

УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

УДК 004.514:658.5

МЕТОД ОЦЕНКИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАТОРА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ГАЗОБЕТОННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Каминская Ж. К. – ассистент кафедры программных средств, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина.

Сердюк С. Н. – канд. техн. наук, доцент кафедры программных средств, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина.

Кулинич Э. М. – канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Рассмотрена проблема количественной оценки деятельности оператора автоматизированной системы управления технологическим процессом производства газобетона. Актуальность данной проблемы обуславливается необходимостью учета человеческого фактора при разработке систем данного типа. Объект исследования – эргономическое и инженерно-психологическое обеспечение деятельности оператора автоматизированной системы управления технологическим процессом газобетонного производства. Предмет исследования – модели, методы и средства повышения эффективности деятельности оператора газобетонного производства.

Цель работы – разработка метода, позволяющего провести эргономическую экспертизу деятельности оператора автоматизированной системы управления технологическим процессом на основе количественных показателей данной деятельности, полученных в результате имитационного моделирования, а также верификация метода на примере анализа деятельности оператора автоматизированной системы дозирования материалов для изготовления газобетона на ЗАО «Мотор Сич» (г. Запорожье, Украина).

Метод. Предложено решение рассматриваемой проблемы в виде построения имитационной модели процесса функционирования автоматизированной системы приготовления газобетона и взаимодействия оператора с анализируемым вариантом человеко-машинного интерфейса. Оценка деятельности оператора основывается на сравнительном анализе результатов эксперимента с введенной в модель батареей нормативных и предельных показателей, характеризующих деятельность оператора. В имитационной модели человеко-машинная система «оператор-автоматизированная система» представлена в виде системы массового обслуживания.

Результаты. Разработаны метод и программное обеспечение, позволяющие количественно оценить деятельность оператора автоматизированной системы управления технологическим процессом газобетонного производства.

Выводы. В работе предложен метод количественной оценки деятельности оператора газобетонного производства основанный на стохастической комбинированной модели. Разработанная модель, является дальнейшим развитием комбинированной модели, предложенной авторами ранее. В отличие от комбинированной модели, в стохастической комбинированной модели учтены случайные воздействия на систему «оператор-автоматизированная система» и формализованы действия оператора по устранению этих воздействий. Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность предложенного математического обеспечения и позволяют рекомендовать его для использования на практике при решении задач оценки способов управления технологическим процессом, различных вариантов прототипов человеко-машинного интерфейса с целью их оптимизации для достижения требуемых эффективности и качества деятельности оператора газобетонного производства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: имитационная модель, математическая модель, оператор, газобетон, человеко-машинный интерфейс, батарея показателей, коэффициент загрузки.

АББРЕВИАТУРЫ

АСУТП – автоматизированная система управления технологическим процессом;
АФО – алгоритма функционирования оператора;
ИКВ – известково-кремнеземисто вяжущий;
ИМ – имитационная модель;
ОСМ – обобщенный структурный метод;
ОЭ – обобщенная энтропия системы;
ОНЭ – обобщенная негэнтропия системы;
ПУ – пульт управления;
СКМ – стохастическая комбинированная модель;
ТП – технологический процесс;
ТФЕ – типовая функциональная единица;
ЧМИ – человеко-машинный интерфейс;
ЧМС – человеко-машинная система;
UI – интерфейс пользователя.

НОМЕНКЛАТУРА

$AV(N)$ – множество предельно допустимых значений показателей операторской деятельности;
 $base5$ – среднее время (около 150 мс), необходимое для идентификации пятибуквенного слова с \log_{10} частоты 1,0;
 e – основание натурального логарифма;
 $freq$ – значение \log_{10} частоты встречаемости слова;
 H – информационная энтропия системы;
 H_i – количество информации i -го вида;
 $H_{\text{апр}}$ – априорная энтропия системы;
 $H_{\text{доп}}$ – энтропия дополнительной информации, используемой оператором;
 $H_{\text{инф}}$ – энтропия системы, получаемая от источника сообщений;
 $H_{\text{пом}}$ – энтропия информации потерянной вследствие помех;
 i – возможные состояния системы;
 I – количество информации, получаемой оператором от источника сообщений;
 $I_{\text{по}}$ – количество информации, перерабатываемой оператором;
 $|K|$ – определитель корреляционной матрицы;
 K_{max} – максимальная длина очереди;
 $K_{\text{доп}}$ – среднее число сигналов в очереди;
 $length$ – длина слова;
 m – размерность нормального вектора X ;
 M – математическое ожидание;
 n – число шагов поиска (число фиксаций взгляда), затраченных для нахождения нужного объекта;
 N – множество нормативных количественных показателей операторской деятельности;
 n_i – i -й нормативный количественный показатель операторской деятельности;
 N' – множество количественных показателей операторской деятельности, полученных в результате проведения имитационного эксперимента;
 n'_i – i -й количественный показатель операторской деятельности, полученный в результате проведения имитационного эксперимента;
 $N_{\text{общ}}$ – общее количество поступивших сигналов;

$N_{\text{оч}}$ – количество сигналов, обработанных в условиях очереди на обслуживание;
 P_i – вероятность нахождения системы в i -м состоянии (появление сигнала i -го типа);
 SD – среднеквадратичное отклонение;
 t – время информационного поиска;
 T – общее время нахождения оператора на рабочем месте;
 t_{Fi} – время i -й фиксации взора;
 t_{Ri} – время считывания i -го слова (строки);
 t_{Si} – время i -го перемещения взора (саккады глаза);
 T_{bus} – время занятости оператора;
 $T_{\text{зан}}$ – максимальный период занятости оператора;
 $t_{\text{нраб}}$ – общее время, в течение которого оператор не занят обработкой информации;
 x – независимое случайное событие;
 X – многомерный нормальный вектор;
 z – коэффициентом загруженности оператора;
 v_i – скорость переработки информации i -го вида;
 α – латентный период реакции оператора на сигнал (около 0,2 с);
 Δ – определитель нормированной корреляционной матрицы;
 λ – интенсивность событий;
 π – константа 3,14;
 ρ_i – коэффициент очереди;
 σ – дисперсия компонентов системы;
 τ – время решения задач оператором.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность и качество работы операторов АСУТП во многом определяется степенью учета человеческого фактора при ЧМИ. Современные технологии проектирования компьютерных интерактивных систем описаны в соответствующих руководствах и стандартах, например [1, 2]. Одной из задач, которая решается на предпроектной стадии проектирования ЧМИ, является определение номенклатуры объектов контроля и управления ТП и управляющих функций системы управления в виде «человек-машина», с дальнейшим их перераспределением между человеком-оператором и автоматикой. Для этого последовательно применяют два метода: метод функционального анализа и распределения функций и метод анализа задач. Их недостатком является слишком общее, неформализованное описание предметной области. В результате, они не дают ответ на вопрос о том, как от функций перейти к задачам управления [3], что может привести к необоснованному перераспределению функций и, тем самым, к информационной перегрузке оператора АСУТП.

Актуальность разработки методов, позволяющих определить качество различных макетов ЧМИ на ранних этапах проектирования, обуславливается большими временными и материальными затратами при тестировании конечного варианта ЧМИ с участием реальных пользователей, а также организационными сложностями его проведения.

Для сокращения сроков разработки операторских интерфейсов современных АСУТП, проверки правильности распределения функций и оценки интерактивного взаимодействия оператора еще на начальных этапах их проектирования, когда существует лишь «бумажный» прототип интерфейса, может быть использовано имитационное моделирование деятельности оператора, с использованием моделей эмулирующих ТП [4].

Авторами предложена [5] комбинированная (аналитико-имитационная) модель процесса автоматизированного управления ТП приготовления газобетона, позволяющая формализовать как деятельность человека-оператора АСУТП, так и процессы приготовления смеси газобетона. Данная модель может быть использована в качестве эмулятора ТП приготовления газобетона. Недостатком комбинированной модели является то, что в ней, практически, отсутствует учет случайных воздействий на систему «оператор – АСУТП». В ней учтена только наиболее часто встречающаяся в ходе ТП неисправность – зависание материала в бункере сухих.

Объектом исследования является эргономическое и инженерно-психологическое обеспечение деятельности оператора АСУТП газобетонного производства.

Предметом исследования являются модели, методы и средства повышения эффективности деятельности оператора АСУТП газобетонного производства.

Целью данной работы является разработка метода, позволяющего провести эргономическую экспертизу деятельности оператора АСУТП на основе количественных показателей данной деятельности, полученных в результате имитационного моделирования, а также верификация метода на примере анализа деятельности оператора АСУТП дозирования материалов для изготовления газобетона на ЗАО «Мотор Сич» (г. Запорожье, Украина).

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

АСУТП дозирования материалов для изготовления газобетона на ЗАО «Мотор Сич» предназначена для выполнения операций дозирования и смешивания компонентов газобетонной смеси. В качестве орудия труда оператор АСУТП использует ЧМИ.

Авторами была разработана комбинированная модель [5], в которой все емкости расходных материалов считались неограниченными и не учитывались иные виды возможных неисправностей, кроме вышеупомянутой. Таким образом, можно говорить о разработке ИМ некоего «идеализированного» процесса функционирования АСУТП приготовления газобетонной смеси.

Для повышения адекватности комбинированной модели целесообразно ее дальнейшее развитие на основе исторических данных о неполадках, собранных в результате производственного эксперимента в АСУТП дозирования материалов для изготовления газобетона на ЗАО «Мотор Сич». Будем называть такую модель СКМ.

Разрабатываемый метод оценки деятельности оператора заключается в том, что на основе данных имитационных экспериментов, проводимых при помощи СКМ с различными вариантами ЧМИ, можно прогнозировать эффективность и качество процессов управления ТП и проводить эргономическую экспертизу деятельности оператора АСУТП. Данный метод можно использовать как для проверки реальных ЧМИ, так и ЧМИ, существующих в виде «бумажных» прототипов на ранних этапах проектирования АСУТП.

Для оценки деятельности оператора АСУТП возможно использовать номенклатуру предложенных показателей [6, 7]. Тогда, задачей проводимой экспертизы деятельности оператора АСУТП является проверка того, что

$$\forall n_i' \in AV(N).$$

Выполнение данного условия является доказательством того, что деятельность оператора соответствует эргономическим требованиям, а используемый оператором ЧМИ (или его «бумажный» прототип) сочетается с его психофизиологическими возможностями.

2 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Обзор известных моделей процесса дозирования сухих и жидких компонентов ТП приготовления газобетона, их недостатки и пути дальнейших исследований был проведен авторами в [5].

АСУТП дозирования материалов для изготовления газобетона является ЧМС. Научные основы исследования и проектирования деятельности человека в ЧМС изложены в работах отечественных [8–15] и зарубежных ученых [16]. Отмечается [11, 15], что существует большое количество моделей описания и количественной оценки процессов функционирования ЧМС, разработанных различными научными школами: регрессионные модели, марковские и полумарковские процессы, модели теории массового обслуживания, логические автоматы, формальные грамматики, сети Петри, граф-схемы и схемы алгоритмов Ляпунова, логико-лингвистические модели, сети GERT, PERT, функциональные и функционально-семантические сети, вероятностно-алгоритмические функциональные сети и нечетко-алгоритмические модели.

Одним из наиболее известных методов априорной оценки времени выполнения задач человеком с орудием труда в виде ЧМИ, является метод GOMS [16] и GOMS – семейство: KLM-GOMS [17], CMN-GOMS [18], NGOMSL [19] и CPM-GOMS [20]. Развитию этих методов посвящены более сотни исследовательских работ, например [21–23].

Однако, методы GOMS «неожиданно...не получили широкого распространения в качестве инструмента проектирования в UI сообществе» [22]. Причиной этого авторы считают большие трудозатраты на обучение проектировщиков и построение корректных моделей.

Сравнительный анализ применения моделей дискретных процессов функционирования в практике проектирования ЧМС проведенный в [13–15, 24], определил выбор авторов в пользу функционально-структурной теории и ОСМ А. И. Губинского [11], как наиболее универсальных. К недостаткам ОСМ следует отнести: применимость только для процессов без последствия и при отсутствии зависимых операций [5]; отсутствие моделей и методов оптимального проектирования ЧМС непосредственно на функциональных сетях, а также отсутствие статистических моделей, методов планирования и обработки результатов испытаний ЧМС [14].

Сравнительный анализ семейства моделей GOMS с методом ОСМ, показал следующее.

Общие достоинства: методы применяются на ранних стадиях проектирования ЧМИ, когда еще отсутствует конечный продукт; дают количественную оценку предполагаемого времени выполнения задачи пользователем, что позволяет проводить сравнение альтернативных вариантов; используют иерархию целей.

Общие недостатки: не учитывают квалификацию и особенности работы отдельных пользователей; не учитывают контекст использования (объем предъявляемой информации, ее релевантность и т.д.)

Недостатки семейства GOMS: ограниченный набор операторов модели, что может значительно снизить точность предсказания; зависимость модели от субъективных оценок специалиста; трудность описания параллельных процессов.

GOMS базируется на когнитивной архитектуре, которая часто содержит механизмы для ощущений, восприятия и действий. Хотя ОСМ не акцентирован на когнитивной деятельности, все операторы GOMS, могут быть представлены при помощи ТФЕ. Например, операторы GOMS К, Р, Н, М и другие, имеющие временную оценку, могут быть формализованы в виде ТФЕ «Рабочая операция» ОСМ. ТФЕ функционер «Альтернативная операция» является примером формализации более сложного элемента когнитивной деятельности человека в ОСМ.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Назначение и состав комплекса дозирочно-смесительного отделения ЗАО «Мотор Сич» был приведен авторами в предыдущей статье [5].

Особенностями операторской деятельности является то, что оператор находится на удалении от объектов контроля и управления и осуществляет свою деятельность опосредованно при помощи информационной модели. В данном случае, в качестве информационной модели оператора АСУТП дозирования материалов служит ЧМИ, состоящий из ПУ, с размещенными на нем средствами индикации, органами управления и набора экранных форм, отображаемых на операторной панели ОР 177В. Это свидетельствует о том, что в операторской деятельности преобладают

процессы его информационного взаимодействия с управляемой системой [25].

Разработка СКМ основана на рекомендациях [26] по улучшению надежности составления моделей управления ТП и оптимальности решений оператора, путем введения критериев ОЭ и ОНЭ (мера внутренней упорядоченности системы).

Рассматривая принимаемую оператором информацию как совокупность сведений, уменьшающих его неопределенность в выборе различных возможностей по управлению ТП, в качестве меры неопределенности используем понятие информационной энтропии H [27].

В теории информации для независимых случайных событий x с возможными состояниями $i = 1, 2, \dots, n$ информационная двоичная энтропия рассчитывается по формуле Шеннона:

$$H = -\sum_{i=1}^n P_i \log_2 P_i. \quad (1)$$

На изменение энтропии оказывает влияние взаимная зависимость элементов системы. Пусть оператор управляет системой, состояние которой определяется многомерным нормальным вектором X . В этом случае, информационная энтропия определяется по формуле [28]:

$$H = \log[(2\pi e)^m |K|]^{1/2}. \quad (2)$$

Для случая, когда все компоненты системы имеют одинаковые дисперсии σ , формула (2) примет вид:

$$H = \log[(2\pi e)^m \sigma^{2m} \Delta]^{1/2}. \quad (3)$$

С увеличением значений коэффициентов корреляции между компонентами величина энтропии уменьшается $H \rightarrow -\infty$.

Максимальная неопределенность (энтропия) в системе достигается при отсутствии взаимосвязи между компонентами:

$$H = \log[2\pi e \sigma^2]^{m/2}. \quad (4)$$

Количество получаемой оператором информации от источника сообщения (информационная модель, отображаемая ЧМИ) определяется по формуле:

$$I = H_{\text{анр}} - H_{\text{инф}}. \quad (5)$$

В процессе решения задач управления, оператор может также использовать дополнительную информацию (например, данные из своей памяти). Возможны также потери информации в процессе ее передачи по техническим каналам АСУТП или же самим оператором (например, вследствие своих ошибок или ограниченности возможностей анализаторов человека). Тогда, общее количество информации, перерабатываемое оператором, определяется по формуле [27]:

$$I_{\text{по}} = H_{\text{инф}} + H_{\text{доп}} - H_{\text{пом}}. \quad (6)$$

Количество перерабатываемой оператором информации необходимо для решения следующих эргономических задач [4]: определение степени сложности решаемой задачи; определение степени согласованности скорости поступления информации с пропускной способностью оператора (его психофизиологическими возможностями); определение времени обработки информации.

Время решения задач оператором пропорционально количеству перерабатываемой им информации. Оператор перерабатывает различные виды информации с разной скоростью [7]:

$$\tau = \alpha + \sum_{i=1}^k \frac{H_i}{v_i}. \quad (7)$$

Практически, оператор АСУТП газобетонного производства принимает информацию, закодированную алфавитами двух модальностей – зрительной и слуховой. Однако, применение только теории информации, при решении перечисленных выше эргономических задач, не позволяет учесть следующие особенности [7].

1. В процессе переработки поступающей закодированной информации, оператор использует свой внутренний алфавит, а его субъективные вероятности сигналов могут отличаться от объективных.

2. Объектом исследования теории информации являются стационарные процессы, в то время как характеристики оператора изменяются во времени.

3. Теория информации не учитывает семантику информации, которая может значительно повлиять на результаты деятельности оператора.

Указанные недостатки решаются в процессе построения СКМ, которая является аналитико-имитационной моделью. Поэтому в ней, по сравнению с аналитическими моделями [29], проще учесть: изменение состояний системы при случайных воздействиях; нелинейные характеристики элементов системы; дискретный и непрерывный характер элементов и др.

Для решения задач управления и контроля оператор осуществляет информационный поиск необходимых элементов информационной модели (мнемосхемы, экран ЧМИ). Общее время информационного поиска определяется по формуле:

$$t = \sum_{i=1}^n (t_{Fi} + t_{Si}). \quad (8)$$

На некоторых шагах своего алгоритма функционирования, оператор выполняет операции считывания текстовой информации, например на шагах 1, 16 [5]. В этом случае вместо времени i -й фиксации взора t_{Fi} в формулу (8) следует подставить значение времени считывания i -го слова (строки) t_{Ri} . Для его расчета воспользуемся результатами моделирования лексической идентификации с использованием стратегии смены внимания [30]. Среднее время лексической идентификации слова (чтения), с центральной фикса-

цией взора и \log_{10} частоты встречаемости слова рассчитывается по формуле:

$$t_{Ri} = base5 + 15(length - 5) + 40(1 - freq). \quad (9)$$

Расчет времени чтения t_{Ri} в формуле (9) был произведен исходя из следующих положений.

1. Оператор находится на расстоянии 60–70 см от операторной панели и меню экранной формы целиком находится в поле его зрения.

2. Длина каждой строки (меню или информационного сообщения) не более 20 символов, что не превышает области восприятия текста (функционального поля зрения) во время фиксации. Функциональное поле зрения ограничено 3–4 буквами слева от точки фиксации взгляда и 14–15 буквами справа от точки фиксации [31] или до 20 [30].

3. Взгляд фиксировался на центре слова.

4. Возможность рефиксации взгляда не учитывалась.

Стандартное отклонение SD для времени чтения t_{Ri} определяется по формуле [30]:

$$SD = 0,1 \times t_{Ri}. \quad (10)$$

Введем в модель батарею показателей [7, 12], характеризующих предельно допустимые нормы деятельности оператора АСУТП.

Информационная нагрузка оператора характеризуется коэффициентом загруженности

$$z = 1 - \frac{t_{\text{нраб}}}{T}. \quad (11)$$

Его предельное значение не должно быть более 0,75 [7, 12].

Ограничение непрерывной (без пауз) работы оператора, определяется показателем максимальный период занятости $T_{\text{зан}}$, который не должен превышать 15 минут [7].

Информационная нагрузка оператора характеризуется, также, таким показателем, как коэффициент очереди ρ , показывающим количество сигналов, обработанных оператором в условиях очереди на обслуживание:

$$\rho = \frac{N_{\text{оч.}}}{N_{\text{общ}}}. \quad (12)$$

Экспериментальным путем определено, что величина ρ не должна превышать 0,4 [7, 12]. Максимально допустимая длина очереди определяется объемом оперативной памяти человека и не должна превышать 5–9 сигналов. Однако рекомендуется [7, 12], чтобы среднее число сигналов в очереди $K_{\text{доп}}$, одновременно удерживаемых в памяти оператора, не превышало 3.

В СКМ, в дополнение к комплексной модели, введены АФО по устранению следующих видов неполадок в ТП или ошибок оператора: отсутствие материалов в бункерах суспензии, сухих материалов (ИКВ и цемента); перегрев электропривода шнека; попадание в шнек инородного тела; попадание на дозаторы посторонних предметов.

Приведем АФО для случая отсутствия материала (ИКВ) в одном из бункеров сухих, с указанием ТФЕ, моделирующих реальные операции, выполняемые оператором линии приготовления газобетонной смеси ЗАО «Мотор Сич» при помощи ПУ. В этом случае на нем должна мигать кнопка «Авария». Стартовый экран дозирования представлен на рис. 1.

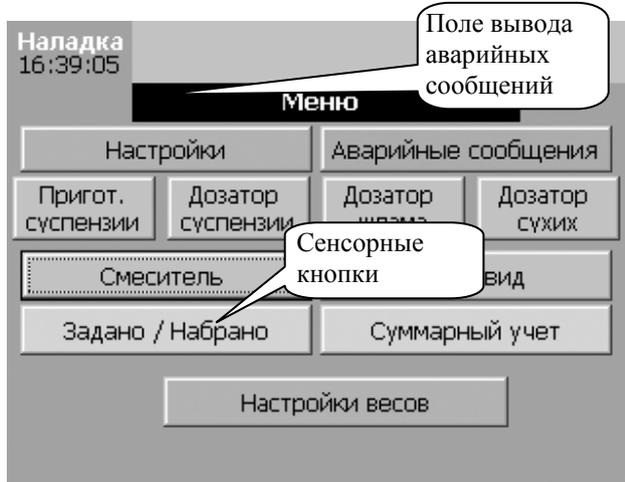


Рисунок 1 – Стартовый экран дозирования

Для устранения данной неисправности оператор и оборудование должны выполнить следующие операции.

- 1) Начало алгоритма (композиционер «Стартер»).
- 2) Проверка мигания кнопки «Авария» (контрольная операция K_1). В случае мигания, переход на п.3, иначе п. 33 «Конец».
- 3) Считывание сообщения об ошибке №13 «Ошибка набора веса дозатора сухих!» в поле аварийных сообщений-ошибок (рис. 1) (рабочая операция P_1).
- 4) Нажатие кнопки F14 на операторной панели, для возврата в основное меню (рабочая операция P_2).
- 5) Задержка на время открытия формы «Стартовый экран дозирования» (операция задержки Z_1).
- 6) Выбор дозатора сухих посредством нажатия соответствующей сенсорной кнопки (рабочая операция P_3).
- 7) Задержка на время открытия формы «Дозатор сухих» (операция задержки Z_2).
- 8) Считывание с фиксацией в памяти/бумаге показаний текущего веса компонентов (рабочая операция P_4).
- 9) Нажатие кнопки «ДЕБЛОКИРОВКА» на ПУ (рабочая операция P_5).
- 10) Нажатие кнопки «ПУСК» на ПУ для повтора набора компонентов (рабочая операция P_6).
- 11) Проверка работы (визуально по мнемосхеме формы «Дозатор сухих») в автоматическом режиме заслонок на выходе дозатора сухих, шнекового питателя или появления других ошибок в поле аварийных сообщений (контрольная операция K_2). Если заслонка

открылась, шнек сработал и нет других ошибок, то переход на п.31.

12) Проверка давления сжатого воздуха (контрольная операция K_3). Если оно в норме, то переход на п.13. Иначе позвонить в компрессорную, дождаться пока давление не увеличится (операция задержки Z_3), переход на п.9.

13) Переключить тумблер установки режима управления на ПУ в положение «РУЧНОЙ» (рабочая операция P_7).

14) Открыть заслонку на выгрузку посредством нажатия кнопки F6 на операторной панели (рабочая операция P_8).

15) Задержка на время открытия заслонки (операция задержки Z_4).

16) Если заслонка открылась, то переход на п.18, иначе нажать кнопку F8 на операторной панели (рабочая операция P_9) для закрытия заслонки.

17) Вызов механиков для осмотра/ремонта механизма (операция задержки Z_5). После устранения поломки перейти на п.14.

18) Включение привода шнека посредством нажатия и удерживания кнопки F2 на операторной панели (рабочая операция P_{10}).

19) Проверка работы шнека (визуально по мнемосхеме формы «Дозатор сухих») (контрольная операция K_4). Если шнек работает перейти на п.20, иначе нажать кнопки F4 (рабочая операция P_{11}) и F8 (рабочая операция P_{12}) на операторной панели, для остановки шнека и закрытия заслонок соответственно, перейти к п.17.

20) Считывание показаний текущего веса компонентов (операция задержки Z_6). Если вес не растет, то п. 21, иначе п. 27.

21) Включение пневмообрушителей нажатием сенсорной кнопки «Обрушение» на экранной форме «Дозатор сухих» (рабочая операция P_{13}).

22) Считывание показаний текущего веса компонентов (операция задержки Z_7). Если вес не растет, то п. 23, иначе п. 27.

23) Нажатие кнопок F4 (рабочая операция P_{14}) и F8 (рабочая операция P_{15}) на операторной панели для остановки шнека и закрытия заслонок.

24) Звонок обслуживающему персоналу для визуальной проверки наличия материала в бункере. Ожидание ответа (операция задержки Z_8). Если материала нет, то п.26.

25) Ликвидация обслуживающим персоналом зависания материала в бункере сухих механическим способом (операция задержки Z_9), переход на п.14.

26) Заполнение обслуживающим персоналом бункера материалом (операция задержки Z_{10}). После подтверждения наличия материала переход на п.14.

27) Нажатие кнопок F4 (рабочая операция P_{16}) и F8 (рабочая операция P_{17}) на операторной панели для остановки шнека и закрытия заслонок.

28) Переключить тумблер установки режима управления на ПУ в положение «АВТОМАТ» (рабочая операция P_{18}).

29) Нажатие кнопки «ДЕБЛОКИРОВКА» на ПУ для сброса аварийного сообщения (рабочая операция P_{19}).

30) Нажатие кнопки «ПУСК» на ПУ для повтора набора компонентов (рабочая операция P_{20}).

31) Проверка динамики изменения веса компонента в дозаторе по показаниям в соответствующем поле мнемосхемы формы «Дозатор сухих» (операция задержки Z_{11}). Если вес изменяется удовлетворительным темпом, то п. 33 «Конец».

32) Нажатие кнопки «ПЕРЕРЫВАНИЕ» на ПУ (рабочая операция P_{21}) и переход на п.12.

33) Конец (композиционер «Финишер»).

Суть ОСМ и пример его применения для формализации АФО были представлены авторами при разработке комплексной модели, поэтому в данной статье ОСМ не рассматривался.

Таким образом, получена СКМ, формализующая процессы дозирования и смешивания, а также деятельность оператора АСУТП приготовления смеси газобетона с учетом вероятностных событий.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Имитационное моделирование деятельности оператора линии приготовления газобетонной смеси ЗАО «Мотор Сич» проводилось с использованием авторского инструментария. Необходимая информация об инструментарии, способе моделирования и линии приготовления газобетонной смеси была представлена в [5]. Исходными данными для моделирования послужили исторические данные об ошибках и неисправностях в АСУТП дозирования материалов для изготовления газобетона на ЗАО «Мотор Сич» за 2018 год, полученные из архивов и буферов аварийных сообщений.

В ИМ введены следующие, встречающиеся в ходе ТП неисправности: перегрев электропривода шнека (поступает в модель в соответствии с распределением Пуассона со средней интенсивностью $\lambda = 3,47 \times 10^{-5}$ событий/с); попадание в шнек инородного тела (распределение Пуассона, $\lambda = 2,31 \times 10^{-5}$ событий/с); попадание на дозаторы посторонних предметов (распределение Пуассона, $\lambda = 3,5 \times 10^{-6}$ событий/с); события «Отсутствие материала в бункере» суспензии, ИКВ и сухих материалов происходят с вероятностями 0,03.

Время саккады глаза $t_{si} = 0,15$ с. Величины, соответствующие задержкам Z_1, Z_2, Z_4 были даны в [5]. Время задержек Z_3, Z_5, Z_{10} , распределено по нормальному закону с M и SD соответственно: 900 с и 300 с; 4920 с и 4020 с; 1200 с и 60 с. Время задержек Z_6-Z_9, Z_{11} распределено равномерно с M и SD соответственно: 10 ± 2 с; 15 ± 5 с; 240 ± 60 с; 105 ± 75 с и 15 ± 5 с.

В случае, если действия оператора при перегреве электропривода шнека или попадания в шнек инородного тела не дали положительного результата (вероят-

ность этого события 0,02), он обязан вызвать электрика для их ликвидации. Время вызова электрика и ликвидации неполадок распределено равномерно и составляет 90 ± 30 с, 540 ± 60 с и 1200 ± 600 с соответственно.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Статистические данные, полученные в результате имитационного моделирования ТП при двухсменной работе в течение 30 рабочих дней для рецепта №6, приведены на рис. 2. Графики изменения коэффициента загруженности оператора и средней длины очереди (для варианта диаметра входной заслонки дозатора сухих 150 мм) в течение 30 рабочих дней, приведены на рис. 3 и рис. 4 соответственно. В табл. 1 представлены итоговые статистических данные, полученные при моделировании ТП линии приготовления газобетонной смеси ЗАО «Мотор Сич» (диаметр входной заслонки дозатора сухих 150 мм) при помощи двух моделей – комбинированной модели, не учитывающей поток неисправностей в АСУТП [5] и СКМ, представленной в данной статье. Оптимальные или предельно допустимые значения, характеризующие деятельность оператора, приведены в скобках (табл. 1).

Statistics for the work of operators during the month:

Operator rate of employment $Z = 0.10$.
Coefficient of queue $p = 0.15$.

Operator's busy time $T_{bus} = 2881.94$ min.
Maximum uninterrupted operator's busy time $T_{umax} = 5.39$ min.
Max queue length $K_{max} = 4$.
The average queue length $K_{sr} = 0.95$.

Total time in queue = 1800.63 min.
Number of queue entries = 456.00 .
Average waiting time in queue = 3.95 min.

Average processing time of information by the operator = 0.03 min.

Рисунок 2 – Фрагмент результатов моделирования

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Авторами было доказано [5], что применение входной заслонки дозатора сухих диаметром 150 мм для линии приготовления газобетонной смеси ЗАО «Мотор Сич» является оптимальным. Поэтому, эксперименты с СКМ проводились для рецептов газобетонной смеси №1, №6 и №9 только с заслонкой этого диаметра.

Как следует из данных табл. 1, учет неисправностей привел к ожидаемому увеличению показателей, характеризующих величину информационной нагрузки оператора. Наиболее возрос такой показатель, как коэффициент очереди сигналов на обработку оператором ρ . В соответствии с рис. 2 были получены следующие усредненные показатели за 30 рабочих дней: коэффициент загруженности оператора $z = 0,1$; коэффициент очереди на обработку оператором $\rho = 0,15$; время занятости оператора $T_{bus} = 2881,94$ минут; максимальный период занятости оператора $T_{зан} = 5,39$

минут; максимальная длина очереди $K_{\max} = 4$ сигнала; средняя длина очереди $K_{\text{доп}} = 0,95$ сигнала; общее время нахождения сигналов в очереди 1800,63 минуты; количество входов в очередь сигналов 456; среднее время ожидания в очереди 3,95 минуты; среднее время обработки сигнала оператором 0,03 минуты.

Таким образом, только один показатель – максимальная длина очереди K_{\max} , превысил рекомендуемое, оптимальное для оператора, значение в 3 сигнала. Однако, это значение не превышает максимальное допустимое значение очереди из 5–9 сигналов.

С учетом того, что установившийся процесс работы в моделируемой системе наступил, начиная с 3–4-

го дней, исходя из данных рис. 3, можно отметить, что максимальная загруженность оператора составила $z = 0,15$ в 29-й день моделирования (рецепт № 6), что не превышает допустимого. Как следует из данных рис.4, изменение средней длины очереди сигналов, ждущих обработки оператором, в целом, пропорционально загруженности оператора.

Результаты проведенной выше экспертизы свидетельствуют об отсутствии информационных перегрузок оператора при работе с данным вариантом ЧМИ АСУТП газобетонного производства ЗАО «Мотор Сич».

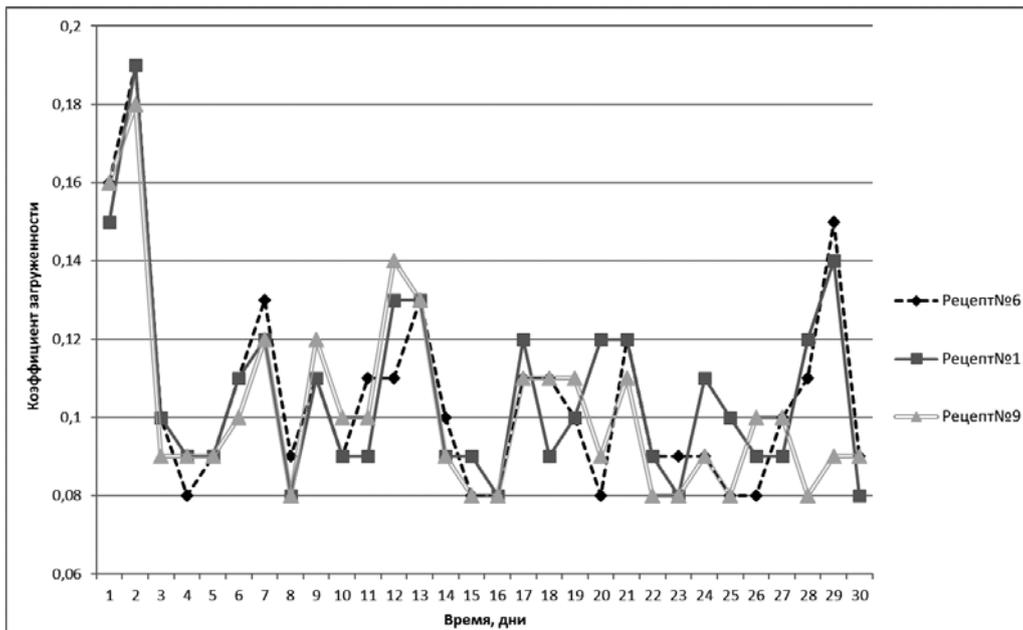


Рисунок 3 – График изменения коэффициента загрузки оператора

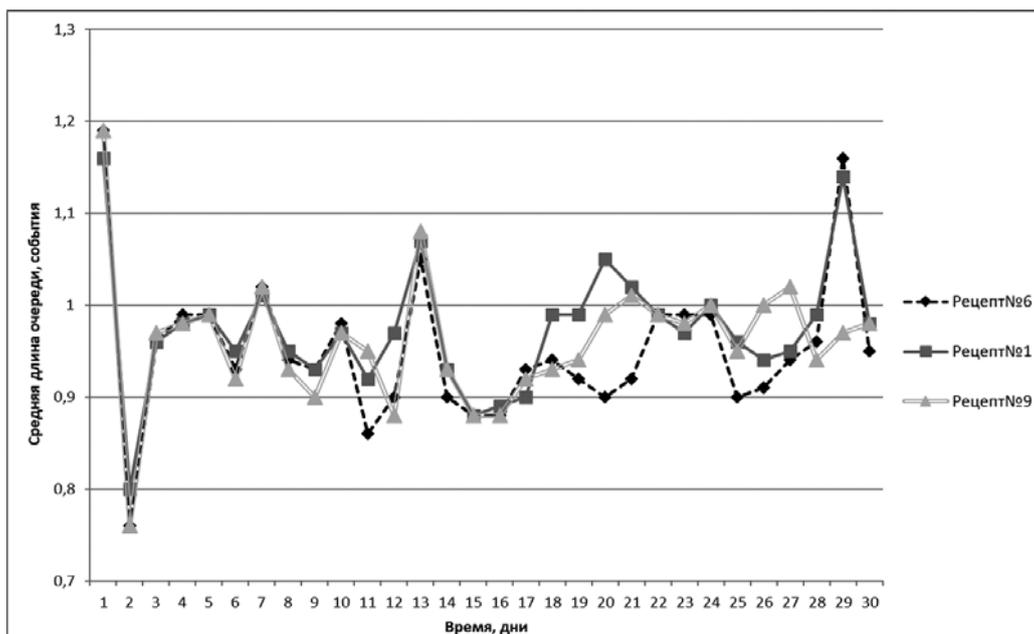


Рисунок 4 – График изменения средней длины очереди

Таблица 1 – Показатели, характеризующие технологический процесс и деятельность оператора АСУТП

Показатель	Без учета неисправностей			С учетом неисправностей			Оптимальное (предельное) значение
	Рецепт №1	Рецепт №6	Рецепт №9	Рецепт №1	Рецепт №6	Рецепт №9	
Коэффициент загрузки	0,08	0,08	0,08	0,1	0,1	0,1	(0,75)
Максимальный период занятости, мин	1,31	2,33	2,03	5,32	5,39	5,13	(15 ÷ 20)
Средняя длина очереди	0,46	0,43	0,25	0,97	0,95	0,96	2 ÷ 3
Максимальная длина очереди	2	2	2	4	4	4	(5 ÷ 9)
Коэффициент очереди	0,01	0,01	0,01	0,15	0,14	0,14	0,4
Период цикла ТП, с	656	780	752	751	924	829	Директивное время 1020

К недостаткам СКМ можно отнести трудоемкость процессов сбора и обработки данных, с целью определения вероятностных характеристик появления событий в АСУТП, необходимость получения части исходных данных из заполняемого вручную эксплуатационного журнала, а также извлечение из обслуживающего персонала экспертных знаний об аварийных ситуациях и опыте их разрешения за длительный период эксплуатации, что требует введения более развитых механизмов их фиксации, формализации, сбора и хранения.

ВЫВОДЫ

В работе решена актуальная задача по разработке метода количественной оценки деятельности оператора АСУТП газобетонного производства. Метод основан на разработанной в данной работе СКМ, которая является дальнейшим развитием комбинированной модели процесса автоматизированного управления ТП приготовления газобетона [5]. Учет в СКМ случайных воздействий на систему «оператор – АСУТП» повысил адекватность имитационной модели и достоверность полученных результатов моделирования.

Научной новизной работы, является предложенная СКМ, которая в отличие от комбинированной модели процесса автоматизированного управления технологическим процессом приготовления газобетона, позволяет формализовать деятельность человека-оператора АСУТП в условиях случайных воздействий на систему «оператор – АСУТП», что повышает адекватность имитационной модели и достоверность полученных результатов моделирования.

Практическая ценность работы заключается в том, что разработанный метод и программное обеспечение могут быть использованы на ранних этапах проектирования АСУТП, для оценки способов управления ТП, различных вариантов прототипов ЧМИ с целью их оптимизации для достижения требуемых эффективности и качества деятельности оператора.

Перспективы дальнейших исследований состоят в развитии предложенного математического обеспечения, с целью применения в интеллектуальных тренажерах для подготовки операторов газобетонного производства или производств со сходными физическими процессами (дискретно-непрерывное производство).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность руководству НПО «ЭТНА» (г. Запорожье) за предоставленные результаты производственного эксперимента линии приготовления газобетонной смеси ЗАО «Мотор Сич».

ЛИТЕРАТУРА / LITERATURE

- Burns C. M. Ecological interface design / C. M. Burns, J. R. Haidukiewicz. – Boca Raton : CRC Press, 2004. – 344 p.
- Ergonomics of human-system interaction. Part 210. Human-centred design for interactive systems: ISO 9241-210:2010 [Effective from 2010-03-15]. – Geneva: ISO, 2010. – 32 p.
- Анохин А. Н. Методы предпроектного анализа при создании операторского интерфейса / А. Н. Анохин, В. С. Малишевский // Труды II Международной научно-практической конференции «Человеческий фактор в сложных технических системах и средах» (Санкт-Петербург, Россия, 6–9 июля 2016). – СПб.: Межрегиональная эргономическая ассоциация, ФГАОУ ДПО «ПЭИПК», Северная звезда, 2016. – С. 357–363.
- Сердюк С. М. Ергономічні питання проектування людино-машинних систем : навч. посібник / С. М. Сердюк. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2013. – 319 с. ISBN 978-617-529-093-4
- Моделирование и анализ процессов функционирования автоматизированной системы управления технологическим процессом производства газобетона / [Ж. К. Каминская, Э. М. Кулинич, С. Н. Сердюк] // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2018. – № 4. – С. 214–225. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-4-21
- Душков Б. А. Основы инженерной психологии : учебник для студентов вузов / Б. А. Душков, А. В. Королев, Б. А. Смирнов. – М. : Академический проект, 2002. – 576 с.
- Смирнов Б. А. Инженерная психология. Практические занятия / Б. А. Смирнов. – К. : Вища школа, 1979. – 192 с.
- Венда В. Ф. Инженерная психология и синтез систем отображения информации / В. Ф. Венда. – М. : Машиностроение, 1982. – 344 с.
- Зинченко В. П. Эргономика. Ориентированное на человека проектирование / В. П. Зинченко, В. М. Мунипов. – М. : Тривола, 1995. – 480 с.
- Крылов А. А. Человек в автоматизированных системах управления / А. А. Крылов. – Л. : ЛГУ, 1972. – 192 с.
- Информационно-управляющие человеко-машинные системы: исследование, проектирование, испытание. Справочник / А. Н. Адаменко, А. Т. Ашероф, И. Л. Бердников и др. ; под общ. ред. А. И. Губинского. – М. : Машиностроение, 1993. – 528 с.
- Справочник по инженерной психологии / Под ред. Б. Ф. Ломова. – М. : Машиностроение, 1982. – 368 с.

13. Петухов И. В. Система поддержки принятия решений при оценке профпригодности оператора эргатических систем (на примере транспортно-технологических машин): автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.01 / И. В. Петухов. – Уфа, 2013. – 35 с.
14. Цой Е. Б. Вероятностное моделирование по группированным данным при исследовании и проектировании человеко-машинных систем: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. 05.13.01 / Е. Б. Цой. – Новосибирск, 1997. – 49 с.
15. Гриф М. Г. Автоматизация проектирования процессов функционирования человеко-машинных систем по вероятностным и нечетким показателям: дис. ... д-ра техн. наук. 05.13.17 / М. Г. Гриф. – Новосибирск, 2002. – 270 с.
16. Card S. K. The Psychology of Human-Computer Interaction / S. K. Card, A. Newell, T. P. Moran. – Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Mahwah, NJ, USA. 1983. – 469 p. ISBN:0898592437
17. Card S. K. The keystroke-level model for user performance time with interactive systems / S. K. Card, T. P. Moran, A. Newell // Communications ACM. – 1980. – Vol. 23, Issue 7 (July). – P. 396–410. DOI: 10.1145/358886.358895
18. Lerch F. J. Skilled financial planning: the cost of translating ideas into action / F. J. Lerch, M. M. Mantei, J. R. Olson // Human Factors in Computing Systems: SIGCHI Conference, New York, March 1989 : proceedings. – New York: ACM, 1989. – P. 121–126. DOI: 10.1145/358886.358895
19. Kieras D. E. A Guide to GOMS model usability evaluation using NGOMSL / D. E. Kieras // The Handbook of Human-Computer Interaction. 2nd ed. – 1997. – Ch. 7, Ch. 31. Elsevier Science B. V. – P. 135–157, 733–767. DOI: 10.1016/B978-0-444-81862-1.X5065-1
20. Gray W. D. Project Ernestine: A validation of GOMS for prediction and explanation of real-world task performance / W. D. Gray, B. E. John, M. E. Atwood // Human-Computer Interaction. – 1993. – Vol. 8, Issue 3. – P. 237–309. DOI: 10.1207/s15327051hci08_03_3
21. John B. E. The GOMS Family of User Interface Analysis Techniques: Comparison and Contrast / B. E. John, D. E. Kieras // ACM Transactions on Computer-Human Interaction. – 1996. – Vol. 3, Issue 4, Dec. – P. 320–351. DOI: 10.1145/235833.236054
22. Predictive Human Performance Modeling Made Easy / [B. E. John, K. Prevas, D. D. Salvucci, K. Koedinger] // Human Factors in Computing Systems: SIGCHI Conference, New York, 24-29 April 1989: proceedings. – New York : ACM, 1989. – P. 121–126. DOI: 10.1207/s15327051hci0803_3.
23. Keystroke-level model for advanced mobile phone interaction / [P. Holleis, F. Otto, H. Hussmann, A. Schmidt] // Human Factors in Computing Systems: SIGCHI Conference, San Jose, April 28. – May 03, 2007: proceedings. – New York: ACM, 2007. – P. 1505–1514. DOI: 10.1145/1240624.1240851
24. Барченко Н. Л. Ергономічне забезпечення діалогової людино-машинної взаємодії в модульних системах електронного навчання: автореф. дис. ... канд. техн. наук. 05.01.04 / Н. Л. Барченко. – Харків, 2019. – 25 с.
25. Психология труда: учебник и практикум для академического бакалавриата / А. В. Карпов [и др.]; под ред. А. В. Карпова. – М. : Издательство Юрайт, 2016. – 364 с. ISBN 978-5-9916-5320-6
26. Прангишвили И. В. Энтропийные и другие системные закономерности: Вопросы управления сложными системами / И. В. Прангишвили. – М. : Наука, 2003. – 428 с.
27. Душков Б. А. Психология труда, профессиональной информационной и организационной деятельности : словарь / Б. А. Душков, Б. А. Смирнов, А. В. Королев ; под ред. Б. А. Душкова. – М. : Академический Проект: Фонд «Мир», 2005. – 848 с.
28. Энтропийные методы в теории самоорганизационных процессов / Е. С. Переверзев // Техническая механика. – 2010. – № 3. – С. 81–90
29. Советов Б. Я. Моделирование систем / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. – М. : Высш. шк., 2001. – 343 с.
30. Reilly R. Eye movement control in reading: A simulation of some word-targeting strategies / R. Reilly, J. K. O'Regan // Vision Research. – 1998. – № 38. – P. 303–317.
31. Rayner K. Integrating information across eye movements / K. Rayner, G. W. McConkie, D. Zola // Cognitive Psychology. – 1980. – № 12. – P. 206–226.

Статья поступила в редакцию 06.02.2019.
После доработки 25.03.2019.

УДК 004.514:658.5

МЕТОД ОЦІНКИ ДІЯЛЬНОСТІ ОПЕРАТОРА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ГАЗОБЕТОННОГО ВИРОБНИЦТВА

Камінська Ж. К. – асистент кафедри програмних засобів, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна.

Сердюк С. М. – канд. техн. наук, доцент кафедри програмних засобів, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна.

Кулинич Е. М. – канд. техн. наук, доцент кафедри електроприводу і автоматизації промислових установок, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Розглянуто проблему кількісної оцінки діяльності оператора автоматизованої системи управління технологічним процесом виробництва газобетону. Актуальність даної проблеми обумовлюється необхідністю врахування людського фактора при розробці систем даного типу. Об'єкт дослідження – ергономічне та інженерно-психологічне забезпечення діяльності оператора автоматизованої системи управління технологічним процесом газобетонного виробництва. Предмет дослідження – моделі, методи і засоби підвищення ефективності діяльності оператора газобетонного виробництва.

Мета роботи – розробка методу, який дозволяє провести ергономічну експертизу діяльності оператора автоматизованої системи управління технологічним процесом на основі кількісних показників даної діяльності, отриманих в результаті імі-

таційного моделювання, а також верифікація методу на прикладі аналізу діяльності оператора автоматизованої системи дозування матеріалів для виготовлення газобетону на ЗАТ «Мотор Січ» (Запоріжжя, Україна).

Метод. Запропоновано рішення розглянутої проблеми у вигляді побудови імітаційної моделі процесу функціонування автоматизованої системи приготування газобетону і взаємодії оператора з варіантом людино-машинного інтерфейсу, що аналізується. Оцінка діяльності оператора ґрунтується на порівняльному аналізі результатів експерименту з введеною в модель батареєю нормативних та граничних показників, що характеризують діяльність оператора. В імітаційній моделі людино-машинна система «оператор-автоматизована система» представлена у вигляді системи масового обслуговування.

Результати. Розроблено метод і програмне забезпечення, що дозволяють кількісно оцінити діяльність оператора автоматизованої системи управління технологічним процесом газобетонного виробництва.

Висновки. В роботі запропоновано метод кількісної оцінки діяльності оператора газобетонного виробництва заснований на стохастичній комбінованій моделі. Модель, що розроблялася, є подальшим розвитком комбінованої моделі, запропонованої авторами раніше. На відміну від комбінованої моделі, в стохастичній комбінованій моделі враховані випадкові впливи на систему «оператор-автоматизована система» та формалізовані дії оператора щодо усунення цих впливів. Проведені експерименти підтвердили працездатність запропонованого математичного забезпечення і дозволяють рекомендувати його для використання на практиці при вирішенні завдань оцінки способів управління технологічним процесом та різних варіантів прототипів людино-машинного інтерфейсу з метою їх оптимізації для досягнення необхідних ефективності та якості діяльності оператора газобетонного виробництва.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: імітаційна модель, математична модель, оператор, газобетон, людино-машинний інтерфейс, батарея показників, коефіцієнт завантаженості.

UDC 004.514:658.5

THE METHOD OF OPERATOR'S ACTIVITY ESTIMATION FOR THE AUTOMATED CONTROL SYSTEM IN AERATED CONCRETE PRODUCTION

Kaminska Zh. K. – Assistant of the Software Tools Department, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine.

Serdiuk S. N. – PhD, Associate Professor, Software Tools Department, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine.

Kulynych E. M. – PhD, Associate Professor, Electric Drive and Commercial Plant Automation Department, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The problem of quantitative estimation of the Automated Control System operator's activity for aerated concrete production is considered. The relevance of the problem is determined by the need to take into account the human factor in the development of systems of this type. The research object is the ergonomic and psychological-engineering support in the activity of Automated Control System operator for aerated concrete production. Models, methods and means for increasing the efficiency of the operator's activity are the research subject for a type of the manufacturing considered.

Objective. The method of conducting an ergonomic examination of the Automated Control System operator's activity based on quantitative indicators of this activity was proposed as a solution. The quantitative indicators were obtained as the results of a simulation. The method verification took place by the example of the analysis of Automated Control System operator's activity in dosing materials for manufacturing aerated concrete at JSC "Motor Sich" (Zaporizhzhia, Ukraine).

Method. The solution offered includes the imitation model of Automated Control System operating process for the aerated concrete preparation and operator's interaction with the analyzed human-machine interface version. The estimation of the operator's activity is based on a comparative analysis of the results of an experiment with a battery of regulating and marginal indicators introduced into the model as for characterizing the operator's activities. The "operator-Automated Control System" human-machine system incorporated into the imitation model is presented as a queuing system.

Results. The research resulted in software to realize the offered method of quantitative estimation of the Automated Control System operator's activity for aerated concrete production.

Conclusions. The research proposes the method of quantitative estimation of operator's activity for aerated concrete production based on a stochastic combined model. Offered model is a further development of the combined model proposed by the authors earlier. Unlike the combined model, the stochastic combined model takes into account random effects in the "operator-Automated Control System" system and the operator's activity formalization to eliminate such impacts. The conducted experiments have proved the operability of the software offered; such software can be recommended to be used while justifying the control methods, different human-machine interface prototypes variants to keep them optimized on criteria of the required efficiency and quality concerning the operator's activity for aerated concrete production.

KEYWORDS: imitation model, mathematical model, operator, aerated concrete, human-machine interface, battery of indicators, load factor.

REFERENCES

1. Burns C. M., Haidukiewicz J. R. Ecological interface design. Boca Raton, CRC Press, 2004, 344 p.
2. Ergonomics of human-system interaction. Part 210. Human-centred design for interactive systems: ISO 9241-210:2010 [Effective from 2010-03-15]. Geneva, ISO, 2010, 32 p.
3. Anohin A. N., Malishevskiy V. S. Metody predproektного analiza pri sozdanii operatorskogo interfeysa, Trudy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Chelovecheskiy faktor v slozhnykh tehnikeskikh sistemah i sredakh» (Sankt-Peterburg, Rossiya, 6–9 iyulya 2016). SPb,

- Mezhregionalnaya ergonomicheskaya assotsiatsiya, FGAOU DPO «PEIPK», Severnaya zvezda, 2016, pp. 357–363.
4. Serdiuk S. M. Erhonomichni pytannya proektuvannya lyudyno-mashynnykh system, Navchalnyy posibnyk. Zaporizhzhya, ZNTU, 2013, 319 p. ISBN 978-617-529-093-4 (In Ukrainian)
 5. Kaminska Zh. K., Kulynych E. M., Serdiuk S. N., Modelirovanie i analiz protsessov funktsionirovaniya avtomatizirovannoy sistemyi upravleniya tehnologicheskim protsessom proizvodstva gazobetona, Radio Electronics, Computer Science, Control, 2018, No. 4, pp. 214–225. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-4-21
 6. Dushkov B. A., Korolev A. V., Smirnov B. A. Osnovy inzhenernoy psikhologii. Uchebnik dlya studentov vuzov. Moscow, Akademicheskii proekt, 2002, 576 p.
 7. Smirnov B. A. Inzhenernaya psikhologiya. Prakticheskie zanyatiya. Kyev, Vischa shkola, 1979, 192 p.
 8. Venda V. F. Inzhenernaya psikhologiya i sintez sistem otobrazheniya informatsii. Moscow, Mashinostroenie, 1982, 344 p.
 9. Zinchenko V. P., Munipov V. M. Ergonomika. Orientirovannoe na cheloveka proektirovanie. Moscow, Trivola, 1995, 480 p.
 10. Kryilov A. A. Chelovek v avtomatizirovannykh sistemakh upravleniya. Leningrad, LGU, 1972, 192 p.
 11. Adamenko A. N., Asherov A. T., Berdnikov I. L. i dr. ; pod obsch. red. A. I. Gubinskogo. Informatsionno-upravlyayushchie cheloveko-mashinnyie sistemyi: issledovanie, proektirovanie, ispytanie. Spravochnik. Moscow, Mashinostroenie, 1993, 528 p.
 12. Spravochnik po inzhenernoy psikhologii. Pod red. B. F. Lomova. Moscow, Mashinostroenie, 1982, 368 p.
 13. Petuhov I. V. Sistema podderzhki prinyatiya resheniy pri otsenke profprigodnosti operatora ergaticheskikh sistem (na primere transportno-tehnologicheskikh mashin): avtoref. dis. ... d-ra tehn. nauk: 05.13.01. Ufa, 2013, 35 p.
 14. Tsoy E. B. Veroyatnostnoe modelirovanie po gruppированным данным pri issledovanii i proektirovanii cheloveko-mashinnykh sistem: avtoref. dis. ... d-ra tehn. nauk. 05.13.01. Novosibirsk, 1997, 49 p.
 15. Grif M. G. Avtomatizatsiya proektirovaniya protsessov funktsionirovaniya cheloveko-mashinnykh sistem po veroyatnostnyim i nechetkim pokazatelyam: dis. ... d-ra tehn. nauk. 05.13.17. Novosibirsk, 2002, 270 p.
 16. Card S. K., Newell A. and Moran T. P. The Psychology of Human-Computer Interaction. Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Mahwah, NJ, USA. 1983, 469 p. ISBN: 0898592437
 17. Card S. K., Moran T. P., Newell A. The keystroke-level model for user performance time with interactive systems *Communications ACM*, 1980, Vol. 23, Issue 7 (July), pp. 396–410. DOI: 10.1145/358886.358895
 18. Lerch F. J., Mantei M. M., Olson J. R. Skilled financial planning: the cost of translating ideas into action, *Human Factors in Computing Systems: SIGCHI Conference, New York, March 1989: proceedings*. New York: ACM, 1989, pp. 121–126. DOI: 10.1145/358886.358895
 19. Kieras, D. E. A Guide to GOMS model usability evaluation using NGOMSL, *The Handbook of Human-Computer Interaction. 2nd ed., 1997, Ch. 7, Ch. 31. Elsiver Science B. V.*, pp. 135–157, 733–767. DOI: 10.1016/B978-0-444-81862-1.X5065-1
 20. Gray W. D., John B. E., Atwood M. E. Project Ernestine: A validation of GOMS for prediction and explanation of real-world task performance, *Human-Computer Interaction*, 1993, Vol. 8, Issue 3, pp. 237–309. DOI: 10.1207/s15327051hci08_03_3.
 21. John B. E., Kieras D. E. The GOMS Family of User Interface Analysis Techniques: Comparison and Contrast, *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 1996, Vol. 3, Issue 4, Dec., pp. 320–351. DOI: 10.1145/235833.236054
 22. John B. E., Prevas K., Salvucci D. D., Koedinger K. Predictive Human Performance Modeling Made Easy *Human Factors in Computing Systems: SIGCHI Conference, New York, 24–29 April 1989: proceedings*. New York, ACM, 1989, pp. 121–126. DOI: 10.1207/s15327051hci0803_3.
 23. Holleis P., Otto F., Hussmann H., Schmidt A. Keystroke-level model for advanced mobile phone interaction, *Human Factors in Computing Systems: SIGCHI Conference, San Jose, April 28 – May 03, 2007: proceedings*. New York: ACM, 2007, pp. 1505–1514. DOI: 10.1145/1240624.1240851
 24. Barchenko N. L. Ergonomichne zabezpechennya dialogovoyi lyudino-mashinnoyi vzaemodiyi v modulnih sistemakh elektronnoho navchannya: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk. 05.01.04. Harkiv, 2019, 25 p. (In Ukrainian)
 25. Karpov A. V. i dr.; pod red. A. V. Karpova. Psikhologiya truda: uchebnik i praktikum dlya akademicheskogo bakalavriata. Moscow, Izdatelstvo Yurayt, 2016, 364 p. ISBN 978-5-9916-5320-6
 26. Prangishvili I. V. Entropiynnye i drugie sistemnyie zakonomernosti: Voprosyi upravleniya slozhnyimi sistemami. Moscow, Nauka, 2003, 428 p.
 27. Dushkov B. A., Smirnov B. A., Korolev A. V. Psikhologiya truda, professionalnoy informatsionnoy i organizatsionnoy deyatelnosti: Slovar. Pod red. B. A. Dushkova. Moscow, Akademicheskii Proekt: Fond «Mir», 2005, 848 p.
 28. Pereverzev E. S. Entropiynnye metodyi v teorii samoorganizatsionnykh protsessov, *Tekhnicheskaya mehanika*, 2010, No. 3, pp. 81–90
 29. Sovetov B. Ya., Yakovlev S. A. Modelirovanie sistem. Moscow, Vyssh. shk., 2001, 343 p.
 30. Reilly R., O'Regan J. K. Eye movement control in reading: A simulation of some word-targeting strategies, *Vision Research*, 1998, No. 38, pp. 303–317
 31. Rayner K., McConkie G. W., Zola D. Integrating information across eye movements, *Cognitive Psychology*, 1980, No. 12, pp. 206–226.