mb RAM
Шартты баспа табағы 32,68 Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.
Компьютерде беттеген: Е. Е. Калихан
Корректорлар: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4420

«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
<https://nitk.tou.edu.kz>