

Петербургский экономический журнал. 2025. № 1. С. 18–27

St Petersburg Economic Journal. 2025, no. 1, pp. 18–27

Научная статья

УДК 658.5

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ХРОНОМЕТРАЖА ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ «ОПЕРАТОР-ОБОРУДОВАНИЕ-ПРОЦЕСС»

DYNAMIC MODEL OF AUTOMATED TIMEKEEPING OF THE «OPERATOR-EQUIPMENT-PROCESS» PRODUCTION SYSTEM

А. В. Винниченко

аспирант, старший преподаватель кафедры инноватики и интегрированных систем качества, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП), Санкт-Петербург, Россия, alex23rain@gmail.com

A. V. Vinnichenko

Post-Graduate Student, Senior Lecturer, Department of Innovation and Integrated Quality Systems, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (GUAP), Saint Petersburg, Russia, alex23rain@gmail.com

Аннотация. В статье предложена динамическая модель автоматизированного хронометража (ДМАХ) для производственной системы «оператор-оборудование-процесс», основанная на множественной линейной регрессии. Модель учитывает влияние физиологических (X), эргономических (Y), технологических (Z) факторов, а также уровня качества (Q) и достоверности (R) действий оператора. Коэффициенты регрессии (β_i) определяются методом наименьших квадратов, минимизируя среднеквадратическую ошибку между прогнозируемой и фактической скоростью выполнения операций. Для автоматизации предложен алгоритм, интегрирующий методы компьютерного зрения и анализа больших данных. Алгоритм обеспечивает непрерывный мониторинг с использованием высокоскоростной оптической системы, включающей цифровой видеорегистратор. Обработка видеопотока основана на детектировании и распознавании образов, что позволяет автоматически сегментировать операции и сопоставлять их с предъявляемыми нормами и требованиями. Встроенный блок хронометража отслеживает время выполнения операций в реальном времени, выявляя отклонения и корректируя расчеты. Результаты визуализируются в виде интерактивных графиков, обеспечивая оперативный анализ и принятие решений для повышения производительности и качества продукции. ДМАХ минимизирует влияние внешних факторов и обеспечивает повышение эффективности работы производственной системы.

Ключевые слова: динамическая модель хронометража, автоматизация хронометража, уровень качества и степень достоверности действий оператора, производственная система «оператор-оборудование-процесс», компьютерное зрение

Abstract. The article proposes a dynamic model of automated timekeeping (DMAT) for the operator-equipment-process production system based on multiple linear regression. The model considers the influence of physiological (X), ergonomic (Y), technological (Z) factors, as well as the level of quality (Q) and reliability (R) of the operator's actions. Regression coefficients (β_i) are determined by the least squares method, minimizing the standard deviation between the predicted and actual speed of operations. For automation, an algorithm is proposed that integrates computer vision and big data analysis methods. The algorithm provides continuous monitoring using a high-speed optical system that includes a digital video recorder. Video stream processing is based on image detection and

© Винниченко А. В., 2025

recognition, which allows you to automatically segment operations and compare them with applicable standards and requirements. The built-in timekeeping unit monitors the execution time of operations in real time, detecting deviations and correcting calculations. The results are visualized in the form of interactive graphs, providing operational analysis and decision-making to improve productivity and product quality. DMAX minimizes the influence of external factors and ensures an increase in the efficiency of the production system.

Keywords: dynamic timekeeping model, timekeeping automation, quality level and degree of reliability of the operator's actions, production system "operator-equipment-process", computer vision

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The author declares no conflicts of interest.

Источник финансирования. Статья подготовлена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № FSRF-2023-0003, «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

Source of finance. The article was prepared with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Agreement No. FSRF-2023-0003, «Fundamental principles for building interference-proof systems for space and satellite communications, relative navigation, technical vision and aerospace monitoring».

Введение, цель

В контексте организации производства проблема автоматизированного хронометража производственных систем приобретает особую значимость. Хронометраж как инструмент анализа временных затрат на выполнение операций является ключевым элементом оптимизации производственных процессов, обеспечения качества продукции и повышения эффективности использования ресурсов. В последние десятилетия были предложены различные подходы к решению данной проблемы, однако многие аспекты остаются недостаточно изученными, что требует дальнейших исследований.

В работе [1] предложен метод автоматического хронометража, основанный на применении датчиков движения и алгоритмов машинного обучения. Авторы разработали систему «Исследование времени на основе компьютерного зрения», которая фиксирует временные параметры выполнения операций с высокой точностью, используя данные с носимых устройств и камер. В процессе апробации выявлено, что данный метод требует значительных вычислительных ресурсов и не всегда учитывает динамические изменения в производственной системе, такие как вариабельность технологических процессов или адаптацию оператора к изменяющимся условиям.

В исследовании [2] разработана модель хронометража, комплексно учитывающая эргономические и физиологические особенности операторов. Авторы подчеркивают, что учет таких факторов, как утомляемость, мотивация и когнитивные способности, позволяет более точно прогнозировать временные затраты на выполнение операций. Однако данная модель ограничена статичностью и не учитывает динамику взаимодействия оператора с оборудованием и технологическим процессом.

В работе [3] проведен анализ влияния динамики производственного процесса на хронометраж. Авторы предлагают методы адаптивного управления, позволяющие корректировать временные параметры в реальном времени. Несмотря на прогрессивность подхода, исследование не охватывает комплексное взаимодействие всех элементов системы «оператор-оборудование-процесс», что ограничивает его применимость в условиях многокритериальной оптимизации.

Несмотря на имеющиеся исследования, существует ряд нерешенных вопросов в области хронометража производственных систем. Современные модели часто не учитывают изменчивость производственных условий, таких как колебания качества сырья, износ оборудования или вариабельность действий оператора. Это

приводит к неточностям при прогнозировании временных параметров, и следствием подобного несовершенства является снижение эффективности производственных процессов [4].

Большинство существующих решений не способны оперативно адаптироваться к изменениям в производственной системе, что особенно актуально в условиях высокой изменчивости технологических процессов и необходимости минимизации времени простоя [5].

Современные модели хронометража редко учитывают требования стандартизации и управления качеством продукции, что ограничивает их применимость в условиях жестких нормативных требований [6].

Таким образом, необходимо разработать модель, учитывающую динамику взаимодействия оператора, оборудования и технологического процесса. Такая модель должна быть основана на методах системного анализа и теории управления [7; 8; 13]. Использование алгоритмов машинного обучения позволит повысить точность хронометража и обеспечить адаптацию к изменяющимся условиям [9]. Разработка моделей, интегрирующих требования стандартизации и управления качеством, даст возможность повысить их применимость в реальных производственных условиях [6].

Разработка системы автоматизированного хронометража, способной оперативно реагировать на изменения в производственной системе, является ключевым направлением для повышения эффективности производственных процессов [10; 14; 15].

Методы исследования

Большинство существующих решений не обладают достаточной гибкостью для оперативной адаптации к изменениям в производственной системе. Это особенно важно в условиях высокой изменчивости технологических процессов и необходимости минимизации времени простоя.

В процессе разработки динамической модели автоматизированного хронометража было применено уравнение множественной линейной регрессии. Данная модель учитывает влияние физиологических, эргономических, технологических и качественных факторов на скорость выполнения операций. Кроме того, в модель интегрированы требования стандартов ISO 9001 [11], что обеспечивает ее соответ-

ствие международным стандартам организации производственных процессов.

Разработанный алгоритм автоматизированного расчета идентификаторов исследуемых факторов реализуется с использованием методов машинного обучения, позволяя учитывать сложные взаимосвязи между факторами и повышая точность прогнозирования временных параметров.

Динамическая модель автоматизированного хронометража реализована на основе алгоритмов машинного обучения и нейронных сетей, что позволяет учитывать нелинейные зависимости и адаптировать модель к изменяющимся условиям, обеспечивая высокую точность и адаптивность временных параметров в процессе работы модели.

Результаты и дискуссия

Для решения данной проблемы разработана динамическая модель автоматизированного хронометража, учитывающая уровень качества и степень достоверности действий оператора. В качестве показателей качества и достоверности используются факторы и их индикаторы (X, Y, Z, Q, R) (таблица) [12].

ДМАХ основана на множественной линейной регрессии, которая позволяет установить зависимость скорости выполнения операций (V) от факторов X, Y, Z, Q, R :

$$V = \beta_0 + \beta_1 * X_1 + \beta_2 * X_2 + \dots + \beta_5 * X_5 + \beta_6 * Y_1 + \dots + \beta_{10} * Y_5 + \beta_{11} * Z_1 + \dots + \beta_{14} * Z_4 + \beta_{15} * Q + \beta_{16} * R + \varepsilon, \quad (1)$$

где X_i – физиологические и психологические факторы, такие как физическая сила, реакция, память, внимание, мотивация; Y_i – характеристики оборудования и рабочего места, такие как эргономичность, удобство, техническое состояние; Z_i – параметры технологического процесса, такие как сложность операции, объем выпуска, длительность цикла; Q_i – уровень качества действий оператора; R_i – степень достоверности действий оператора; β_i – коэффициенты регрессии, определяемые методом наименьших квадратов; ε – случайная ошибка.

Коэффициенты регрессии в уравнении (1) отражают влияние каждого фактора на производительность оператора. Определение коэффициентов регрессии методом наименьших квадратов позволяет минимизировать средне-

Группы исследуемых факторов

Groups of factors studied

Обозначение	Наименование фактора	Индикатор	Наименование индикаторов	Значение индикатора
Психологические и физиологические факторы (X_n)				
X_1	Уровень стресса	$X_{1,1}$	Высокий	$X_{1,1} = 0,25$
		$X_{1,2}$	Присутствует	$X_{1,2} = 0,5$
		$X_{1,3}$	Отсутствует	$X_{1,3} = 1,0$
X_2	Физическая усталость	$X_{2,1}$	Высокая	$X_{2,1} = 0,25$
		$X_{2,2}$	Присутствует	$X_{2,2} = 0,5$
		$X_{2,3}$	Отсутствует	$X_{2,3} = 1,0$
X_3	Опыт работы	$X_{3,1}$	Отсутствует	$X_{3,1} = 0,25$
		$X_{3,2}$	Присутствует	$X_{3,2} = 0,5$
		$X_{3,3}$	Высокий	$X_{3,3} = 1,0$
X_4	Эмоциональное состояние	$X_{4,1}$	Нестабильное	$X_{4,1} = 0,25$
		$X_{4,2}$	Нормальное	$X_{4,2} = 0,5$
		$X_{4,3}$	Стабильное	$X_{4,3} = 1,0$
X_5	Уровень мотивации	$X_{5,1}$	Отсутствует	$X_{5,1} = 0,25$
		$X_{5,2}$	Присутствует	$X_{5,2} = 0,5$
		$X_{5,3}$	Высокий	$X_{5,3} = 1,0$
Характеристики оборудования и рабочего места (Y_n)				
Y_1	Эффективность станка	$Y_{1,1}$	Отсутствует	$Y_{1,1} = 0,25$
		$Y_{1,2}$	Присутствует	$Y_{1,2} = 0,5$
		$Y_{1,3}$	Высокая	$Y_{1,3} = 1,0$
Y_2	Уровень эргономики рабочего места	$Y_{2,1}$	Отсутствует	$Y_{2,1} = 0,25$
		$Y_{2,2}$	Присутствует	$Y_{2,2} = 0,5$
		$Y_{2,3}$	Высокая	$Y_{2,3} = 1,0$
Y_3	Наличие вспомогательных средств	$Y_{3,1}$	Высокое	$Y_{3,1} = 0,25$
		$Y_{3,2}$	Присутствует	$Y_{3,2} = 0,5$
		$Y_{3,3}$	Отсутствует	$Y_{3,3} = 1,0$
Y_4	Техническое состояние оборудования	$Y_{4,1}$	Отсутствует	$Y_{4,1} = 0,25$
		$Y_{4,2}$	Присутствует	$Y_{4,2} = 0,5$
		$Y_{4,3}$	Высокое	$Y_{4,3} = 1,0$
Y_5	Автоматизация процессов	$Y_{5,1}$	Отсутствует	$Y_{5,1} = 0,25$
		$Y_{5,2}$	Частичная	$Y_{5,2} = 0,5$
		$Y_{5,3}$	Высокая	$Y_{5,3} = 1,0$
Параметры технологического процесса (Z_n)				
Z_1	Сложность операции	$Z_{1,1}$	Сложная	$Z_{1,1} = 0,25$
		$Z_{1,2}$	Стандартная	$Z_{1,2} = 0,5$
		$Z_{1,3}$	Легкая	$Z_{1,3} = 1,0$
Z_2	Время на операцию	$Z_{2,1}$	Большое	$Z_{2,1} = 0,25$
		$Z_{2,2}$	Стандартное	$Z_{2,2} = 0,5$
		$Z_{2,3}$	Малое	$Z_{2,3} = 1,0$
Z_3	Наличие четкой инструкции	$Z_{3,1}$	Отсутствует	$Z_{3,1} = 0,25$
		$Z_{3,2}$	Частично присутствует	$Z_{3,2} = 0,5$
		$Z_{3,3}$	Присутствует	$Z_{3,3} = 1,0$

Окончание таблицы

End of table

Обозначение	Наименование фактора	Индикатор	Наименование индикаторов	Значение индикатора
Z ₄	Влияние внешних условий	Z _{4,1}	Высокое	Z _{4,1} = 0,25
		Z _{4,2}	Присутствует	Z _{4,2} = 0,5
		Z _{4,3}	Отсутствует	Z _{4,3} = 1,0
Уровень качества действий оператора (Q _n)				
Q ₁	Действия оператора	Q _{1,1}	Неправильное	Q _{1,1} = 0,25
		Q _{1,2}	Приемлемое	Q _{1,2} = 0,5
		Q _{1,3}	Правильное	Q _{1,3} = 1,0
Степень достоверности действий оператора (R _n)				
R ₁	Достоверность действий оператора	R _{1,1}	Недостоверное	R _{1,1} = 0,25
		R _{1,2}	Стабильное	R _{1,2} = 0,5
		R _{1,3}	Достоверное	R _{1,3} = 1,0

Источник: составлено автором.

Source: Compiled by the author.

квадратическую ошибку между прогнозируемой и фактической скоростью выполнения операций.

Формулируя модель для оценки скорости выполнения операций (V) оператора можно представить через выражение (2):

$$V = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_6 Y_1 + \beta_7 Y_2 + \beta_8 Y_3 + \beta_9 Y_4 + \beta_{10} Y_5 + \beta_{11} Z_1 + \beta_{12} Z_2 + \beta_{13} Z_3 + \beta_{14} Z_4 + \beta_{15} Q_1 + \beta_{16} R_1 + \varepsilon. \quad (2)$$

С помощью метода наименьших квадратов проводится регрессионный анализ для обрабатываемых данных, в процессе вычислений получаем значения коэффициентов β_i , подставляем полученные значения коэффициентов в уравнение (2), так на основе полученной модели можно проанализировать, как каждый из факторов влияет на производительность оператора.

Для последующей автоматизации, основанной на предложенной математической модели (1), необходимо упростить расчет индикаторов исследуемых параметров (рис. 1). Данный алгоритм реализует автоматизированный контроль качества производственного процесса, функционирует на основе итеративной процедуры оценки входных параметров исследуемых факторов (X_n, Y_n, Z_n, Q_n, R_n), представляющих собой наборы индикаторов ($X_{nm}, Y_{nm}, Z_{nm}, Q_{nm}, R_{nm}$), характеризующих состояние производственной системы «оператор-оборудование-процесс» (ПС ООП).

На каждом этапе оценки исследуемого фактора через итеративный цикл (J) проводится статистический анализ индикаторов. В рамках этого анализа применяется метод пороговых значений, где каждому индикатору сопоставляется набор пороговых значений, определяющих классификацию его состояния как «отличное», «нормальное» или «неудовлетворительное». Данная классификация выполняется с применением методов математического моделирования для определения оптимальных пороговых значений, обеспечивающих адекватность оценки состояния системы.

После классификации индикаторов алгоритм осуществляет обработку данных с помощью системы принятия решений, обращаясь к базе данных рекомендаций. Данная база содержит набор рекомендаций по корректировке работы ПС ООП, сопоставленных с различными комбинациями состояний индикаторов. В результате проведенного анализа ДМАХ под полученные данные подбирает наиболее подходящий набор рекомендаций, обеспечивающий минимизацию отклонений от заданных параметров.

После этого разрабатывается алгоритм ДМАХ (рис. 2) интегрирующий методы компьютерного зрения и анализа больших данных. Он позволяет осуществлять сбор и обработку данных с использованием высокоскоростной оптической системы, включающей в себя специализированный цифровой видеорегиистратор с камерой, ориентированной на рабочую зону

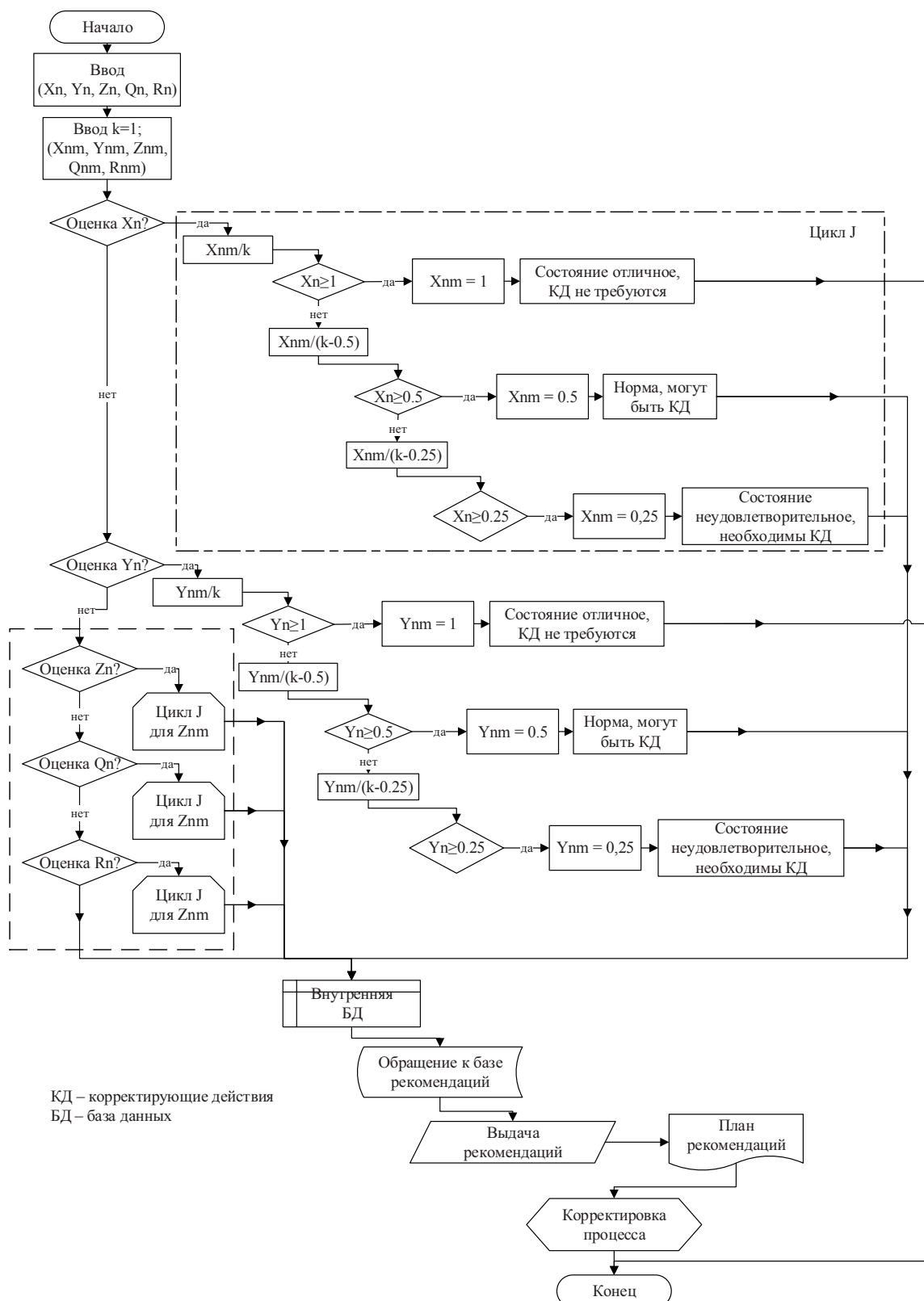


Рис. 1. Фрагмент алгоритма расчета исследуемых факторов и их индикаторов
Fig. 1. Fragment of the algorithm for calculating the studied factors and their indicators

Источник: составлено автором.
Source: Compiled by the author.

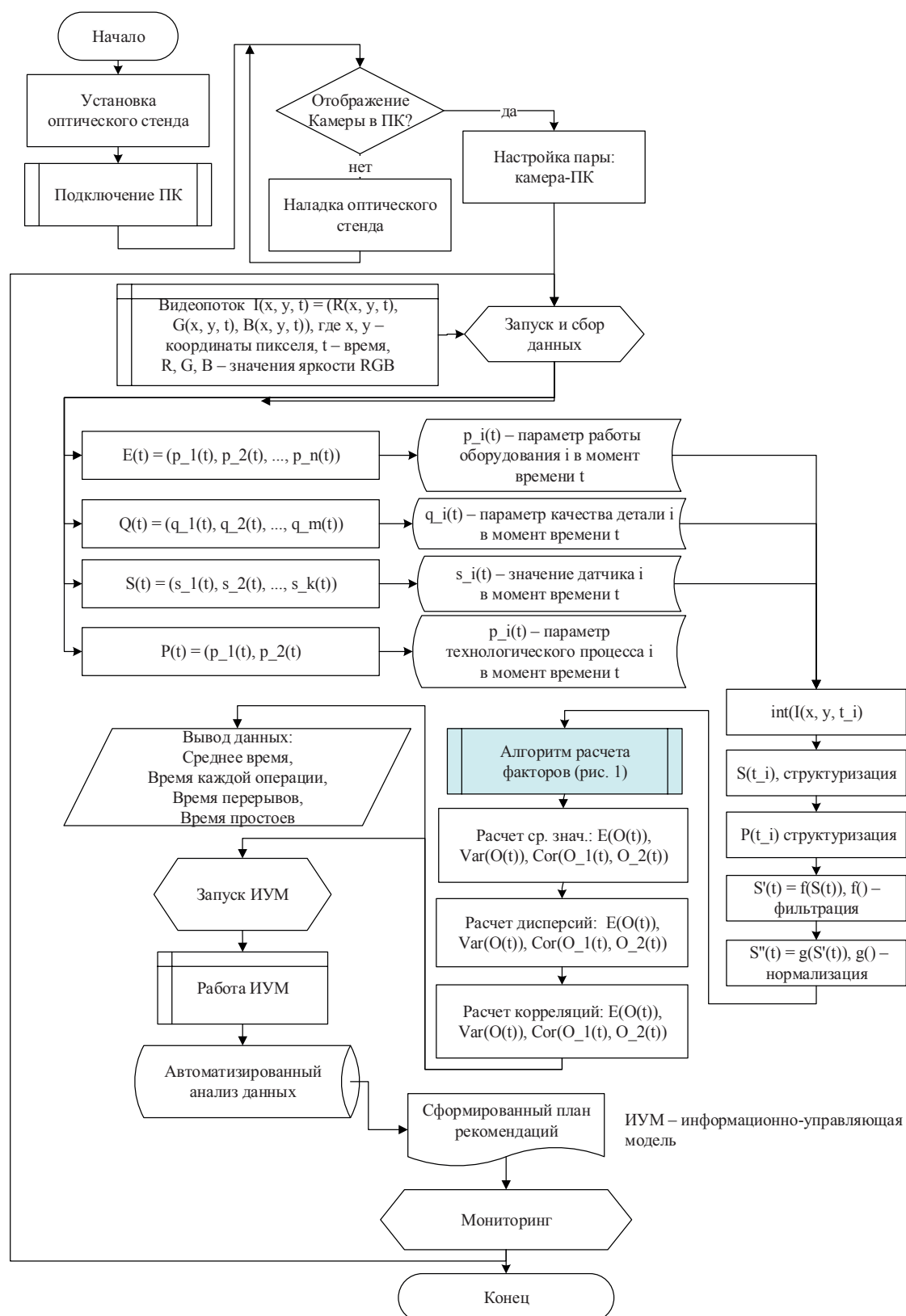


Рис. 2. Фрагмент укрупненного алгоритма работы автоматизированного хронометража

Fig. 2. Fragment of the integrated algorithm of automated timekeeping

Источник: составлено автором.
Source: Compiled by the author.

производственной системы «оператор-оборудование-процесс», минимизируя влияние внешних факторов на качество изображения. Данное решение обеспечивает непрерывный мониторинг действий оператора и состояния оборудования в ПС. Обработка видеопотока осуществляется с применением алгоритмов компьютерного зрения, включающих детектирование и распознавание образов и движений оператора, а также автоматическую сегментацию производственных операций по изначально заданным параметрам. Полученные данные о временных параметрах выполнения операций автоматически сопоставляются с заранее заданными стандартами времени, зафиксированными в нормативно-технической документации и базе данных технологических процессов. Блок данных автоматического хронометража, встроенный в ДМАХ, позволяет отслеживать время выполнения различных этапов производственного процесса в режиме реального времени, выявляя отклонения от плановых показателей, и включает корректирующие коэффициенты, влияющие на расчет реального времени выполнения операции. Полученные результаты визуализируются в виде интерактивных графиков и отчетов, что дает возможность оперативно анализировать динамику производственного процесса и принимать оптимальные управленческие решения с целью повышения производительности труда и качества продукции в соответствии с требованиями стандартизации и управления качеством.

Разработанный алгоритм автоматизированного хронометража, основанный на интеграции статистических методов и технологий компьютерного зрения, представляет собой инновационный инструмент для повышения эффективности ДМАХ ПС. Реализация данного подхода обеспечивает сбор, обработку и анализ данных в режиме реального времени, что позволяет оперативно адаптировать производственные процессы к изменяющимся внешним и внутренним условиям, минимизируя временные задержки и оптимизируя ресурсное планирование.

Предложенная динамическая модель автоматизированного хронометража демонстрирует значительный потенциал для повышения точности и достоверности хронометражных измерений за счет учета множества факторов, включая психофизиологическое состояние оператора, его квалификацию и условия труда. Внедрение данной модели позволяет сократить временные потери при выполнении технологических операций в ПС ООП на 5–10 %, что способствует повышению общей производительности оператора и оптимизации производственной системы в целом.

Заключение

Математическая модель, разработанная в рамках исследования, обеспечивает комплексную оценку влияния различных факторов на производительность оператора в системе «оператор-оборудование-процесс». Уравнение (1), предложенное по результатам исследования, позволяет не только установить зависимость скорости выполнения операций (V) от различных факторов в ПС ООП, но и идентифицировать узкие места производственного процесса в режиме реального времени, что открывает возможности для оперативной корректировки и оптимизации технологических операций, способствуя повышению качества выпускаемой продукции и общей эффективности производственной системы.

Таким образом, предложенная динамическая модель автоматизированного хронометража является эффективным инструментом для анализа, прогнозирования и оптимизации производственных процессов. Она позволяет не только оценивать текущую производительность оператора, но и прогнозировать ее изменения в зависимости от модификации условий труда, технологических параметров и уровня квалификации персонала. Внедрение данной модели в производственные системы ООП способствует достижению значительного экономического эффекта за счет повышения точности планирования, снижения временных затрат и улучшения качества выпускаемой продукции.

Список источников

1. Ji J., Pannakkong W., Buddhakulsomsiri J. A Computer Vision-Nased Model for Automatic Motion Time Study // *Computers, Materials & Continua*. 2022. № 73 (2). P. 3557–3574.

2. Горячкин Б. С. Эргономический анализ систем обработки информации и управления // Наукovedenie (интернет-журн.). 2017. Т. 9, № 3.
3. Куликов Г. Г., Речкалов А. В., Артюхов А. В. Методология системного моделирования адаптивного управления машиностроительным производством // Вестн. ЮУрГУ. Сер. Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2020. Т. 20, № 4. С. 115–125.
4. Фролов И. Э., Тресорук А. А. К вопросу о прогнозировании высокотехнологичных производств в современных условиях: теоретико-методологические аспекты // Науч. тр.: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. 2022. Т. 20. С. 7–40.
5. Комиссарова М. А., Погорелова Л. А. Цифровизация документооборота как основа инноватизации управления производственными системами // Вестн. Сиб. ин-та бизнеса и информационных технологий. 2024. Т. 13, № 1. С. 92–97.
6. Крылов К. И. Информационное обеспечение стандартизации в управлении качеством продукции: дис. ... канд. экон. наук / СПбГЭУ. Санкт-Петербург, 2023. 137 с.
7. Мальков М. В., Олейник А. Г., Федоров А. М. Моделирование технологических процессов: методы и опыт // Тр. Кольского науч. центра РАН. 2010. № 3. С. 93–101.
8. Трофимова М. С., Трофимов С. М. Обзор методов и методик системного анализа применительно к управлению качеством предприятия // Вестн. ПНИПУ. Электро-техника, информационные технологии, системы управления. 2015. № 14. С. 74–96.
9. Runtime prediction of big data jobs: performance comparison of machine learning algorithms and analytical models / N. Ahmed et al. // J. of Big Data. 2022. Vol. 9, № 1. P. 67.
10. Болин Ю. Автоматизация технологических процессов: перспективы, вызовы и пути повышения производственной эффективности // Universum: технические науки. 2024. Т. 2, № 11 (128). С. 11–13.
11. ГОСТ Р ИСО 9001–2015. Системы менеджмента качества. Требования. М.: Стандартиформ, 2020. 32 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200124394> (дата обращения: 10.01.2025).
12. Назаренко Н. А. Методика оценки уровня эргономичности автоматизированных систем управления производством // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2019. № 10. С. 39–46.
13. Интеграция систем менеджмента качества и бережливого производства – залог системности развития стратегических задач РФ / К. Г. Озеров, С. Н. Кузьмина, В. В. Силаева, К. В. Мачульская // Качество и жизнь. 2024. № 1-2 (41-42). С. 4–8.
14. Артамонова О. С., Князева Е. А., Чурилов Г. Г. Эффективные практики визуального менеджмента в управлении качеством производства электрооборудования // Петерб. экон. журн. 2024. № 1. С. 7–15.
15. Четыркина Н. Ю., Медведева М. В. Методологические аспекты процедуры оценки эффективности систем менеджмента качества: требования, принципы и ограничения // Петерб. экон. журн. 2024. № 2. С. 26–35.

Информация об авторе

Винниченко Александра Валерьевна – аспирант кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения (адрес: 190000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А), ORCID: 0000-0002-3317-4723, SPIN-код: 2578-2770.

Статья поступила в редакцию 23.12.2024, принята к публикации после рецензирования 29.01.2025, опубликована онлайн 31.03.2025.

References

1. Ji J., Pannakkong W., Buddhakulsomsiri J. A Computer Vision-Based Model for Automatic Motion Time Study. *Computers, Materials & Continua*. 2022, no. 73 (2), pp. 3557–3574.
2. Goryachkin B. S. Ergonomic analysis of information processing and control systems. *Internet journal Naukovedenie*. 2017, vol. 9, no. 3.

3. Kulikov G. G., Rechkalov A. V., Artyukhov A. V. Methodology of system modeling of adaptive control of mechanical engineering production. Bulletin of SUSU. Ser. Computer Technologies, Management, Radio Electronics. 2020, vol. 20, no. 4, pp. 115–125.
4. Frolov I. E., Tresoruk A. A. On the Issue of Forecasting High-Tech Production in Modern Conditions: Theoretical and Methodological Aspects. Scientific Works: Institute of Economic Forecasting of the Russian Academy of Sciences. 2022, vol. 20, pp. 7–40.
5. Komissarova M. A., Pogorelova L. A. Digitalization of Document Management as a Basis for Innovatization of Production Systems Management. Bulletin of the Siberian Institute of Business and Information Technology. 2024, vol. 13, no. 1, pp. 92–97.
6. Krylov K. I. Information support for standardization in Product Quality Management: dis. ... candidate of economic sciences / Saint Petersburg State University of Economics. Saint Petersburg, 2023. 137 p.
7. Malkov M. V., Oleinik A. G., Fedorov A. M. Modeling of technological processes: methods and experience. Transactions of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2010, no. 3, pp. 93–101.
8. Trofimova M. S., Trofimov S. M. Review of methods and techniques of system analysis applied to enterprise quality management. Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technology, control systems. 2015, no. 14, pp. 74–96.
9. Ahmed N. et al. Runtime prediction of big data jobs: performance comparison of machine learning algorithms and analytical models. Journal of Big Data. 2022, vol. 9, no. 1.
10. Bolin Yu. Automation of technological processes: prospects, challenges and ways to improve production efficiency. Universum: technical sciences. 2024, vol. 2, no. 11 (128), pp. 11–13.
11. GOST R ISO 9001–2015. Quality management systems. Requirements. M., Standartinform, 2020, 32 p. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200124394> (accessed: 10.01.2025).
12. Nazarenko N. A. Methodology for assessing the level of ergonomics of automated production control systems. Izvestiya SPbGETU LETI. 2019, no. 10, pp. 39–46.
13. Ozerov K. G., Kuzmina S. N., Silaeva V. V., Machulskaya K. V. Integration of quality management systems and lean manufacturing – the key to the systematic development of strategic tasks of the Russian Federation. Quality and Life. 2024, no. 1-2 (41-42), pp. 4–8.
14. Artamonova O. S., Knyazeva E. A., Churilov G. G. Effective practices of visual management in quality management of electrical equipment production. St Petersburg Economic Journal. 2024, no. 1, pp. 7–15.
15. Chetyrkina N. Yu., Medvedeva M. V. Methodological aspects of the procedure for assessing the effectiveness of quality management systems: requirements, principles and limitations. St Petersburg Economic Journal. 2024, no. 2, pp. 26–35.

Information about the author

Alexandra V. Vinnichenko, postgraduate student at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems at Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (address: 190000, Russia, Saint Petersburg, Bolshaya Morskaya St., 67, lit. A), ORCID: 0000-0002-3317-4723, SPIN code: 2578-2770.

The article was submitted on 23.12.2024, accepted for publication after reviewing on 29.01.2025, published online on 31.03.2025.