
ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

INSTRUMENT-MAKING TECHNOLOGY

УДК 658.513
DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-5-350-356

ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Д. К. АЗАРЯН, В. М. МЕДУНЕЦКИЙ*

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
**vm57med@yandex.ru*

Аннотация. Рассмотрены существующие методы оценивания показателей эффективности и определены основные направления исследований в этой области. Известно, что индекс общей эффективности использования оборудования служит основой для создания семейства показателей эффективности, которые разбиты на группы и классифицированы. Проведенный анализ позволил выявить основные методики модификации базового показателя эффективности использования оборудования.

Ключевые слова: *эффективность оборудования, ключевые технико-экономические показатели, производительность оборудования, технологическая линия, производственные потери*

Ссылка для цитирования: *Азарян Д. К., Медунецкий В. М. Показатели эффективности технологического оборудования // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 5. С. 350—356. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-5-350-356.*

TECHNOLOGICAL EQUIPMENT EFFICIENCY INDICATORS

D. K. Azaryan, V. M. Medunetskiy*

ITMO University, St. Petersburg, Russia
**vm57med@yandex.ru*

Abstract. The existing methods of evaluating performance indicators are considered and the main directions of research in this area are determined. It is known that the overall efficiency index of equipment use serves as the basis for creating a family of performance indicators, which are divided into groups and classified. Presented analysis makes it possible to identify the main methods of modifying the basic indicator of overall equipment efficiency.

Keywords: *equipment efficiency, key technical and economic indicators, equipment productivity, production line, production losses*

For citation: *Azaryan D. K., Medunetskiy V. M. Technological equipment efficiency indicators. Journal of Instrument Engineering. 2022. Vol. 65, N 5. P. 350—356 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-5-350-356.*

Конкуренция между компаниями приводит к необходимости улучшения операционных показателей деловой деятельности. Для этого компании прибегают к использованию передовых практик управления производственными процессами, их контролирования и изменения. Определить положительный эффект изменений помогают ключевые технико-экономические показатели, важнейшим из которых является эффективность оборудования. Таким образом, особо значимыми становятся адекватные показатели для оценки и повышения эффективности оборудования. Однако даже с развитием методов определения эффективности оборудования все еще широко используются классические подходы.

В настоящей статье представлен анализ существующих методов и методик оценивания эффективности технологического оборудования и технологических линий, а также предприятий в целом.

В настоящее время общая эффективность оборудования (Overall Equipment Effectiveness — ОЕЕ) является наиболее широко известным показателем оценки эффективности технологического оборудования [1]. Несмотря на то, что данный показатель был предложен 1988 г. [2], он по-прежнему представляет интерес для научно-инженерного и экономического сообществ. Показатель ОЕЕ состоит из трех компонентов: эксплуатационная готовность (доступность) рабочей операции (ЭГ), эффективность рабочей операции (ЭФ) и коэффициент качества (КК), которые можно связать следующей формулой (ГОСТ Р ИСО 22400-2-2016):

$$\text{ОЕЕ} = \text{ЭГ} \cdot \text{ЭФ} \cdot \text{КК},$$

где ЭГ — доля времени, %, когда оборудование производило или могло производить продукцию, т.е. было в рабочем состоянии; ЭФ — теоретическая доля времени, %, которая вычисляется от действительно потраченного времени на производство при максимальной для данного оборудования скорости; КК — доля качественной продукции, %, в общей выработке линии.

Показатель ОЕЕ применяется в установившихся режимах работы главным образом массового и крупносерийного производства. Преимуществом данного показателя является комплексность, и по его использованию разработаны стандарты и соответствующие руководства. Исходя из существующей практики требуется конкретизация показателя ОЕЕ для соответствия индивидуальным потребностям различных предприятий. В связи с этим было разработано достаточно много модификаций, адаптированных к конкретным условиям производства.

Модификации показателя эффективности были разбиты на две группы для удобства анализа: показатели эффективности ручного труда и показатели эффективности оборудования (рис. 1).

Эффективность предприятия необходимо оценивать комплексно по показателям обеих групп.



Рис. 1

В группе показателей эффективности ручного труда можно выделить три показателя, каждый из которых является усовершенствованной версией предыдущего. В 2008 г. проф. Дж. Гордоном на основе показателя ОЕЕ выведена общая эффективность труда — Overall Labour Effectiveness (OLE(1)) [3]. Согласно первоначальному определению, OLE(1), по аналогии с ОЕЕ, измеряет совокупный эффект доступности, производительности и качества продукции как для отдельных лиц, так и для группы специалистов. В 2012 г. группой ученых предложен показатель, который определяет эффективность работающих относительно

желаемого уровня производительности [4]: общую эффективность конкретного работника (Overall Worker Effectiveness — OWE) определяют как количественные, так и качественные факторы, среди которых мотивация, здоровье и отношение к работе, поэтому расчет данного показателя может оказаться затруднительным [5]. На основе анализа существующих показателей эффективности ручного труда позднее, в 2020 г., группой специалистов разработана новая структура потерь, которая позволяет оценивать показатель эффективности более „прозрачно“: например, некоторые потери, которые оценивались косвенно, в новом методе разбиваются на несколько составляющих для непосредственной оценки. Разработанный метод получил название „пересмотренная общая эффективность труда“ (Revised Overall Labour Effectiveness — ROLE) [5].

Известно, что эффективность оборудования является важным индикатором в массовом и крупносерийном производстве. Показатели эффективности оборудования внутри группы можно классифицировать по количеству учтенных причин потерь, по причинам потерь, по дополнительным показателям (наджность, потеря качества и стоимость оборудования) и прочим, которые не удалось отнести к вышеуказанным подгруппам (см. рис. 1).

Показатель эффективности оборудования ОЕЕ применим только к одной единице оборудования, в связи с этим было разработано несколько показателей, отличающиеся между собой по количеству оборудования. Таким образом, данное множество показателей также можно объединить в подгруппу.

В 2006 г. был предложен метод оценивания общей эффективности линии (Overall Line Effectiveness — OLE(2)), однако данный показатель характеризует только непрерывные линии [6]. Далее, в 2008 г., специалистами был предложен более универсальный метод оценивания общей эффективности оборудования производственной линии (Overall Equipment Effectiveness of a Manufacturing Line — OEEML) [7]. Показатель суммарной общей эффективности оборудования (Total Overall Equipment Effectiveness — TOEE) является аналогом ОЕЕ для уровня целого предприятия. Данный показатель используется для определения слабых мест в системе и скрытого потенциала производства [8]. Показатель общей заводской эффективности (Overall Factory Effectiveness — OFE) контролирует деятельность на уровне промышленного предприятия и учитывает различные машины и оборудование [9]. Промышленное предприятие может быть представлено как подсистемы, эффективность которых контролируется через показатели эффективности времени цикла (Cycle Time Effectiveness — CTE) и общую эффективность пропускной способности (Overall Throughput Effectiveness — OTE). Показатель CTE определяется отношением теоретической длительности цикла к фактической, а OTE — фактическим объемом выпускаемой продукции к теоретически возможному [10, 11]. Глобальную производственную структуру охватывает последний показатель данной подгруппы — показатель глобальной эффективности производства (Global Production Effectiveness — GPE), введенный в 2013 г. [13].

Следующая подгруппа показателей эффективности оборудования характеризует причины возможных потерь на производстве.

Показатель общей эффективности оборудования (Total Equipment Effectiveness Performance — ТЕЕР) учитывает потери при плановых остановках оборудования за счет добавления к показателю ОЕЕ дополнительного множителя загрузки. В отличие от ТЕЕР, показатель эффективности производственного оборудования (Production Equipment Efficiency — РЕЕ) позволяет учесть большее разнообразие возможных потерь, таких как низкий спрос и транзакционные издержки. Общая эффективность завода (Overall Plant Effectiveness — ОРЕ) и общая эффективность активов (Overall Asset Effectiveness — ОАЕ), как и остальные рассмотренные показатели, основаны на методологии показателя ОЕЕ. Эти показатели учитывают при расчете большое количество возможных потерь, которые охватывают весь производственный процесс. Они отличаются друг от друга толкованием понятия потерь, так, ОАЕ рас-

считывает производственные потери по объему выпуска, тогда как OPE — по времени [11, 13]. Сравнительная диаграмма показателей OEE, TEEP, PEE и OAE/OPE, представленная компанией MES Center [12], приведена на рис. 2.

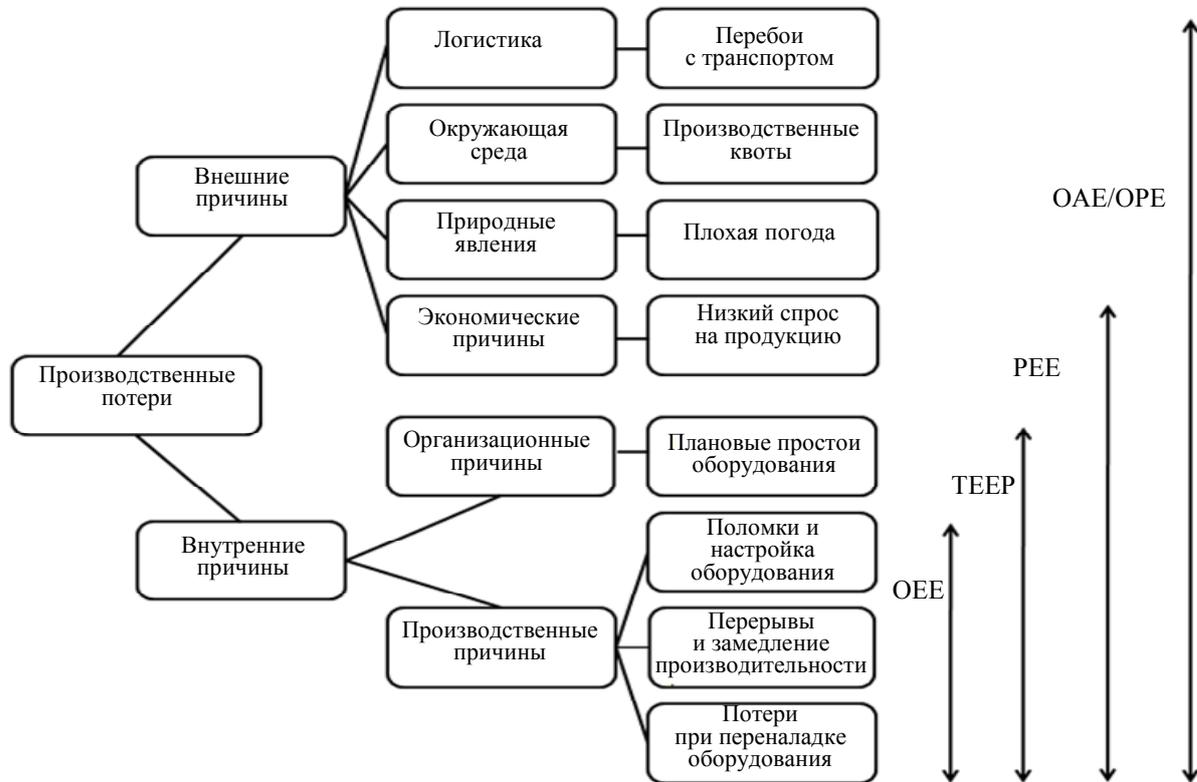


Рис. 2

В 2012 г. группа ученых модифицировала показатель эффективности OEE, разработав показатель „производительность и надежность оборудования“ (Equipment Performance and Reliability — EPR), учитывающий, помимо эффективности оборудования, его надежность [14]. Ранее другими учеными был введен показатель, определяющий общую потерю стоимости оборудования (Overall Equipment Cost Loss — OECL) и его эффективность. Введенный позднее показатель — общая потеря качества и стоимости оборудования (Overall Equipment and Quality Cost Loss — OEQCL) — позволил учесть еще и потери качества [15, 16].

Немаловажными являются показатели, которые не удалось отнести к вышеперечисленным подгруппам. Один из них — показатель чистой эффективности использования оборудования (Net Equipment Effectiveness — NEE), введенный в ГОСТ Р ИСО 22400-2-2016. Этот показатель характеризует потери, обусловленные задержками при выполнении рабочих операций, потери во время производственного цикла и при исправлении брака [1]. Также в 2006 г. на основе анализа показателя OEE был предложен показатель эффективности оборудования (Equipment Effectiveness — E), который учитывает возможные потери оборудования изолированно, т.е. потери, связанные непосредственно с машиной. Подача материала данным показателем не учитывается [2]. В 2010 г. был предложен показатель общей взвешенной эффективности оборудования (Overall Weighting Equipment Effectiveness — OWEE), учитывающий неравноценный вклад каждого элемента показателя OEE в результирующую эффективность через весовые коэффициенты [17]. Для нужд производства с большой номенклатурой и малыми объемами производимой продукции в 2015 г. группой специалистов был предложен другой показатель, который позволяет оценивать эффективность обрабатывающего оборудования (Machining Equipment Effectiveness — MEE) и учитывает возможность обработки большого количества продукции за определенный промежуток времени [18].

Следует отметить, что на многих производственных предприятиях применяют как ручной труд, так и автоматическое оборудование, например в сборочных технологических линиях. Однако, как показал анализ литературы, на сегодняшний день показатели эффективности, способные в полной мере оценить совокупность ручного труда и автоматического оборудования, практически отсутствуют. Так, например, в 2016 г. был предложен метод, с помощью которого оценивается эффективность полуавтоматической линии [19]. Идея метода заключается в том, чтобы найти среднее арифметическое между тремя составляющими. Первая составляющая — это отношение всей изготавливаемой продукции ко всей выпускаемой за вычетом негодной по причине ненадлежащей организации, а две следующие составляющие — то же отношение, за вычетом негодной продукции по причине неисправных средств производства и по причине брака. Однако данный показатель сложно поддается анализу, так как установить причины снижения эффективности невозможно, а именно, этот показатель не отражает, снизилась ли эффективность в процессе ручного труда или в процессе работы оборудования.

В итоге можно отметить, что за последнее десятилетие было разработано достаточно много методов оценивания показателей эффективности ручного труда и автоматического оборудования. Проведенный анализ позволил определить основные направления исследований в области оценки эффективности оборудования. Уточнение значимости каждого показателя с помощью весовых коэффициентов, добавление новых множителей, отражающих новые характеристики (к примеру, надежность и стоимость оборудования), замена одного или нескольких основных множителей, например, для учета потерь, не учтенных показателем ОЕЕ, — все это способы модификации базового показателя эффективности ОЕЕ. Анализ также позволил определить, что среди показателей эффективности существует недостаточно исследованная область, связанная с характеристикой полуавтоматических технологических линий, где ручной труд совмещен с работой автоматического оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bititci U., Garengo P., Dorfler V., Nudurupati S.* Performance measurement: Challenges for tomorrow // Intern. Journal of Management Reviews. 2012. N 14(3). P. 305—327.
2. *De Ron A. J., Rooda J. E.* OEE and equipment effectiveness: an evaluation // Intern. Journal of Production Research. 2006. N 44(23). P. 4987—5003. DOI: 10.1080/00207540600573402.
3. *Gordon G.* Overall labour effectiveness: extending the principles of OEE to the workforce. 2008. [Электронный ресурс]: <<https://www.controleng.com/articles/overall-labor-effectiveness-extending-the-principlesof-oee-to-the-workforce/>>, 10.10.2021.
4. *Saragaon B., Hiregoudar N. L., Mallur S. B.* Development of a conceptual model for the measurement of Overall Worker Effectiveness (OWE) in discrete manufacturing SMES // Intern. Journal of Engineering and Innovation Technology. 2012. Vol. 2, N 3. P. 366—372.
5. *Braglia M., Castellano D., Frosolini M., Gallo M., Marrazzini L.* Revised overall labour effectiveness // Intern. Journal of Productivity and Performance Management. 2021. Vol. 70, N 6. P. 1317—1335. DOI: 10.1108/IJPPM-08-2019-0368.
6. *Nachiappan R. M., Anantharaman N.* Evaluation of overall line effectiveness (OLE) in a continuous product line manufacturing system // J. of Manufacturing Technology Management. 2006. N 17(7). P. 987—1008. DOI: 10.1108/17410380610688278.
7. *Braglia M., Frosolini M., Zammori F.* Overall equipment effectiveness of a manufacturing line (OEEML) // J. of Manufacturing Technology Management, 2008. N 20(1). P. 8—29. DOI: 10.1108/17410380910925389.
8. *Piran F. A. S., De Paris A., Lacerda D. P., Camargo L. F. R., Serrano R., Cassel R. A.* Overall Equipment Effectiveness: Required but not Enough—An Analysis Integrating Overall Equipment Effect and Data Envelopment Analysis // Global Journal of Flexible Systems Management. 2020. N 21(2). P. 191—206. DOI: 10.1007/s40171-020-00238-6.

9. Oechsner R., Pfeffer M., Pfitzner L., Binder H., Müller E., Vonderstrass T. (). From overall equipment efficiency (OEE) to overall Fab effectiveness (OFE) // *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2002. N 5(4—5). P. 333—339. DOI: 10.1016/S1369-8001(03)00011-8.
10. Huang S. H., Dismukes J. P., Shi J., Su Q., Razzak M. A., Bodhale R., Robinson D. E. Manufacturing productivity improvement using effectiveness metrics and simulation analysis // *Intern. Journal of Production Research*. 2003. N 41(3). P. 513—527. DOI: 10.1080/0020754021000042391.
11. OEE and Derived Indicators TEEP, PEE, OAE, OPE, OFE, OTE and CTE // MES Center: Официальный сайт. 2021. [Электронный ресурс]: <<http://mescenter.org/en/articles/125-oee-and-derived-indicators-teep-pee-oae-ope-ofe-ote-and-cte>>, 10.10.2021.
12. Lanza G., Stoll J., Stricker N., Peters S., Lorenz C. Measuring Global Production Effectiveness // *Procedia CIRP*. 2013. N 7. P. 31—36. DOI: 10.1016/j.procir.2013.05.006.
13. Muchiri P., Pintelon L. Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE): literature review and practical application discussion // *Intern. Journal of Production Research*. 2008. N 46(13). P. 3517—3535. DOI: 10.1080/00207540601142645.
14. Abdul Samat H., Kamaruddin S., Abdul Aziz I. Integration of Overall Equipment Effectiveness (OEE) and reliability method for measuring machine effectiveness // *S.-Afr. Journal of Industrial Engineering*. 2012. Vol. 23, N 1.
15. Wudhikarn R., Smithikul C., Manopiniwes W. Developing Overall Equipment Cost Loss Indicator // *Proc. of the 6th CIRP-Sponsored Intern. Conf. on Digital Enterprise Technology*. 2010. P. 557—567. DOI: 10.1007/978-3-642-10430-5_43.
16. Wudhikarn R. Improving overall equipment cost loss adding cost of quality // *Intern. Journal of Production Research*. 2012. N 50(12). P. 3434—3449. DOI: 10.1080/00207543.2011.587841.
17. Wudhikarn R. Overall Weighting Equipment Effectiveness // *IEEE Intern. Conf. on Industrial Engineering and Engineering Management*. 2010. DOI: 10.1109/IEEM.2010.5674418.
18. Jauregui Becker J. M., Borst J., Van der Veen A. Improving the overall equipment effectiveness in high-mix-low-volume manufacturing environments // *CIRP Annals*. 2015. N 64(1). P. 419—422. DOI: 10.1016/j.cirp.2015.04.126.
19. Fernandez Q. Performance indicator design and implementation on semi-automated production lines: Overall Equipment Effectiveness (OEE) philosophy adaptation: MSc Thesis. 2016.

Сведения об авторах

- Давид Каренович Азарян** — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: azaryan.d@yandex.ru
- Виктор Михайлович Медунецкий** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: vm57med@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.02.22; одобрена после рецензирования 18.02.22; принята к публикации 29.03.22.

REFERENCES

1. Bititci U., Garengo P., Dorfler V., & Nudurupati S. *International Journal of Management Reviews*, 2012, no. 3(14), pp. 305—327.
2. De Ron A.J., & Rooda J.E. *International Journal of Production Research*, 2006, no. 44(23), pp. 4987—5003, DOI:10.1080/00207540600573402 (<https://doi.org/10.1080/00207540600573402>).
3. Gordon G. *Overall labour effectiveness: extending the principles of OEE to the workforce*, 2008, <https://www.controleng.com/articles/overall-labor-effectiveness-extending-the-principlesof-oee-to-the-workforce/>.
4. Saragaon B., Hiregoudar N.L. & Mallur S.B. *International Journal of Engineering and Innovation Technology*, 2012, no. 3(2), pp. 366—372.
5. Braglia M., Castellano D., Frosolini M., Gallo M. & Marrazzini L. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 2021, no. 6(70), pp. 1317—1335, <https://doi.org/10.1108/IJPPM-08-2019-0368>.
6. Nachiappan R.M., & Anantharaman N. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2006, no. 7(17), pp. 987—1008, DOI:10.1108/17410380610688278 (<https://doi.org/10.1108/17410380610688278>).
7. Braglia M., Frosolini M., & Zammori F. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2008, no. 1(20), pp. 8—29, DOI:10.1108/17410380910925389 (<https://doi.org/10.1108/17410380910925389>).
8. Piran F.A.S., De Paris A., Lacerda D.P., Camargo L.F.R., Serrano R., & Cassel R.A. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 2020, no. 2(21), pp. 191—206, DOI:10.1007/s40171-020-00238-6 (<https://doi.org/10.1007/s40171-020-00238-6>).
9. Oechsner R., Pfeffer M., Pfitzner L., Binder H., Müller E., & Vonderstrass T. *Materials Science in Semiconductor*

- Processing*, 2002, no. 5(4-5), pp. 333–339, DOI:10.1016/S1369-8001(03)00011-8 ([https://doi.org/10.1016/S1369-8001\(03\)00011-8](https://doi.org/10.1016/S1369-8001(03)00011-8)).
10. Huang S.H., Dismukes J.P., Shi J., Su Q., Razzak M.A., Bodhale R., & Robinson D.E. *International Journal of Production Research*, 2003, no. 3(41), pp. 513–527, DOI:10.1080/0020754021000042391 (<https://doi.org/10.1080/0020754021000042391>).
 11. *OEE and derived indicators TEEP, PEE, OAE, OPE, OFE, OTE and CTE*, <http://mescenter.org/en/articles/125-oe-and-derived-indicators-teep-pee-oae-ope-ofe-ote-and-cte>.
 12. Lanza G., Stoll J., Stricker N., Peters S., & Lorenz C. *Procedia CIRP*, 2013, no. 7, pp. 31–36, DOI:10.1016/j.procir.2013.05.006 (<https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.05.006>).
 13. Muchiri P., & Pintelon L. *International Journal of Production Research*, 2008, no. 46(13), pp. 3517–3535, DOI:10.1080/00207540601142645 (<https://doi.org/10.1080/00207540601142645>).
 14. Abdul Samat H., Kamaruddin S., & Abdul Azid I. S. *Afr. J. Ind. Eng.*, 2012, no. 1(23), n. Pretoria Jan.
 15. Wudhikarn R., Smithikul C., & Manopiniwes W. *Proceedings of the 6th CIRP-Sponsored International Conference on Digital Enterprise Technology*, 2010, pp. 557–567, DOI:10.1007/978-3-642-10430-5_43 (https://doi.org/10.1007/978-3-642-10430-5_43).
 16. Wudhikarn R. *International Journal of Production Research*, 2012, no. 12(50), pp. 3434–3449, DOI:10.1080/00207543.2011.587841 (<https://doi.org/10.1080/00207543.2011.587841>).
 17. Wudhikarn R. *2010 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 2010, DOI:10.1109/IEEM.2010.5674418 (<https://doi.org/10.1109/IEEM.2010.5674418>).
 18. Jauregui Becker J.M., Borst J., & van der Veen A. *CIRP Annals*, 2015, no. 1(64), pp. 419–422, DOI:10.1016/j.cirp.2015.04.126 (<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.126>).
 19. Fernandez Q. *Performance indicator design and implementation on semi-automated production lines: Overall Equipment Effectiveness (OEE) philosophy adaptation*, Master of Science Thesis, 2016.

Data on authors

- David K. Azaryan** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: azaryan.d@yandex.ru
- Viktor M. Medunetskiy** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: vm57med@yandex.ru

Received 08.02.22; approved after reviewing 18.02.22; accepted for publication 29.03.22.