

Раздел 3. «Технические науки и технологии»УДК 681.58
МРНТИ 50.49.37Мрачковский Д.В.¹, Черная О.А.², Черный А.П.², Барановская М.Л.¹, Тытюк В.К.¹¹Криворожский национальный университет, Кривой Рог, Украина²Кременчугский национальный университет им. Михаила Остроградского, Кременчуг, УкраинаE-mail: d.mrachkovskiy@knu.edu.ua**Математическое моделирование человека-оператора в эргатических системах управления производственными механизмами**

Работа посвящена изучению влияния человека-оператора на работу эргатических производственных систем в промышленности, так как влияние человека-оператора может оказывать существенное влияние на технико-экономические показатели. Важным вкладом является концепция представления оператора в форме нелинейного динамического звена в системе управления. При решении поставленных задач использовались экспериментальные исследования, а также последующая обработка полученных результатов с применением MATLAB/Simulink. Структурно-параметрическая идентификация данных экспериментальных исследований показали возможность представления оператора в форме динамического звена второго порядка с транспортным запаздыванием. Коэффициент детерминации полученной модели составляет около 85%. Предложенная математическая модель оператора может использоваться для определения технико-экономических показателей человеко-машинных систем управления производственными механизмами. Предлагаемая математическая модель оператора является полезной основой для оптимизации работы и усовершенствования структуры человеко-машинных систем управления.

Ключевые слова: оператор, человеко-машинная система управления, транспортное запаздывание, реакция, коэффициент детерминации

Введение

Быстрый рост технического прогресса превратил человека из непосредственного исполнителя в оператора, основная функция которого заключается в контроле и управлении рабочими процессами в промышленности, транспорте, энергетике. Производственная система, в которой задействован человек-оператор, называется эргатической [1]. Эргатические системы широко распространены в современном промышленном производстве. Примером таких систем являются системы авиационных перевозок [2], крановые механизмы, разнообразные горнодобывающие машины, различные производственные агрегаты, работой которых управляет человек-оператор [3].

Наличие "человеческого фактора" в эргатических системах часто трактуют как их недостаток, чему есть определенные подтверждения. Число аварий и катастроф, связанных с ошибками операторов, постоянно растет, а их последствия становятся все более масштабными и трагическими [4 – 6]. Однако необходимо отметить, что влияние того же «человеческого фактора» дает и ряд преимуществ, таких как: непрерывная адаптация эргатических систем, возможность принятия решений в нестандартных ситуациях [7].

В настоящее время, в связи с недостаточно глубоким развитием интеллектуальных систем управления, способных эффективно работать в условиях значительных изменений производственной сцены, эргатические системы остаются востребованными и широко распространенными. В современной горнодобывающей индустрии обычными представителями эргатических систем

Раздел 3. «Технические науки и технологии»

являются экскаваторные механизмы разных типов. Воздействие человека-оператора экскаваторных механизмов не приводит к аварийным ситуациям с катастрофическими последствиями, как в случае пилотов летательных аппаратов. В эргатических системах горнодобывающей промышленности негативное влияние человека-оператора проявляется в снижении технико-экономических показателей производственных процессов. Низкий уровень квалификации оператора экскаватора может приводить к повышению удельного энергопотребления на 30 – 40% [8].

Человек-оператор выполняет последовательность действий, направленных на достижение определенных целей и задач. Она является важной частью управляющей системы и функционирует как сложный механизм, обрабатывающий информацию из разных источников. Она фильтрует внешние данные, анализирует их, превращает в управляющие команды с учетом навыков и знаний. Через органы управления она выполняет команды и отвечает на реакцию управляемого объекта, подобно звену в замкнутом контуре управления, рис. 1.

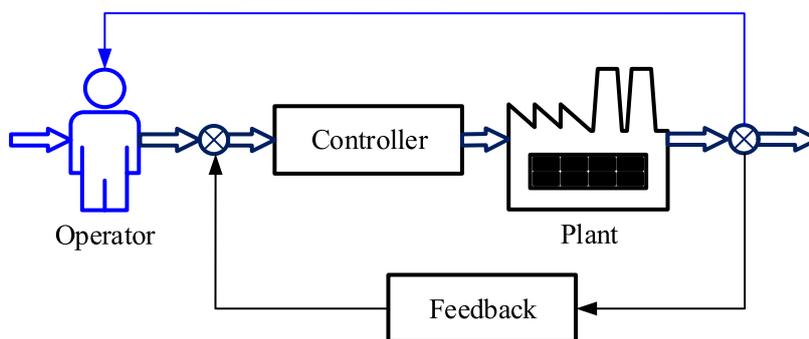


Рисунок 1 – Структурная схема эргатической системы с замкнутой системой управления производственным процессом

Следовательно, человека-оператора можно рассматривать как нелинейное динамическое звено в замкнутом контуре управления производственным процессом.

Таким образом, для повышения точности математического моделирования производственных механизмов горнодобывающей промышленности необходимо учитывать особенности работы человека-оператора. Поэтому научно-практическая задача разработки математической модели человека-оператора в человеко-машинной системе управления горнодобывающим оборудованием является важной и актуальной задачей.

Целью работы является определение особенностей работы оператора и определение требований к математической модели оператора, выполнение экспериментального исследования действий оператора и структурно-параметрическая идентификация соответствующей функции передачи.

Для достижения поставленных целей необходимо выполнить следующие задачи:

- выполнить экспериментальные исследования действий оператора, получить обобщающие числовые характеристики полученных результатов;
- выполнить структурную и параметрическую идентификацию передаточной функции оператора.

Материал и результаты исследований.

Задачей оператора эргатической системы является определение текущего значения погрешности системы и уменьшение ее с помощью соответствующих управляющих действий [9].

Наиболее проста и достаточно распространена ситуация, когда оператор управляет одной входной величиной. Однако в случае управления пространственными движениями рабочей машины оператор должен оценивать и управлять как минимум тремя характеристиками. Подобная ситуация

Раздел 3. «Технические науки и технологии»

имеет место не только в авиации, но и горнодобывающей промышленности с широкой отраслью использования экскаваторного оборудования разнообразной конструкции и сложности.

В [10] рассмотрена кинематическая схема взаимосвязанной механической системы экскаватора «прямая лопата», в [11] рассмотрены вопросы управления пространственным положением ковша экскаватора при управлении электроприводами основных механизмов экскаватора «прямая лопата». Однако в упомянутых работах не учитывалось влияние динамических свойств оператора на технико-экономические показатели работы экскаватора.

Вопрос о том, как именно оператор стабилизирует систему, является первоочередным. В задаче стабилизации отмечаются следующие психофизиологические особенности поведения человека-оператора [12]:

- наличие запаздывания реакции;
- зависимость от задачи (свойство изменять свои характеристики в зависимости от цели управления, динамики управляемого объекта, вида используемой информации);
- зависимость от времени (выявляется в двух формах: во-первых, характеристики оператора со временем изменяются, поскольку он учится; во-вторых, оператор чувствует изменение параметров внешней среды и управляемого объекта и изменяет свои характеристики в соответствии с этим);
- предвидение (свойство предполагать будущее положение цели на основе знания предыдущих);
- существенная нелинейность;
- стохастичность (характеристики оператора в одном и том же эксперименте отличаются от опыта к опыту, однако эта сменность мала, если время обучения достаточно, а задача не сложна, поэтому детерминированная модель может использоваться в статистическом смысле);
- дискретность (в неких вариантах оператор ведет себя как дискретная система).

Управляющие действия оператора имеют сложную природу и состоят из детерминированной и случайной составляющих [13]:

- детерминированная составляющая представляет собой реакцию эквивалентного человеку-оператору динамического элемента постоянной структуры;
- стохастическая составляющая, зависящая от функционального состояния оператора, обусловлена конечной управляемостью нервно-мышечной системы человека, ограниченной точностью и субъективностью восприятия входящей информации. Статистические параметры этой составляющей существенно зависят от вида входного сигнала, сложности задачи, эргономических характеристик рабочего места (усталости оператора) и могут изменяться со временем.

Соответственно, в реакции оператора выделяют две основные составляющие:

- детерминированную, отвечающую реакции на входной сигнал эквивалентного человеку-оператору динамического элемента;
- ремнантную (от англ. remnant – остаток), являющуюся разницей между действительным входным сигналом оператора и реакцией линейной модели.

Наличие ремнанты обусловлено следующими факторами:

- наличием шумов. Существует много причин для возникновения шумов и ошибочных действий оператора при восприятии движения, его анализе, дозировке отклонений органов управления и т. д.;
- нестабильностью характеристик оператора. В процессе стабилизации объекта характеристики оператора изменяются относительно некоторого среднего значения, что также вносит свой вклад в ремнанту;
- конечной управляемостью нервно-мышечной системы человека;
- ограниченной точностью и субъективностью восприятия входящей информации.

Исследователи отмечают наличие существенной корреляции между сложностью задачи, оценкой оператором управляемости объекта и мощностью ремнанты в сигнале оператора [14], поэтому воспроизведение ремнанты является важнейшей составляющей при моделировании поведения оператора.

Раздел 3. «Технические науки и технологии»

Математическая модель оператора эргатической системы должна сочетать целый спектр характерных для человека биохимических, физических, психофизических и психологических параметров, его реакций и взаимодействия с окружающей средой.

Исходя из описанных выше особенностей поведения оператора, речь может идти не о комплексной модели, рассчитанной на все случаи деятельности оператора, а лишь о модели выполнения конкретной операции. Считается, что оператор достаточно тренирован для выполнения этой операции, а динамика объекта управления и внешние условия деятельности оператора неизменны.

Физическое моделирование эргатической системы имеет ограниченное использование из-за сложности и высокой стоимости. По этой причине основное средство получения данных для построения моделей – тренажерные комплексы. Экспериментальные данные обладают значительным рассеянием из-за случайных отклонений в деятельности человека, вызванных многими причинами: от изменения эмоционального состояния до потери внимания и усталости. Потому опыты выполняются многократно, а их результаты подвергаются статистической обработке.

Идентификация эквивалентной динамической модели человека-оператора может быть выполнена путем параметрической идентификации многих моделей с заданной структурой и выбором наилучшей модели по известным критериям.

Необходимо учитывать, что основной известной нелинейностью оператора является транспортное опоздание, обусловленное конечной скоростью прохождения сигналов в нервной системе человека и временем, необходимым для принятия решения.

Присутствие в этих моделях большого количества изменяющихся в широком диапазоне эмпирических коэффициентов и их идентификация на основе измерений психофизических данных является сложной научно-технической задачей.

В современной научной литературе известны всевозможные подходы к решению задачи идентификации математической модели оператора.

[15] рассмотрены особенности моделирования оператора с применением C^* -алгебр.

В [16] показаны возможности использования библиотеки SIT (System Identification Toolbox®) для параметрической идентификации модели поведения пилота-человека при управлении полетом на авиасимуляторе X-Plane.

В данном исследовании рассматривалась простая модель действий оператора с одним входным и одним выходным сигналом.

В ходе экспериментального исследования были выполнены две серии экспериментов.

В первом эксперименте оператор должен был реагировать на ступенчатый сигнал, причем изменение сигнала происходило в фиксированный момент времени $t = 5$ с.

Во втором эксперименте оператор должен был реагировать на синусоидальный сигнал с ограничением, причем начало действия сигнала происходило в фиксированный момент времени $t = 2$ с.

Каждая серия состояла из 20 экспериментов для того, чтобы получить данные для статистической обработки полученных результатов.

В качестве органа управления использовался джойстик геймпада Logitech F310. Регистрация действий оператора производилась с помощью MATLAB/Simulink. Структурная схема использованной модели представлена на рис. 2. Модель настраивается для работы в режиме реального времени.

Раздел 3. «Технические науки и технологии»

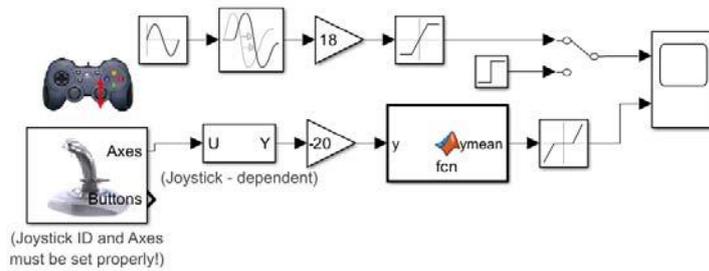


Рисунок 2 – Модель MATLAB/Simulink для регистрации действий оператора в ходе экспериментального исследования

Сигнал реакции оператора подвергался дополнительному сглаживанию по алгоритму скользящего среднего с длиной окна L=50.

Полученные в ходе серии экспериментов сигналы были усреднены. Конкретно усредненный сигнал реакции оператора употреблялся для идентификации динамической модели детерминированной составляющей реакции оператора. В качестве альтернатив гипотезы о структуре динамической модели оператора были рассмотрены варианты передаточных функций, представленные в табл. 1.

В каждой серии экспериментов были определены параметры передаточной функции и коэффициент детерминации каждой динамической модели оператора согласно таблице 1.

Для выполнения структурно-параметрической идентификации динамической модели оператора использовалась встроенная функция procest библиотеки SIT (System Identification Toolbox®) программы MATLAB.

Таблица 1 – Математические модели оператора, которые исследовались

пп	Название модели	Передаточная функция модели
1	P1D	$G(s) = \frac{K_P}{1 + T_{P1} \cdot s} \cdot e^{-T_d \cdot s}$
2	P2DU	$G(s) = \frac{K_P}{1 + 2 \cdot \zeta \cdot T_W \cdot s + (T_W \cdot s)^2} \cdot e^{-T_d \cdot s}$
3	P3DU	$G(s) = \frac{K_P}{(1 + 2 \cdot \zeta \cdot T_W \cdot s + (T_W \cdot s)^2) \cdot (1 + T_{P3} \cdot s)} \cdot e^{-T_d \cdot s}$

Ниже даны основные результаты, полученные для каждой серии экспериментов.

Серия 1. На рис. 3, а представлен вариант реакции оператора на ступенчатый входной сигнал, приходящий в момент времени t = 5 с. на рис. 3, б представлен график реакции оператора, усредненной по всем экспериментам этой серии.

Раздел 3. «Технические науки и технологии»

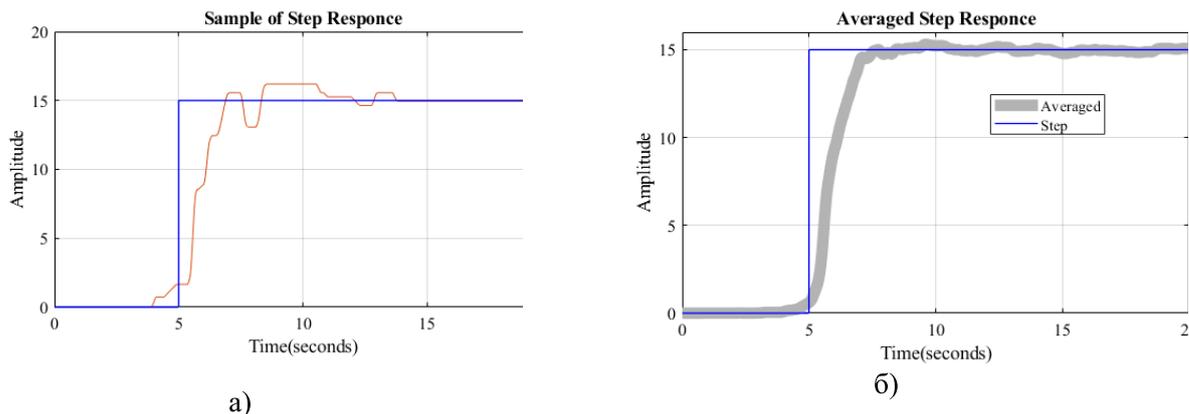


Рисунок 3 – Реакция оператора на ступенчатый сигнал: а – пример реализации в одном эксперименте; б – усредненная реакция оператора в серии экспериментов

На рис. 4, а показаны результаты моделирования отклика разных моделей на исходное входное воздействие ступенчатой формы. На рис.4, представлены те же кривые в укрупненном масштабе.

В таблице 2 приведены результаты оценки качества разных моделей. Близость модели к реальному объекту оценивалась с помощью коэффициента детерминации R.

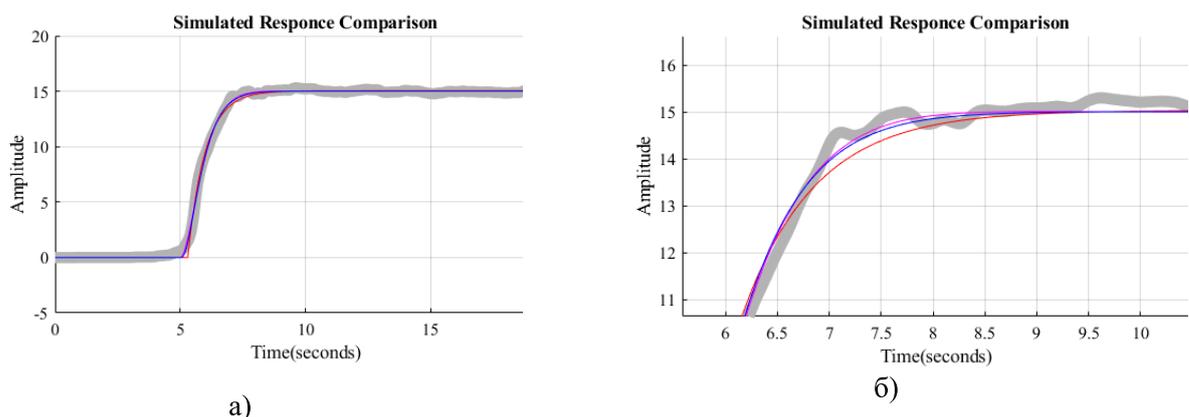


Рисунок 4 – Сравнительный анализ реального усредненного отклика оператора с откликом динамических моделей реакции оператора в первой серии экспериментов: а – усредненный сигнал отклика; б – усредненный сигнал отклика в укрупненном масштабе времени

Таблица 2. Оценка соответствия модели оператора экспериментальным данным первой серии экспериментов

пп	Модель	R, %	Параметры модели
1	P1D	96,6	$K_p = 1.0027; T_{p1} = 0.701; T_d = 0.297$
2	P2DU	97,33	$K_p = 1.0002; T_w = 0.5149; \xi = 0.91767; T_d = 0.0035$
3	P3DU	97,26	$K_p = 1.0008; T_w = 0.4448; T_{P3} = 0.0821 \xi = 0.99445; T_d = 0$

Раздел 3. «Технические науки и технологии»

Как показывают полученные результаты, коэффициенты детерминации всех рассматриваемых моделей достаточно высокие (около 95%) и отличаются по абсолютной величине.

Поэтому в качестве динамической модели оператора можно принять самую простую модель PID.

Серия 2. На рис. 5, а представлен вариант реакции оператора на непрерывный входной сигнал в форме синусоиды с ограничением, поступающий в момент времени $t = 2$ с. На рис. 5, б представлен график реакции оператора, усредненной по всем экспериментам второй серии.

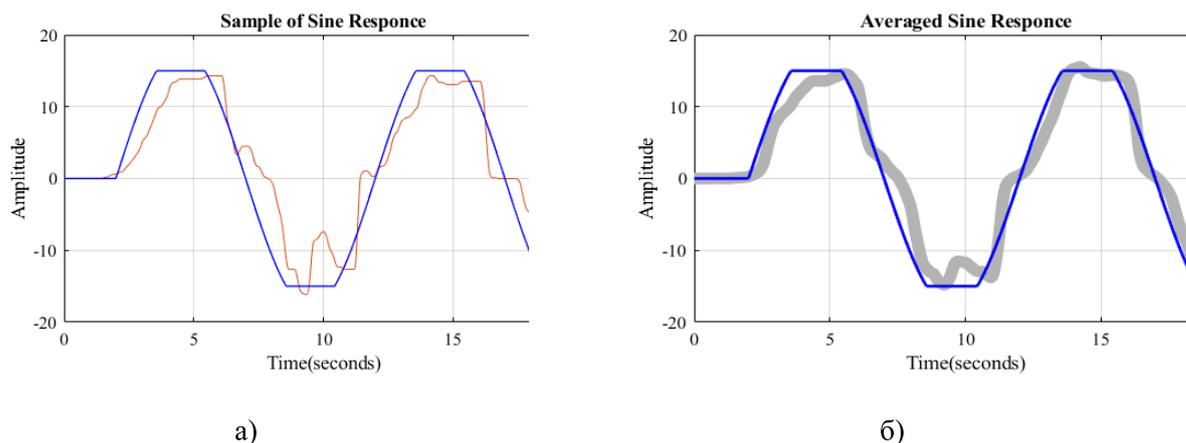


Рисунок 5 – Реакция оператора на синусоидальный сигнал с ограничением: а – пример реализации в одном эксперименте; б – усредненная реакция оператора в серии экспериментов

На рис. 6, а показаны результаты моделирования отклика разных моделей на исходное входное воздействие синусоидальной формы с ограничением. На рис. 6, б поданы те же кривые в укрупненном масштабе.

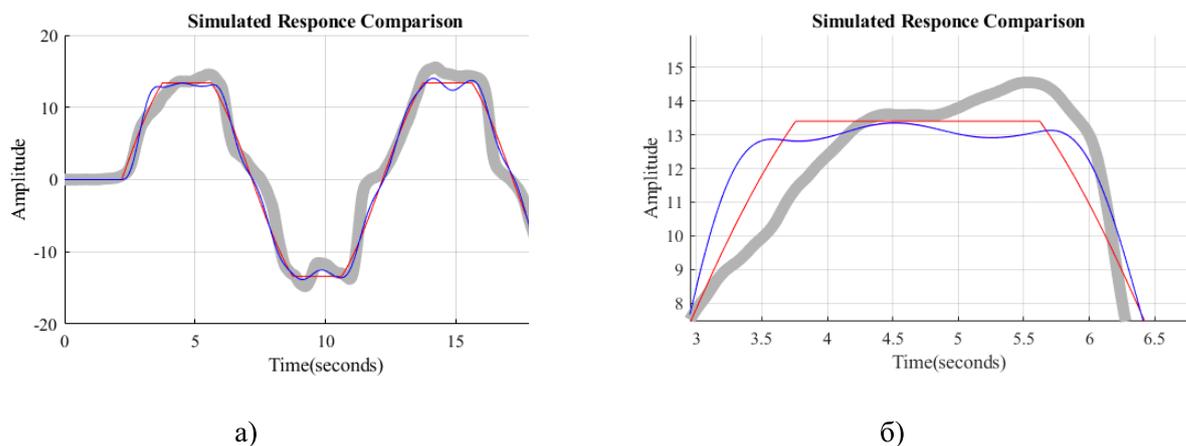


Рисунок 6 – Сравнительный анализ реального усредненного отклика оператора с откликом динамических моделей реакции оператора во второй серии экспериментов: а – усредненный сигнал отклика; б – усредненный сигнал отклика в укрупненном масштабе времени

В таблице 3 приведены результаты оценки качества разных моделей. Близость модели к реальному объекту оценивалась с помощью коэффициента детерминации R .

Раздел 3. «Технические науки и технологии»

Таблица 3. Оценка соответствия модели оператора экспериментальным данным во второй серии экспериментов.

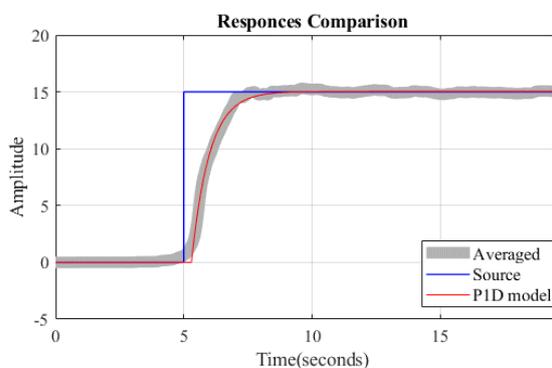
пп	Модель	R, %	Параметры модели
1	P1D	83,49	$K_p = 0.8938$; $T_{p1} = 10^{-6}$; $T_d = 0.18665$
2	P2DU	84,90	$K_p = 0.8741$; $T_w = 0.23405$; $\xi = 0.068123$; $T_d = 0.15055$
3	P3DU	84,90	$K_p = 0.8741$; $T_w = 0.2339$; $T_{p3} = 10^{-6}$; $\xi = 0.067285$; $T_d = 0,15109$

Как показывают полученные результаты, коэффициенты детерминации всех рассматриваемых моделей достаточно высоки (не более 80%) и незначительно различаются по абсолютной величине.

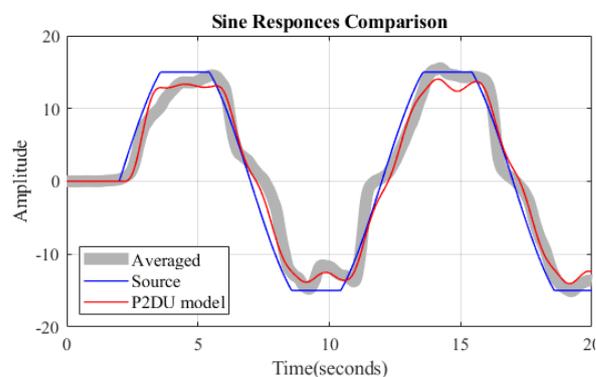
При этом обращает на себя внимание практически полное совпадение моделей второго (P2DU) и третьего (P3DU) порядка. Модель оператора первого порядка (P1D) хотя и имеет достаточно высокий коэффициент детерминации, однако не содержит динамической составляющей, так как постоянная T_{p1} времени практически равна нулю.

В данном случае в качестве динамической модели детерминированной составляющей реакции оператора рекомендуется принять модель второго (P2DU) порядка.

На рис. 7 приведены сравнительные диаграммы реального отклика оператора в экспериментальном исследовании и отклика модели оператора, полученных по предложенным выше уравнениям.



а)



б)

Рисунок 7 – Сравнительные результаты экспериментального исследования с работой предложенной динамической модели оператора: а – при скачкообразном сигнале задания; б – при синусоидальном сигнале с ограничением.

Указанные диаграммы показывают высокое совпадение предлагаемой модели оператора с результатами экспериментального исследования.

Обращает на себя внимание зависимость выбранной модели оператора от характера входного сигнала. Это может быть связано с психофизиологическими особенностями реакции оператора и ограниченным объемом экспериментального исследования.

К недостаткам выполненного исследования следует отнести отсутствие элементов, описывающих ремнантную составляющую реакции оператора.

Раздел 3. «Технические науки и технологии»

Выводы.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований действий оператора в SISO-системе. Обоснована возможность предоставления оператора в форме динамического звена второго порядка с транспортным опозданием. Коэффициент детерминации этой модели составил около 85%. Форма динамической модели детерминированной составляющей реакции оператора зависит от формы входного сигнала. Предложенная математическая модель оператора может использоваться при определении технико-экономических показателей эргатических производственных систем с человеко-машинной системой управления.

Список литературы

1. Korobiichuk I., Tokar A., Danik Y. Evaluation methods for the ergatic system reliability operator. Automation 2019: progress in automation, robotics and measurement techniques. 2020. Vol. 920. P. 560–570.
2. Tan Y., Feng D., Shen H. Research for Unmanned Aerial Vehicle components reliability evaluation model considering the influences of human factors. 3rd International Conference on Mechanical, Electronic and Information Technology Engineering. 2017. Vol. 139.
3. Haifeng Z. Fundamental Models for Missions of Engineered Systems. Systems Conference IEEE International. 2019. P. 1–6.
4. Che H., Zeng S., Guo J. Reliability assessment of man-machine systems subject to mutually dependent machine degradation and human errors. Reliability Engineering & System Safety. 2019. Vol. 190.
5. Kletz T., Amyotte P. Accidents said to be due to human error. What Went Wrong?. 2019. P. 53–172.
6. Strauch B. Investigating Human Error: Incidents, Accidents, and Complex Systems. Taylor & Francis Group. 2017. P. 309.
7. Suyatinov S.I., Buldakova T.I., Vishnevskaya Yu. A. Synergetic Model of Situational Awareness of a Human Operator in Ergatic Control Systems of Mobile Objects. Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2022. Vol. 23, № 6. P. 302-308.
8. Babaei K. M., Hall R. A. Study of Digging Productivity of an Electric Rope Shovel for Different Operators. Minerals. 2016. Vol. 6, № 2. P. 48.
9. Tyrva O., Saushev A., Shergina O. Automation Elements of Mental Activity and Actions of Human Operator in Ergatic System “Man-Machine”. 2018 International Russian Automation Conference. 2018. P. 1-5.
10. Tytiuk V., Khandakji K., Sivyakova G. Determining the parameters of the trajectory of the bucket of mining quarries excavators. E3S Web of Conferences. 2021. P. 280.
11. Tytiuk V., Chorny O., Mrachkovskiy D. Mathematical model of the closed-loop system of excavator bucket positioning. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2023. Vol. 1. P. 107-114.
12. Pan X., Wu Z. Performance shaping factors in the human error probability modification of human reliability analysis. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics. 2020. Vol. 26. P. 538–550.
13. Rejeki Y., Achiraeniwati E., Wanda A. Measurement of operator reliability level using the Human Error Assessment and Reduction Technique (HEART) method. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 830. P. 32-95.
14. Ahmad H., Faizal M., Mazleha M. Research reactor operator performance based on the human error assessment and reduction technique (HEART) in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Nuclear Science Technology and Engineering Conference. 2019. Vol. 785. P. 29–31.
15. Sinclair T. Model theory of operator systems and C*-algebras. Model Theory of Operator Algebras. 2023. P. 343-386.
16. Valoušek L., Jalovecky R., Use of the MATLAB System Identification Toolbox for the creation of specialized software for parameters identification. International Conference on Military Technologies. 2021. P. 1-5.

Раздел 3. «Технические науки и технологии»

Мрачковский Д.В., Черная О.А., Черный А.П., Барановская М.Л., Тютюк В.К.

Өндірістік механизмдерді басқарудың эргатикалық жүйелеріндегі адам операторын математикалық модельдеу

Жұмыс Адам операторының өнеркәсіптегі эргатикалық өндірістік жүйелердің жұмысына әсерін зерттеуге арналған, өйткені адам операторының әсері техникалық-экономикалық көрсеткіштерге айтарлықтай әсер етуі мүмкін. Операторды басқару жүйесіндегі сызықтық емес динамикалық буын түрінде ұсыну тұжырымдамасы маңызды үлес болып табылады. Қойылған міндеттерді шешуде эксперименттік зерттеулер, сондай-ақ MATLAB/Simulink көмегімен алынған нәтижелерді кейінгі өңдеу пайдаланылды. Эксперименттік зерттеулердің деректерін құрылымдық-параметрлік сәйкестендіру операторды көліктік кідіріспен екінші ретті динамикалық буын түрінде ұсыну мүмкіндігін көрсетті. Алынған модельді анықтау коэффициенті шамамен 85% құрайды. Оператордың ұсынылған математикалық моделін өндірістік механизмдерді басқарудың адам-машиналық жүйелерінің техникалық-экономикалық көрсеткіштерін анықтау үшін пайдалануға болады. Оператордың ұсынылған математикалық моделі жұмысты оңтайландыру және адам-машиналық басқару жүйелерінің құрылымын жақсарту үшін пайдалы негіз болып табылады.

Түйін сөздер: оператор, адам-машиналық басқару жүйесі, көліктің кешігуі, реакция, анықтау коэффициенті

D. Mrachkovskiy, O. Chorna, A. Chornyj, M. Baranovska, V. Tytiuk

Mathematical modeling of a human operator in ergatic control systems for industrial mechanisms

The paper is devoted to the study of human-operator influence on the operation of ergatic production systems in industry, since the influence of human-operator can have a significant impact on technical and economic performance. An important contribution is the concept of representing the operator in the form of a nonlinear dynamic link in the control system. Experimental studies and subsequent processing of the obtained results using MATLAB/Simulink were used in solving the set tasks. Structural and parametric identification of experimental data have shown the possibility of representing the operator in the form of a second-order dynamic link with transport delay. The coefficient of determination of the obtained model is about 85%. The proposed mathematical model of the operator can be used to determine the technical and economic indicators of human-machine control systems of production mechanisms. The proposed mathematical model of the operator is a useful basis for optimizing the operation and improving the structure of human-machine control systems.

Key words: operator, human-machine control system, transport delay, reaction, determination coefficient

Раздел 3. «Технические науки и технологии»

References

1. Korobiichuk I., Tokar A., Danik Y. Evaluation methods for the ergatic system reliability operator. Automation 2019: progress in automation, robotics and measurement techniques. 2020. Vol. 920. P. 560–570.
2. Tan Y., Feng D., Shen H. Research for Unmanned Aerial Vehicle components reliability evaluation model considering the influences of human factors. 3rd International Conference on Mechanical, Electronic and Information Technology Engineering. 2017. Vol. 139.
3. Haifeng Z. Fundamental Models for Missions of Engineered Systems. Systems Conference IEEE International. 2019. P. 1–6.
4. Che H., Zeng S., Guo J. Reliability assessment of man-machine systems subject to mutually dependent machine degradation and human errors. Reliability Engineering & System Safety. 2019. Vol. 190.
5. Kletz T., Amyotte P. Accidents said to be due to human error. What Went Wrong?. 2019. P. 53–172.
6. Strauch B. Investigating Human Error: Incidents, Accidents, and Complex Systems. Taylor & Francis Group. 2017. P. 309.
7. Suyatinov S.I., Buldakova T.I., Vishnevskaya Yu. A. Synergetic Model of Situational Awareness of a Human Operator in Ergatic Control Systems of Mobile Objects. Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2022. Vol. 23, № 6. P. 302-308.
8. Babaei K. M., Hall R. A. Study of Digging Productivity of an Electric Rope Shovel for Different Operators. Minerals. 2016. Vol. 6, № 2. P. 48.
9. Tyrva O., Saushev A., Shergina O. Automation Elements of Mental Activity and Actions of Human Operator in Ergatic System “Man-Machine”. 2018 International Russian Automation Conference. 2018. P. 1-5.
10. Tytiuk V., Khandakji K., Sivyakova G. Determining the parameters of the trajectory of the bucket of mining quarries excavators. E3S Web of Conferences. 2021. P. 280.
11. Tytiuk V., Chorny O., Mrachkovskiy D. Mathematical model of the closed-loop system of excavator bucket positioning. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2023. Vol. 1. P. 107-114.
12. Pan X., Wu Z. Performance shaping factors in the human error probability modification of human reliability analysis. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics. 2020. Vol. 26. P. 538–550.
13. Rejeki Y., Achiraeniwati E., Wanda A. Measurement of operator reliability level using the Human Error Assessment and Reduction Technique (HEART) method. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 830. P. 32-95.
14. Ahmad H., Faizal M., Mazleha M. Research reactor operator performance based on the human error assessment and reduction technique (HEART) in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Nuclear Science Technology and Engineering Conference. 2019. Vol. 785. P. 29–31.
15. Sinclair T. Model theory of operator systems and C*-algebras. Model Theory of Operator Algebras. 2023. P. 343-386.
16. Valoušek L., Jalovecky R., Use of the MATLAB System Identification Toolbox for the creation of specialized software for parameters identification. International Conference on Military Technologies. 2021. P. 1-5.