

Assessment of cutting machine energy consumption on the example of the VF-7/50 vertical milling center

Ocena energochłonności obrabiarki skrawającej na przykładzie pionowego centrum frezarskiego VF-7/50

WOJCIECH BORKOWSKI
PAWEŁ PIÓRKOWSKI
WAĆLAW SKOCZYŃSKI
MAREK PIÓRKOWSKI
ANDRZEJ ROSZKOWSKI*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.10.79>

The assessment of the energy intensity of the VF-7/50 vertical milling center is presented. A study was carried out to collect data on the machine's demand for electricity. A dependence was developed on the basis of which the energy intensity of the machine tool can be determined in the milling process.

The results were verified experimentally.

KEYWORDS: energy consumption of the milling machine, milling, machine tools

Przedstawiono ocenę energochłonności pionowego centrum frezarskiego VF-7/50. Wykonano badania w celu zebrania danych na temat zapotrzebowania obrabiarki na energię elektryczną. Opracowano zależność, na podstawie której można określić energochłonność obrabiarki w procesie frezowania. Wyniki zweryfikowano eksperymentalnie.

SŁOWA KLUCZOWE: energochłonność frezarki, frezowanie, obrabiarki skrawające

Jednym z poważnych problemów, przed jakimi obecnie stoi branża przemysłowa, jest konieczność ograniczenia zużycia energii. Źródłem wysokiego zapotrzebowania na energię elektryczną w przemyśle maszynowym są m.in. obrabiarki skrawające. Dbanie o środowisko wymaga od producentów tych maszyn regularnego obniżania ich zapotrzebowania energetycznego. Zachodzi więc potrzeba monitorowania zużycia energii elektrycznej w procesach obróbki skrawaniem oraz prognozowania tego zużycia w zależności od rodzaju maszyny i stosowanych parametrów skrawania. W niniejszym artykule podjęto próbę wyznaczenia takiej zależności dla pionowego centrum frezarskiego VF-7/50, pracującego w warunkach przemysłowych.

Energochłonność procesów obróbki skrawaniem

Współczesny świat zmaga się z dużym wyzwaniem, jakim jest rozwiązanie problemu rosnącego popytu na energię w warunkach malejącej podaży. Jak wynika z rys. 1, do 2050 r. popyt na energię elektryczną wzrośnie w porównaniu z obecnym stanem o ok. 50%. Tego problemu

nie da się rozwiązać wyłącznie poprzez rozwój energii odnawialnej. Konieczne są działania mające na celu obniżenie energochłonności obrabiarek skrawających. Aktualne szacunki wskazują, że w krajach wysoko rozwiniętych, takich jak USA, zużycie energii elektrycznej przez obrabiarki skrawające stanowi ok. 1/3 całkowitego jej zużycia w przemyśle [1]. Energochłonność obrabiarek skrawających zaczyna nabierać podobnego znaczenia co zagrożenie wydajności obróbki skrawaniem czy uzyskiwanie odpowiedniej dokładności wymiarowo-kształtowej.

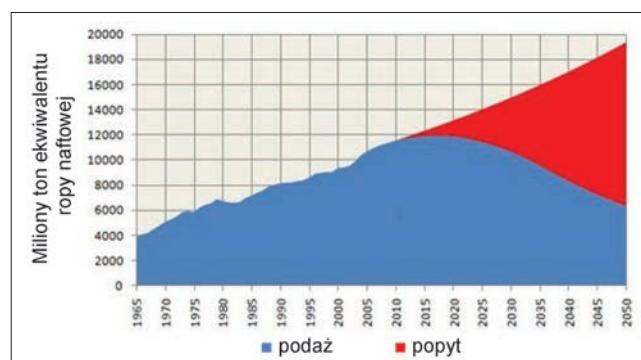


Fig. 1. The difference between supply and demand for energy [1]
Rys. 1. Różnica między podażą a popytem na energię [1]

Istnieją różne koncepcje metod, które można wykorzystać do określania zapotrzebowania obrabiarek skrawających na energię elektryczną. W pracy [2] zaprezentowano podejście oparte na określaniu energochłonności poszczególnych elementów maszyny, takich jak serwomechanizmy czy system wymiany narzędzi. Pozwala ono na szybkie oszacowanie zużycia energii w całej fabryce. Inną koncepcją jest zaprezentowana w pracy [3] możliwość podziału całkowitej energii elektrycznej w procesach obróbki ubytkowej na składową pochodzącą od skrawania oraz składową pochodzącą od zapotrzebowania samej maszyny. Podobną koncepcją zaprezentowano w pracy [4].

Na bazie tych koncepcji możliwe jest tworzenie modeli wydajności obrabiarki i podejmowanie na ich podstawie

* Mgr inż. Wojciech Borkowski, wojciech.borkowski@pwr.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0001-5906-0874> – Katedra Obrabiarek i Technologii Mechanicznych, Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, Polska
Mgr inż. Paweł Piórkowski, pawel.piorkowski@pwr.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0002-7880-0222> – Katedra Obrabiarek i Technologii Mechanicznych, Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, Polska
Dr hab. inż. Waćław Skoczyński, prof. nadzw. PWR, waclaw.skoczyński@pwr.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0002-7215-7037> – Katedra Obrabiarek i Technologii Mechanicznych, Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, Polska
Inż. Marek Piórkowski, 213971@student.pwr.edu.pl – Katedra Obrabiarek i Technologii Mechanicznych, Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, Polska
Dr inż. Andrzej Roszkowski, andrzej.roszkowski@pwr.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0003-4337-6262> – Katedra Obrabiarek i Technologii Mechanicznych, Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, Polska

decyzji dotyczących strategii obróbkowych [5]. Istnieją modele, które problem zużycia energii przez obrabiarki skrawające traktują znacznie szerzej, z uwzględnieniem m.in. takich wielkości, jak ilość energii konieczna do wykonania narzędzi skrawających czy poszczególnych komponentów maszyny [6]. Większość ze stosowanych obecnie modeli energochłonności, uwzględniających zużycie energii przez poszczególne komponenty maszyny, nie są dokładne w przypadkach, gdy w zakładzie produkcyjnym pojawiają się zróżnicowane zadania produkcyjne [7]. Są jednak modele, które za pomocą analizy wielokryterialnej nie tylko pozwalają na oszacowanie zużycia energii elektrycznej, lecz także na podstawie dostępnych baz danych pomagają w podjęciu decyzji dotyczącej strategii obróbkowej, zapewniającej wykonanie przedmiotu zgodnie z wymaganiami klienta i przy zużyciu jak najmniejszej ilości energii elektrycznej [8].

Istnieje zatem taka strategia obróbkowa, która jest optymalna pod względem zużycia energii elektrycznej [9]. Aby ją opracować, konieczna jest szczegółowa analiza wpływu parametrów procesu skrawania na energochłonność maszyn skrawających [10]. Dotyczy to zwłaszcza wdrażania nowych strategii obróbkowych oraz obróbki nowych materiałów [11].

Metodologia badań

Celem badań było wyznaczenie wzoru, za pomocą którego będzie można określić energochłonność pionowego centrum frezarskiego VF-7/50 podczas frezowania stali C45+N. Pionowe centrum frezarskie VF-7/50 (rys. 2) pozwala na skrawanie z maksymalnym momentem obrotowym 460 Nm. Maksymalna prędkość obrotowa wrzeczona wynosi 7500 obr/min.



Fig. 2. VF-7/50 vertical milling center
Rys. 2. Pionowe centrum frezarskie VF-7/50

Aby zrealizować cel badań, do maszyny podłączono analizator jakości zasilania Sonel PQM-701 (rys. 3). Sposób akwizycji danych szczegółowo opisano w pracy [12].

Przy pomocy analizatora jakości zasilania można określić ilość energii elektrycznej, którą pobiera maszyna w dowolnej chwili podczas pracy. Część wyników zarejestrowanych na analizatorze posłużyła do opracowania wzoru, a część do jego weryfikacji.

Podczas pomiarów modyfikowano trzy wielkości:

- szerokość skrawania (opisaną jako procent średnicy narzędzia skrawającego),
- średnicę narzędzia skrawającego,
- prędkość skrawania.

Szerokość skrawania zmieniała się w zakresie $10 \pm 100\%$, średnica narzędzia – 25 ± 80 mm, a prędkość skrawania – 160 ± 320 m/min. Próbkę o wymiarach $60 \times 120 \times 320$ mm wykonano ze stali C45+N. Głębokość skrawania była równa 3 mm, a posuw na ząb wynosił 0,15 mm/obr.

Do badań użyto płytek skrawających firmy Sandvik o oznaczeniu R390-1704.16M-PM 4240. W zależności od średnicy narzędzia skrawano dwiema, trzema, pięcioma lub sześcioma płytkami. W ramach eksperymentu wyznaczono wiele wielkości związanych z energochłonnością obrabiarki, w tym tę najważniejszą, czyli zapotrzebowanie obrabiarki na energię elektryczną dla każdej z prób.

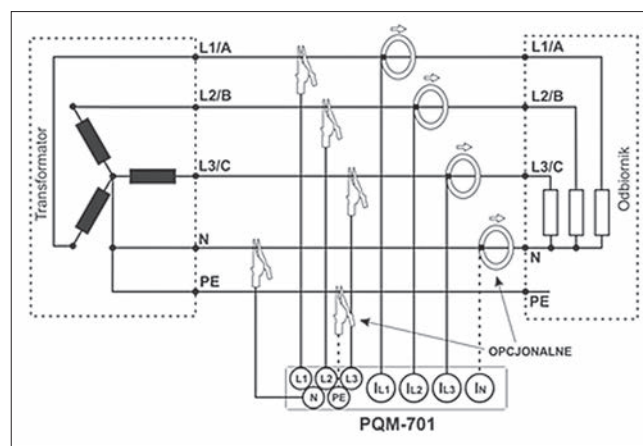


Fig. 3. Connection diagram for the Sonel PQM-701 power quality analyzer to the machine's cables [13]

Rys. 3. Schemat podłączenia analizatora jakości zasilania Sonel PQM-701 do przewodów obrabiarki [13]

W celu określenia zależności pomiędzy parametrami obróbki skrawaniem a zapotrzebowaniem obrabiarki na energię elektryczną posłużono się metodą regresji liniowej. Ustalono poziom ufności równy 0,99 i uzyskano dopasowanie krzywej R-kwadrat wynoszące 0,91.

Otrzymany wzór miał następującą postać:

$$E = a \cdot t + V \cdot 0,831617$$

gdzie: E – zapotrzebowanie obrabiarki na energię elektryczną, a – współczynnik zależny od parametrów skrawania, t – czas skrawania, V – objętość materiału skrawanego.

Weryfikacja oceny energochłonności

Zweryfikowano prawidłowość uzyskanego wzoru empirycznego dla 100 różnych kombinacji parametru skrawania, z uwzględnieniem każdej ze zmienianych wielkości osobno jako zmiennej niezależnej. Błąd względny w poszczególnych przypadkach wahał się od 0 do 7% (tabl. I). Podobną analizę wykonano dla dwóch pozostałych zmiennych niezależnych.

Następnie określono średni błąd względny dla każdej ze zmienianych wielkości traktowanych jako zmienne niezależne. W przypadku prędkości skrawania średni błąd względny wahał się od 0,0235 do 0,04096 (tabl. II). Dla średnicy narzędzia średni błąd względny osiągał wartość od 0,02258 do 0,03896 (tabl. III). Średni błąd względny dla różnych szerokości skrawania obejmował zakres od 0,0097 do 0,04070 (tabl. IV). Całkowity średni błąd względny wyliczony według wyznaczonego wzoru empirycznego wynosił zaledwie 0,029 i był kilkakrotnie mniejsza w porównaniu z błędami wyznaczanymi ze wzorów udostępnianych przez firmy narzędziowe.

TABLE I. Relative error values for individual variants of the tool diameter d and cutting speed v_c [14]

TABLICA I. Wartości błędów względnego dla poszczególnych wariantów średnicy narzędzia d oraz prędkości skrawania v_c [14]

d [mm]	v_c [m/min]	Błąd względny
25	160	0,06398
40	160	0,04195
63	160	0,04308
80	160	0,01482
25	200	0,01939
40	200	0,00161
63	200	0,04259
80	200	0,06134
25	240	0,00342
40	240	0,05100
63	240	0,04334
80	240	0,02332
25	280	0,01460
40	280	0,00568
63	280	0,03899
80	280	0,03475
25	320	0,01150
40	320	0,01436
63	320	0,02280
80	320	0,05082

TABLE II. Values of average relative error for individual cutting speeds v_c [14]

TABLICA II. Wartości średniego błędów względnego dla poszczególnych prędkości skrawania v_c [14]

v_c [m/min]	Średni błąd względny
160	0,04096
200	0,03123
240	0,03027
280	0,02350
320	0,02487

TABLE III. The average relative error values for individual tool diameters d [14]

TABLICA III. Wartości średniego błędów względnego dla poszczególnych średnic narzędzia d [14]

d [mm]	Średni błąd względny
25	0,02258
40	0,02292
63	0,03816
80	0,03701

TABLE IV. Values of average relative error for individual cutting widths a_e

TABLICA IV. Wartości średniego błędów względnego dla poszczególnych szerokości skrawania [14]

a_e [%]	Średni błąd względny
10	0,02945
25	0,00970
50	0,01666
75	0,03424
100	0,04070

Podsumowanie

Jak wykazano, na podstawie prób skrawania można opracować dokładny wzór pozwalający opisać zależność pomiędzy zapotrzebowaniem obrabiarki na energię elektryczną a parametrami skrawania. Na tej podstawie można prognozować, monitorować i przede wszystkim modyfikować zużycie energii elektrycznej w zakładzie produkcyjnym. Dane pozyskane podczas takich prób skrawania mogą zostać wykorzystane do stworzenia baz danych i systemów eksperckich, ułatwiających obróbkę ubytkową z niższym zużyciem energii [15].

Błąd bezwzględny, jaki uzyskano podczas weryfikacji wzoru empirycznego, jest wielokrotnie niższy niż błędy wyznaczone według typowych zależności, które można znaleźć w literaturze lub instrukcjach firm produkujących narzędzia. Tak duża dokładność wzoru wynika jednak z faktu, że opracowano go dla konkretnej maszyny i konkretnego materiału. W ramach dalszych prac autorzy planują rozszerzenie zakresu badań o próby skrawania z wykorzystaniem innych materiałów i innych obrabiarek, a także rozszerzenie wzoru empirycznego o zmienną wynikającą z oporu skrawania materiału (ta zmienna powinna wpływać liniowo na zmianę wartości zapotrzebowania maszyny na energię elektryczną).

Badania z wykorzystaniem innych maszyn – zarówno frezarek sterowanych numerycznie, jak i innych obrabiarek skrawających – pozwolą na określenie wpływu napędu maszyny na jej zapotrzebowanie na energię elektryczną.

W toku badań zaobserwowano, że energochłonność pionowego centrum frezarskiego zależała od biegu, na którym pracowało. Po przeprowadzeniu odpowiedniej próby skrawania będzie można uwzględnić we wzorze empirycznym również tę zmienną, istotną z punktu widzenia energochłonności.

We wzorze empirycznym sumowane są dwa składniki – zależne i niezależne od procesu skrawania. Ten podział ułatwi szybkie i dokładne oszacowanie zapotrzebowania na energię elektryczną w dużym zakładzie produkcyjnym.

Zaprezentowane w artykule wyniki badań zaowocowały nawiązaniem współpracy z jednym z dużych zakładów produkcyjnych na terenie Polski.

LITERATURA

- [1] Seow Y., Rahimifard S. "A framework for modelling energy consumption within manufacturing systems". *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 4 (2011): 258–264.
- [2] Behrendt T., Zein A., Min S. "Development of an energy consumption monitoring procedure for machine tools". *CIRP-Annals Manufacturing Technology*. 61 (2012): 43–46.
- [3] Gutowski T., Dahmus J., Thiriez A. "Electrical energy requirements for manufacturing processes". *Proceeding of 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, Leuven, Belgium, 31.06.2006: 623–628.
- [4] Avram O.I., Xirouchakis P. "Evaluating the use phase energy requirements of a machine tool system". *Journal of Cleaner Production*. 19 (2011): 699–711.
- [5] Rajemi M.F., Mativenga P.T., Aramcharoen A. "Sustainable machining selection of optimum turning conditions based on minimum energy considerations". *Journal of Cleaner Production*. 18 (2010): 1059–1065.
- [6] Mori M., Fujishima M., Inamasu Y., Oda Y. "A study on energy efficiency improvement for machine tools". *CIRP Annals Manufacturing Technology*. 60 (2011): 145–148.
- [7] Draganescu F., Gheorghe M., Doicin C.V. "Models of machine tool efficiency and specific consumed energy". *Journal of Materials Processing Technology*. 141 (2013): 9–15.
- [8] He Y., Liu B., Zhang X., Gao H., Liu X. "A modeling method of task-oriented energy consumption for machining manufacturing system". *Journal of Cleaner Production*. 23 (2012): 167–174.
- [9] Mouzon G.C., Yildirim M.B. "A framework to minimize total energy consumption and total tardiness on a single machine". *International Journal of Sustainable Engineering*. 1 (2008): 105–116.
- [10] Borkowski W., Skoczyński W., Piórkowski P., Jankowski T., Roszkowski A., Foremniak M. "Influence of parameters of milling process on the energy consumption of machine tool". *Advances in Science and Technology Research Journal*. 12, 3 (2018): 24–31.
- [11] Chudy R., Grzesik W. "Comparison of power and energy consumption for hard turning and burnishing operations of 41Cr4 steel". *Journal of Machine Engineering*. 15, 4 (2015): 113–120.
- [12] Roszkowski A., Skoczyński W., Foremniak M., Piórkowski P., Borkowski W., Jankowski T. "Metoda identyfikacji sygnałów zasilania w badaniach energochłonności obrabiarek". *Mechanik*. 1 (2019): 38–41.
- [13] Analizator jakości zasilania PQM-701. Instrukcja obsługi. 2014: 22.
- [14] Piórkowski M. „Metoda oceny energochłonności obrabiarek CNC”. Praca dyplomowa inżynierska. Wrocław, 2018.
- [15] Newman S.T., Nassehi A., Imani-Asrai R., Dhokia V. "Energy efficient process planning for CNC machining". *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 5, 2 (2012): 127–136. ■