

УДК 004: 681.518.3.62

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПО ДАННЫМ КИБЕРФИЗИЧЕСКОГО УРОВНЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ ДИСКРЕТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

О. Д. Казаков, к.э.н., доцент, проректор по цифровизации, заведующий кафедрой ИТ БГИТУ, Брянск, Россия;
orcid.org/ 0000-0001-9665-8138, e-mail: it.kazakov@yandex.ru

Рассматривается задача оценки эффективности работы технологического оборудования в дискретном производстве. Целью работы является разработка механизма автоматической оценки эффективности работы технологического оборудования посредством нейросетевого анализа данных, полученных с киберфизического уровня цифрового двойника производственных бизнес-процессов. На основе исторических данных потребляемой мощности оборудования обучена нейронная сеть прямого распространения, состоящая из четырех полностью связанных слоев, с слоем dropout, для решения задачи прогнозирования времени жизненного цикла применяемого инструмента. Рассмотрена возможность повышения достоверности значений комплекса показателей оценки эффективности работы технологического оборудования по данным киберфизического уровня цифровых двойников бизнес-процессов дискретного производства.

Ключевые слова: цифровой двойник бизнес-процессов, киберфизический уровень, дискретное производство, эффективность работы технологического оборудования, прогноз жизненного цикла применяемого инструмента.

DOI: 10.21667/1995-4565-2022-82-177-186

Введение

Вне всякого сомнения, тема цифрового производства в последние годы одна из самых цитируемых в российской электронной библиотеке и международных базах данных. Научные изыскания по проблематике, связанной с цифровыми двойниками технологических процессов опираются на труды следующих исследователей [1-5]. В этих трудах цифровые представления виртуализируют процесс изготовления изделия [6, 7]. Соединение цифровых двойников в одну модель технологического процесса обуславливает появление цифрового двойника всего процесса, например, литья, штамповки, коробления или конвейерной обработки [8]. Это позволяет предприятию разрабатывать наиболее эффективную методологию производства [9]. Процесс может быть дополнительно оптимизирован с помощью цифровых двойников оборудования [5]. Таким образом, предприятие сможет оптимизировать процесс технического обслуживания и ремонтов, избегая дорогостоящих простоев [10].

Описание принципов реализации основных слоев цифрового двойника на базе программного обеспечения с открытым исходным кодом представлены в работе Ковалева С.П. [11]. Проблема сборки целостного цифрового двойника бизнес-процесса может быть решена на основе перспективного подхода, использующего математический аппарат модельно-ориентированной системной инженерии.

Цифровой двойник бизнес-процесса, сканируя данные по реальному бизнес-процессу, оперативно вносит соответствующие изменения в его цифровую копию [12]. Важным преимуществом разработки цифрового двойника бизнес-процессов дискретного многономенклатурного производственного предприятия является возможность влиять на поведение реального бизнес-процесса, изменяя состояние элементов цифрового двойника и повышая эффективность работы производства в целом.

Однако можно констатировать, что на данный момент отсутствует проработанный механизм оценки эффективности работы технологического оборудования посредством нейросетевого анализа данных, полученных с киберфизического уровня цифрового двойника бизнес-процессов дискретного производства.

Цель работы – разработка механизма автоматической оценки эффективности работы технологического оборудования посредством нейросетевого анализа данных, полученных с киберфизического уровня цифрового двойника производственных бизнес-процессов.

Теоретическая часть

Для оценки эффективности работы технологического оборудования посредством нейросетевого анализа данных, полученных с киберфизического уровня цифрового двойника бизнес-процессов дискретного производства предлагается использовать механизм, включающий следующие функциональные элементы:

1. Мониторинг мощности потребления тока с киберфизического уровня цифрового двойника бизнес-процессов в режиме реального времени.

С помощью цифрового ваттметра с контролером для передачи значений показателей в базу данных формируется набор данных для обучения моделей предикативной аналитики жизненного цикла применяемого инструмента и расчета показателей эффективности работы технологического оборудования на основе оценки оптимальности его режимов работы

Шаблон получения данных цифровым ваттметром представляет собой замеры двух показателей:

- 1) момент обработки t ;
- 2) потребляемая мощность, кВт.

Измерения записываются в систему хранения данных с шагом 1 секунда.

2. Реализация моделей предикативной аналитики жизненного цикла применяемого инструмента и расчета показателей эффективности работы технологического оборудования на основе оценки оптимальности его режимов работы.

3. Оценка производственной эффективности работы оборудования.

Для расчета эффективности работы технологического оборудования в дискретном производстве применяем комплекс показателей (рисунок 1):

На рисунке 1 изображена усовершенствованная методика оценки эффективности работы технологического оборудования.

Показатели модуля «Мониторинг» включают в себя расчет по формулам (1) – (9):

$$OEE = A * p * Q \quad (1)$$

ОЕЕ рассчитывается как произведение коэффициента доступности (A), производительности (p), качества (Q).

Доступность (A) – коэффициент, в котором учитываются потери времени из-за простоев оборудования. Рассчитывается как отношение машинного времени (суммарного времени на обработку детали) к фонду времени работы оборудования (формула 2).

$$A = T_{\text{маш}} / T_{\text{фонд}} \quad (2)$$

Производительность (p) – коэффициент, в котором учитываются потери в рабочей скорости оборудования, выражает отношение чистого машинного времени к машинному времени, расчет производится по формуле 3:

$$p = \frac{\sum_{i=0}^n Ni(um) * t_{\text{маш.ид}}(\text{час})}{T_{\text{маш}}(\text{час})} \quad (3)$$

Качество – учитываются потери в качестве, выражается как отношение разности машинного времени и времени на выпуск бракованных деталей для всех технологических операций с браком и времени исправления брака к машинному времени, расчет производится по следующей формуле 4:

$$Q = (T_{\text{маш}} - \sum_{i=0}^n T_{\text{бр}} - \sum_{i=0}^n T_{\text{ис.бр.}}) / T_{\text{маш}} \quad (4)$$

Индекс чистой эффективности использования оборудования рассчитывается по формуле (5):

$$NEE = A_{\Pi} * p \quad (5)$$

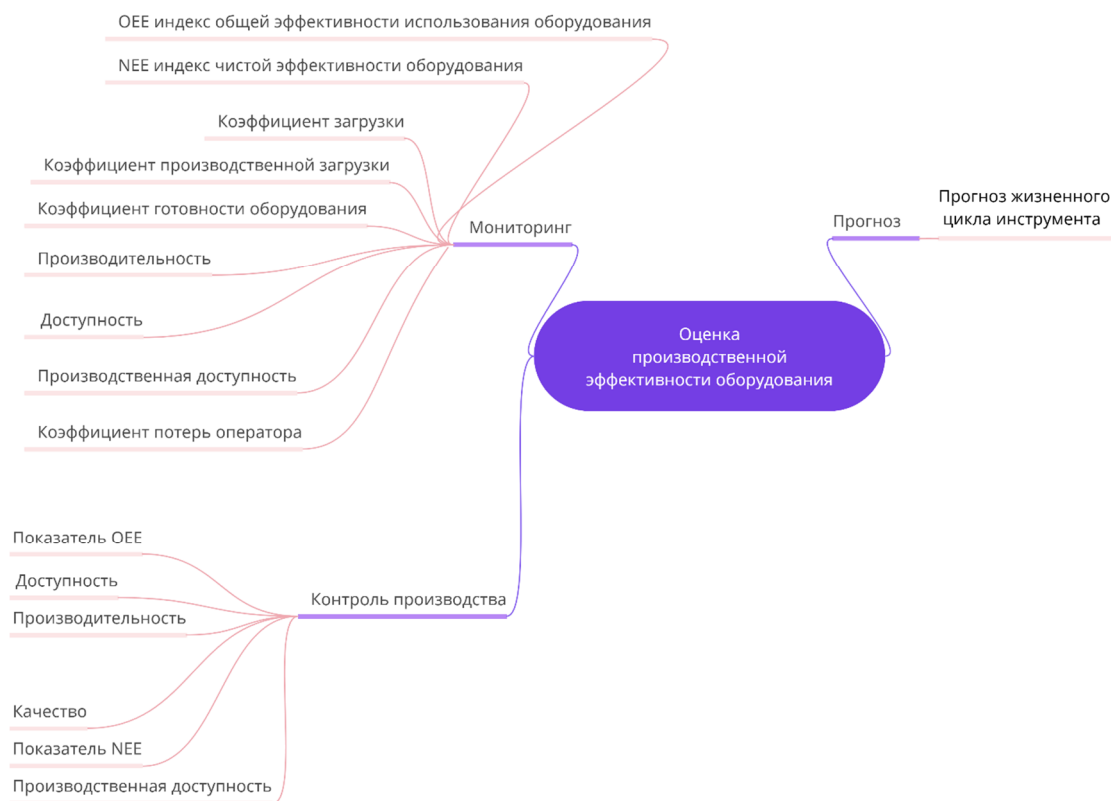


Рисунок 1 – Методика оценки производственной эффективности оборудования

Figure 1 – Methodology for assessing equipment production efficiency

Коэффициент загрузки рассчитывается по формуле (6):

$$k_3 = \frac{\dot{T}m}{T_{\Phi}}, \quad (6)$$

где $\dot{T}m$ – доля основного машинного времени, T_{Φ} – фонд работы оборудования.

Коэффициент производственной загрузки определяется как доля штучно-калькуляционного времени по отношению к фонду работы оборудования.

Для расчета коэффициента готовности оборудования есть формула (7):

$$k_{\Gamma} = \frac{(T_{\Phi} - T_{\text{ндв}})}{T_{\Phi}}. \quad (7)$$

Расчет доступности рассчитывается как отношение времени машинного и производственного, когда станок включен.

Расчет производственной доступности производится по формуле (8):

$$A_{\Pi} = T_{\text{шк}} / T_{\text{вкл}} \quad (8)$$

В подсистеме показателей «Контроль производства» расчет показателей осуществляется по тем же формулам, что и в подсистеме «Мониторинг».

Подсистема показателей «Прогноз» направлена на предикативную аналитику жизненного цикла применяемого инструмента. Исследование износа применяемого инструмента в настоящее время важная проблема, так как приводит к снижению качества обрабатываемых изделий, а также увеличению погрешностей размеров. Необходимость исследования обусловлена реальным запросом со стороны производственного предприятия, где путем наблю-

дения определено, что, например, режущий инструмент с производственным простоем выше 20 % имеет более короткий срок износа. Предполагаем, что прогнозирование жизненного цикла применяемого инструмента позволит своевременно выявлять оптимальную загрузку станка и повышать его эффективность.

4. *Генерация отчетов.* Начальник цеха или начальник производства предприятия делают оперативные выводы о работе оборудования, а также о работе производственного персонала, обслуживающего технологическое оборудование за рассматриваемый период.

5. *Контроль работы производственного персонала, принятие решений по улучшению производственной нагрузки технологического оборудования.*

Представленный механизм оценки эффективности работы технологического оборудования посредством нейросетевого анализа данных, полученных с киберфизического уровня цифрового двойника бизнес-процессов дискретного производства соответствует авторскому пониманию цифрового двойника бизнес-процессов, подробно представленному в работе [12].

Данный механизм оценки эффективности работы технологического оборудования по данным киберфизического уровня цифровых двойников бизнес-процессов позволит выявить причины невыполнения производственного плана на предприятии, установить неэффективное использование производственных ресурсов, в том числе оборудования, производственного персонала, производственного времени.

За счет применения прогноза жизненного цикла инструмента повышается возможность получения более достоверных значений комплекса показателей оценки эффективности работы технологического оборудования по данным киберфизического уровня цифровых двойников бизнес-процессов дискретного производства, что особенно важно использовать для дискретного производства.

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования прогноза жизненного цикла режущего инструмента производились на основе токарного станка 16K20 [13].

В ходе хронометража применения твердосплавных резцов для токарного станка 16K20 были сформированы данные по потребляемой мощности с шагом 1 секунда. На рисунке 2 представлена одна из диаграмм потребляемой мощности станка 16K20 в условиях ООО «БАЗ» в течение 3 суток (в том числе нерабочий день).

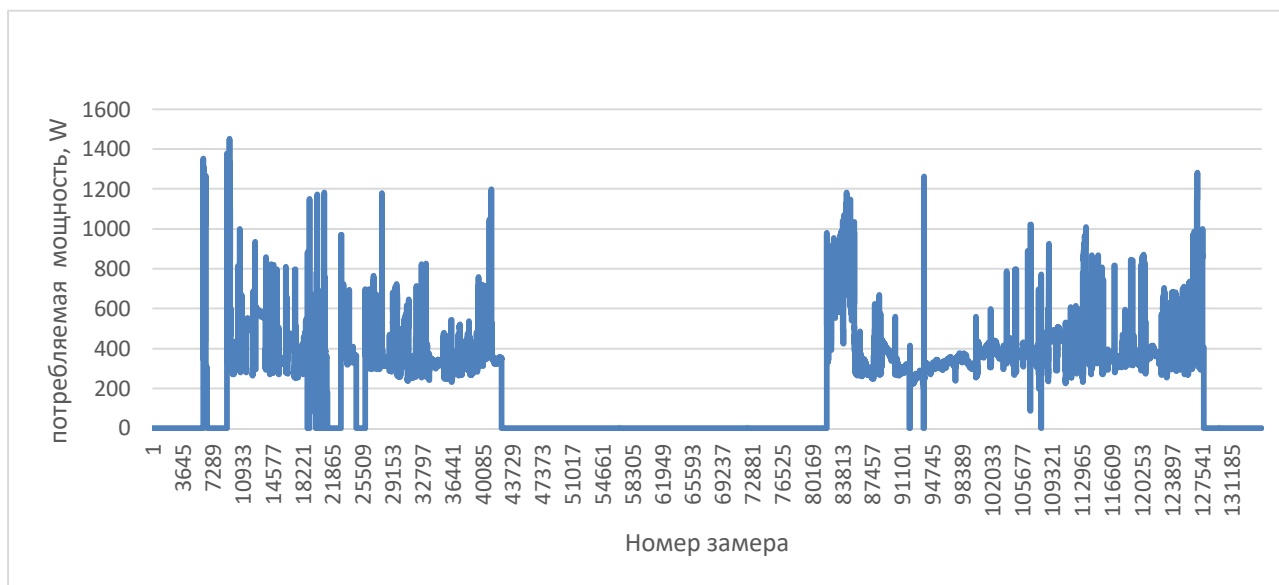


Рисунок 2 – Диаграмма потребляемой мощности станка 16K20 в условиях ООО «БАЗ»
Figure 2 – Diagram of 16K20 machine power consumption in the conditions of LLC «BAZ»

На следующем этапе происходила разметка данных, где каждому из исследуемых параметров векторов потребляемой мощности во времени присваивается значение соответствующей стойкости инструмента между переточками для твердосплавных резцов (таблица 1).

Таблица 1 – Шаблон разметки данных, стойкости инструмента между переточками для твердосплавных резцов при обработке алюминия с токарного станка 16K20

Table 1 – Data markup template obtained from tool stability between overflows for carbide cutters when processing aluminum from a 16K20 lathe

Класс Y	Значение стойкости инструмента между переточками для твердосплавных резцов при обработке алюминия, мин
1	175
2	160
3	145
4	130
5	115
6	100
7	85
8	70
9	55
10	40

Таким образом, размеченный набор данных включает вектор потребляемой мощности во времени (каждые 2 часа) и стойкость инструмента между переточками для твердосплавных резцов при обработке алюминия (таблица 2).

Таблица 2 – Выборка размеченного датасета

Table 2 – Selection of a marked up dataset

№	Вектор мощности потребления во времени	Класс стойкости инструмента между переточками для твердосплавных резцов при обработке алюминия
1	[0, 0, 0, 367, 364.. 1400, 1367,..]	7
..	...	...
169	[0, 0, 0, 982, 1112,..0]	5

Количество данных (объектов) мало. При дальнейшем исследовании планируется расширить синтетическими данными, сгенерированными соответствующей имитационной моделью.

В результате эксперимента для решения задачи прогноза жизненного цикла применяемого инструмента используется нейронная сеть прямого распространения, состоящая из четырех полностью связанных слоев, с слоем dropout, реализованная с использованием фреймворка TensorFlow (рисунок 3). Такая простая структура определена путем эксперимента в процессе изменения гиперпараметров модели.

На текущий момент метрика Accuracy на тестовых данных равна 0,9854, что говорит об отличном качестве обучения нейронной сети.

В рамках данного исследования рассмотрена возможность повышения достоверности значений комплекса показателей оценки эффективности работы технологического оборудования по данным киберфизического уровня цифровых двойников производственных бизнес-процессов (на примере потребляемой мощности).

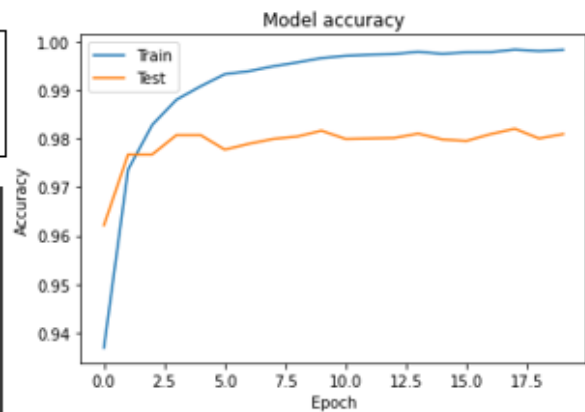
Функция потерь: категориальная кроссэнтропия. Оптимизатор градиентного спуска применен: метод Adam

Layer (type)	Output Shape	Param #
dense_7 (Dense)	(None, 350)	274750
dense_8 (Dense)	(None, 10)	3510

Total params: 278,260		
Trainable params: 278,260		
Non-trainable params: 0		

Функция активации на Dense_7: relu

Функция активации на Dense_8: softmax



Функция потерь: категориальная кроссэнтропия. Оптимизатор градиентного спуска применен: метод Adam

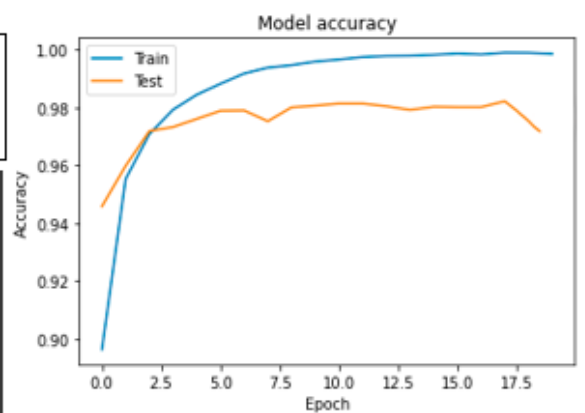
Layer (type)	Output Shape	Param #
dense_9 (Dense)	(None, 350)	274750
dense_10 (Dense)	(None, 200)	70200
dense_11 (Dense)	(None, 10)	2010

Total params: 346,960		
Trainable params: 346,960		
Non-trainable params: 0		

Функция активации на Dense_9: sigmoid

Функция активации на Dense_10: sigmoid

Функция активации на Dense_11: softmax



Функция потерь: категориальная кроссэнтропия. Оптимизатор градиентного спуска применен: метод Adam

Layer (type)	Output Shape	Param #
dense_2 (Dense)	(None, 350)	274750
dropout (Dropout)	(None, 350)	0
dense_3 (Dense)	(None, 200)	70200
dense_4 (Dense)	(None, 10)	2010

Total params: 346,960		
Trainable params: 346,960		
Non-trainable params: 0		

Функция активации на Dense_2: sigmoid

Функция активации на Dense_3: sigmoid

Функция активации на Dense_4: softmax

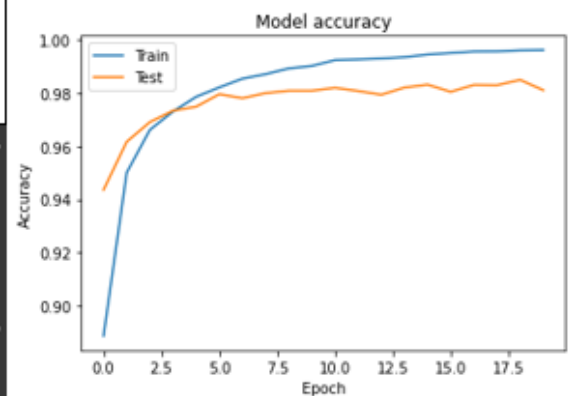


Рисунок 3 – Структура нейронной сети для прогноза жизненного цикла резца

Figure 3 – The structure of a neural network for predicting cutter life cycle

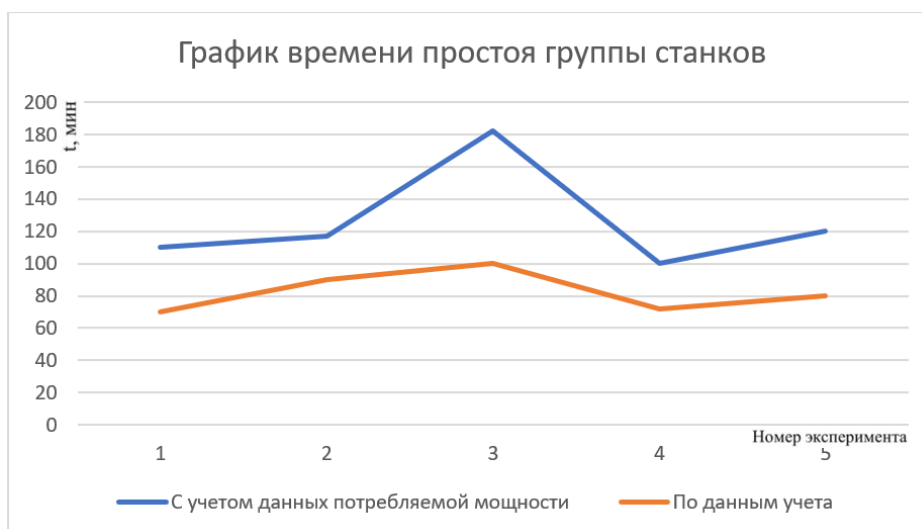


Рисунок 4 – График времени простоя группы станков по данным киберфизического уровня цифровых двойников производственных бизнес-процессов (на примере потребляемой мощности)
Figure 4 – Downtime schedule of a group of machines according to cyber-physical level data of digital counter-parts of production business processes (based on power consumption)

В ходе сравнительного анализа отчета о работе оборудования на предприятии с дискретным производством за период с 30.06.2022 по 02.07.2022 (реальные данные) и отчета о работе того же оборудования с учетом корректировки значений входных параметров на основе данных по потребляемой мощности (расчетные данные) получили следующие результаты (рисунок 5):

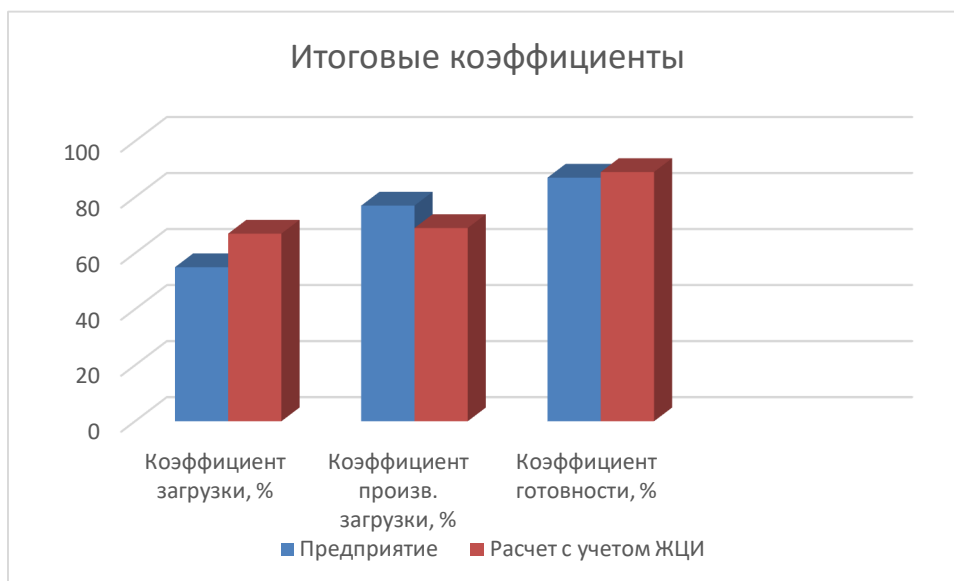


Рисунок 5 – Отчет о загрузке станка на предприятии в сравнении с расчетными показателями
Figure 5 – Report on the state of the machine in the enterprise in comparison with the calculated indicators

Коэффициент готовности равен 87 %, отличается от коэффициента готовности, рассчитанного на основе уточненных данных о простое на 2 %. Анализ недоступного времени показывает, что организационный простой составляет незначительный процент.

Коэффициент загрузки оборудования составляет 55 %, этот же показатель с учетом жизненного цикла инструмента 67 %, разница обусловлена тем, что станок работает на холостом ходу, что время простоя фактического больше, чем учтено на предприятии.

Коэффициент производственной загрузки на предприятии, равный 77 % отличается от коэффициента готовности на 10 %, а с учетом жизненного цикла инструмента на 16 %, что объясняется тем, что не все доступное время используется в производственных целях.

Заключение

В статье разработан механизм оценки эффективности работы технологического оборудования посредством нейросетевого анализа данных, полученных с киберфизического уровня цифрового двойника бизнес-процессов дискретного производства.

На основе исторических данных потребляемой мощности оборудования обучена нейронная сеть прямого распространения, состоящая из четырех полностью связанных слоев, с слоем dropout, для решения задачи прогнозирования времени жизненного цикла применяемого инструмента. На основе сгенерированного отчета начальник цеха или начальник производства предприятия делают оперативные выводы о работе оборудования, а также о работе производственного персонала, обслуживающего технологическое оборудование за рассматриваемый период. Рассмотрена возможность повышения достоверности значений комплекса показателей оценки эффективности работы технологического оборудования по данным киберфизического уровня цифровых двойников бизнес-процессов дискретного производства. Таким образом, предполагается решение задачи контроля работы производственного персонала и совершенствование принятия решений по улучшению производственной мощности технологического оборудования.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №23-28-00180).

Библиографический список

1. Алаасам А. Б. А., Радченко Г. И., Черных А. Н. Микро-потoki работ: сочетание потоков работ и потоковой обработки данных для поддержки цифровых двойников технологических процессов. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2019. Т. 8. № 4. С. 100-116.
2. Антонов С. В. Разработка структуры цифрового двойника для эффективного мониторинга технологических процессов. Научный альманах Центрального Черноземья. 2022. № 1-2. С. 17-23.
3. Холопов В. А., Антонов С. В., Курнасов Е. В., Каширская Е. Н. Разработка и применение цифрового двойника машиностроительного технологического процесса. Вестник машиностроения. 2019. № 9. С. 37-43.
4. Чернов А. О., Буйвол П. А., Макарова И. В. Совершенствование технологических процессов автоборочной линии с использованием цифровых двойников. Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. 2022. № 5 (59). С. 171-175.
5. Ayani M., Ganebäck M., Ng A.H.C. Digital Twin: Applying emulation for machine reconditioning. Procedia CIRP, 72 (2018), pp. 243-248
6. Souza V. et al. A digital twin architecture based on the industrial internet of things technologies. 2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE). IEEE, 2019, pp. 1-2. <https://doi.org/10.1109/ICCE.2019.8662081>
7. Zhang C. et al. A reconfigurable modeling approach for digital twin-based manufacturing system. Procedia Cirp. 2019, vol. 83, pp. 118-125. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.141>
8. Malakuti S., Grüner S. Architectural aspects of digital twins in IIoT systems. Proceedings of the 12th European conference on software architecture: companion proceedings. 2018. pp. 1-2. <https://doi.org/10.1145/3241403.3241417>
9. Guivarch D. et al. Creation of helicopter dynamic systems digital twin using multibody simulations // CIRP Annals. 2019, vol. 68, no. 1, pp. 133-136. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.041>
10. Booyse W., Wilke D. N., Heyns S. Deep digital twins for detection, diagnostics and prognostics. Mechanical Systems and Signal Processing. 2020, vol. 140, 106612 p.
11. Ковалёв С. П. Проектирование информационного обеспечения цифровых двойников энергетических систем. Системы и средства информатики, 2020. С. 66-81.

12. Казаков О. Д., Азаренко Н. Ю. Цифровые двойники бизнес-процессов: пространственно-временной слой. Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2022. № 4-2. С. 60-67.

13. Фатеев И. С., Поздняков Е. П. Инструкция по ремонту токарного станка 16к20, часть 1, общее описание. Тула, 1988 URL: https://stanok-park.ru/upload/iblock/a65/flz5v204_euyhaszllqgc70hh2b5by8ghs/remont_16k20_1.pdf

UDC 004: 681.518.3.62

EVALUATION OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT EFFICIENT OPERATION ACCORDING TO CYBER-PHYSICAL LEVEL DATA OF DISCRETE PRODUCTION DIGITAL TWINS

O. D. Kazakov, Ph.D. (Econ.), Associate Professor, Vice-Rector for Digitalization, Head of IT Department, BGITU, Bryansk, Russia;
orcid.org/ 0000-0001-9665-8138, e-mail: it.kazakov@yandex.ru

The problem of evaluating the efficiency of technological equipment in discrete production is considered. The aim of the work is to develop a mechanism for automatic evaluation of technological equipment efficiency by means of neural network analysis of data obtained from the cyber-physical level of production business processes digital twin. Based on the historical data on equipment power consumption, a feed-forward neural network consisting of four fully connected layers, with dropout layer was trained to solve the problem of pre-dicting the life cycle time of the tool being used. The possibility of increasing the reliability of indicators complex values for evaluating the efficiency of technological equipment according to a cyber-physical level of digital counterparts of discrete production business processes is considered.

Key words: digital twin of business processes, cyber physical level, discretionary production, technological equipment efficiency, forecasting the life cycle of the tool used.

DOI: 10.21667/1995-4565-2022-82-177-186

References

1. Alaasam A. B. A., Radchenko G. I., Chernyh A. N. Mikropotoki rabot: sochetanie potokov rabot i potokovoj obrabotki dannyh dlya podderzhki cifrovyyh dvoynikov tekhnologicheskikh processov. *Vestnik Yezhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta*. Seriya: Vychislitel'naya matematika i informatika. 2019. vol. 8, no. 4, pp. 100-116 (in Russian).
2. Antonov S. V. Razrabotka struktury cifrovogo dvoynika dlya effektivnogo monitoringa tekhnologicheskikh processov. *Nauchnyy al'manah Central'nogo Chernozem'ya*. 2022, no. 1-2, pp. 17-23 (in Russian)
3. Holopov V. A., Antonov S. V., Kurnasov E. V., Kashirskaya E. N. Razrabotka i primeneniye cifrovogo dvoyni-ka mashinostroitel'nogo tekhnologicheskogo processa. *Vestnik mashinostroeniya*. 2019. no. 9, pp. 37-43 (in Russian).
4. Chernov A. O., Bujvol P. A., Makarova I. V. Sovershenstvovanie tekhnologicheskikh processov avtosborochnoj linii s ispol'zovaniem cifrovyyh dvoynikov. *Vestnik Luganskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Vladimira Dalya*. 2022, no. 5 (59), pp. 171-175 (in Russian).
5. Ayani M., Ganebäck M., Ng A. H. C. Digital Twin: Applying emulation for machine reconditioning. *Procedia CIRP*, 72 (2018), pp. 243-248 (in English).
6. Souza V. et al. A digital twin architecture based on the industrial internet of things technologies. 2019 *IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*. IEEE, 2019, pp.1-2. <https://doi.org/10.1109/ICCE.2019.8662081> (in English).
7. Zhang C. et al. A reconfigurable modeling approach for digital twin-based manufacturing system. *Procedia Cirp*. 2019, vol. 83, pp. 118-125. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.141> (in English)
8. Malakuti S., Grüner S. Architectural aspects of digital twins in IIoT systems. *Proceedings of the 12th European conference on software architecture: companion proceedings*. 2018, pp. 1-2. <https://doi.org/10.1145/3241403.3241417> (in English).

9. **Guivarch D. et al.** Creation of helicopter dynamic systems digital twin using multibody simulations. *CIRP Annals*. 2019. vol. 68. no. 1. pp. 133-136. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.041> (in English).
10. **Booyse W., Wilke D. N., Heyns S.** Deep digital twins for detection, diagnostics and prognostics. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, vol. 140, pp. 106612 (in English).
11. **Kovalyov S. P.** Proektirovanie informacionnogo obespecheniya cifrovyyh dvoynikov energeticheskikh system. *Sistemy i sredstva informatiki*, 2020, pp. 66-81 (in Russian).
12. **Kazakov O. D., Azarenko N. Yu.** Cifrovye dvojniki biznes-processov: prostranstvenno-vremennoy sloj. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2022, no. 4-2, pp. 60-67 (in Russian).
13. **Fateev I. S., Pozdnyakov E. P.** Instrukciya po remontu tokarnogo stanka 16k20, chast' 1, obshchee opisanie. Tula, 1988 URL: https://stanok-park.ru/upload/iblock/a65/flz5v204eyhaszllqgc70hh2b5by8ghs/remont_16k20_1.pdf.