



Optimization of energy intensity of machine tools for cutting operations

Krzysztof JAROSZ¹, Piotr LÖSCHNER¹

¹ Faculty of Mechanical Engineering, Opole University of Technology, Department of Manufacturing Engineering and Automation; Opole, 76 Prószkowska Street, 45-758 Opole, tel.: +48 774498482, fax: +48 77 449 99 06, e-mail: pleszner@op.pl

Abstract

In this paper, solutions for optimizing energy intensity of machine tools were presented. In the introduction, the concept of energy intensity was explained, along with energy consumption of machining industry and main factors affecting it. In the main part of this work energy consumption of machine tools was discussed on account of their construction features, type of machining processes and energy intensity of ancillary processes and devices. Possibilities for improvements in energy intensity of machine tools at three product life cycle stages (design, manufacturing and operation) were presented and discussed.

Keywords: energy intensity, machining, machine tools

Streszczenie

Optymalizacja energochłonności maszyn technologicznych dla procesów skrawania.

W pracy przedstawiono rozwiązania optymalizujące energochłonność obrabiarek skrawających. We wstępie omówione zostało pojęcie energochłonności, zużycie energii przez przemysł wytwórczy oraz wpływające na nie czynniki. W głównej części pracy opisano zużycie energii elektrycznej przez obrabiarkę ze względu na jej cechy konstrukcyjne, rodzaj prowadzonego procesu obróbkowego, a także energochłonność procesów oraz urządzeń pomocniczych. Rozpatrywano również możliwości poprawy energochłonności w trzech fazach cyklu życia obrabiarki (projektowanie, wytwarzanie, eksploatacja).

Słowa kluczowe: energochłonność, skrawanie, obrabiarki

1. Wstęp

Rosnące wymagania w stosunku do poszanowania naturalnych źródeł energii znacząco wpływają na wzrost cen tych surowców, co przekłada się w sposób bezpośredni na koszty wytworzenia energii elektrycznej. Stąd też dążenie do osiągnięcia jak najniższej energochłonności procesów wytwórczych.

Energochłonność w pojęciu ogólnym wyraża stosunek energii włożonej w określone działanie do efektu tego działania. Energochłonność produkcji przemysłowej odzwierciedla relację nakładów do efektów, gdzie przez nakład rozumieć należy wielkość energii zużyte w procesie produkcyjnym (w skali przedsiębiorstwa/przemysłu). Efektem zaś jest wielkość produkcji, w której ta energia została zużyta.

W przypadku energochłonności wytwarzania wyrobów bardzo istotną rolę odgrywa również wybór obrabiarki. Przewiduje się, że w kolejnych latach energochłonność będzie stanowić jeden z podstawowych parametrów technicznych zapewniających producentom konkurencyjność na rynku obrabiarek. W praktyce przemysłowej wdrażane jest pojęcie efektywnego wytwarzania w znaczeniu zarówno energetycznym, jak i surowcowym. W przemyśle wytwórczym efektywność produkcji ma z perspektywy ochrony środowiska kluczowe znaczenie, ponieważ sektor ten należy do najbardziej energochłonnych. Aktualnie sektor wytwórczy we wszystkich gałęziach przemysłowych zużywa około 30% wyprodukowanej globalnie energii. Ma on również znaczący udział w emisji

CO₂, wynoszący aż 36%. Natomiast w skali krajowej w roku 2009 na całkowitą emisję wynoszącą około 287 mln ton CO₂, 74 mln ton wywodzi się w przemyśle wytwórczego oraz budowlanego [1]. Przemysł krajowy charakteryzuje się nadmierną energochłonnością, którą powodują m.in.:

- niedoskonałość termodynamiczna procesów produkcyjnych,
- niewłaściwa eksploatacja urządzeń wytwórczych i użytkowych,
- nadmierna energochłonność procesów produkcyjnych,
- niedostateczna sprawność odbiorników energii,
- niedostateczne wykorzystanie energii odpadowej i surowców wtórnych [1].

2. Energochłonność obrabiarki

Główny wpływ na ilość energii elektrycznej zużywanej przez obrabiarki mają jej cechy konstrukcyjne, rodzaj prowadzonego procesu obróbkowego, a także energochłonność procesów oraz urządzeń pomocniczych. Warto zauważyć, iż na realizację podstawowego zadania obrabiarki, czyli procesu skrawania zużywane jest tylko około 20% całej pobieranej przez nią energii. Pozostała część energii zużywana jest przez szereg urządzeń pomocniczych. Nadmienić należy, iż niektóre z nich zużywają energię również podczas postoju obrabiarki. Spośród urządzeń pomocniczych największą ilość energii zużywają m.in. wysokociśnieniowe układy chłodząco-smarujące (około 22%), a także urządzenia dzięki którym podawane są media do układu, tj.:

- ciecz chłodząco-smarująca (CCS) na parę tribologiczną,
- czynnik chłodzący na silniki: napędu ruchu głównego i posuwowego (w sumie około 19%).

Warto zauważyć, że 13% energii pobierane jest przez napędy ruchów posuwowych. Główna jej część wykorzystywana jest na pokonanie oporów ruchu oraz sił bezwładności w trakcie ruchu. Pozostałą część energii pobierają pozostałe aparaty i mechanizmy pomocnicze, takie jak: transportery wiórów, układy hydrauliczne i elektryczne, wyciągi gazów czy systemy wymiany narzędzi [2].

Należy też wspomnieć, że przy zastosowaniu obróbki z wysokociśnieniowym chłodzeniem większa część wydatku chłodziwa jest niewykorzystana i wraca do zbiornika. Związana z tym strata energii szacowane są rocznie na poziomie ponad 8000 kWh. Wydatek energetyczny pompy należy więc minimalizować. Dlatego też ta technologia chłodzenia jest coraz rzadziej stosowana, a zastosowanie znajdują rozwiązania innowacyjne w tym zakresie. Dotyczą one np.:

- wyłączenia silnika napędu pompy podającej CCS w czasie przerw w procesie skrawania;
- podawania minimalnej ilości cieczy (fizycznie) do układu w technologiach MQL czy MQCL.

Alternatywą wydawałoby się zastosowanie gazu jako medium chłodzącego (sprężone: powietrze, CO₂, azot). Mało kto zdaje sobie sprawę, że energia sprężonego powietrza jest kosztowniejsza niż energia elektryczna. Koszt (energetyczny) sprężonego gazu odgrywa znaczącą rolę ze względu na ilość energii elektrycznej zużytej do jej wytworzenia. Sprężone powietrze ma szerokie praktyczne zastosowanie, przykładowo do zasilania siłowników pneumatycznych. Przeznaczone ono jest również do zabezpieczania elementów maszyn przed przenikaniem do nich wilgoci. Koszty sprężonego powietrza są jednak trudne do zmniejszenia - związane jest to z tym, że jego dopływ nie powinien być odłączany podczas postojów obrabiarki ze względu na możliwość tworzenia się kondensatu w układzie, co ma niekorzystny wpływ na instalację pneumatyczną [2].

Kolejnym elementem, w którym dąży się do ograniczenia zużywania energii elektrycznej są silniki elektryczne. Coraz częściej stosuje się układy o podwyższonym stopniu sprawności tzn. silniki energooszczędne. W efekcie zastosowanych w nich rozwiązań uzyskano co następuje:

- lepsza przewodność ze względu na mniejsze straty w klatce wirnika;
- mniejsze straty mechaniczne (wentylacja i tarcie w łożyskach) – wentylatory o mniejszej wielkości, wyższa jakość smarowania łożysk;
- mniejsze straty w rdzeniu – większa ilość i lepsza jakość blachy elektrotechnicznej;
- mniejsze straty dodatkowe – usprawniony profil żłobków, lepszej jakości wypełnienie [3].

W Instytucie Technologii Maszyn i Automatykacji na Politechnice Wrocławskiej prowadzone były badania nad ograniczeniem strat mocy w łożyskach obrabiarek, a co za tym idzie także i nad zużyciem energii przez obrabiarki. Stwierdzono, że zmniejszenie ich zapotrzebowania na energię wymaga ograniczenia ilości podawanego na łożyska środka smarnego do niezbędnego minimum. Istotnym czynnikiem jest także dobór

medium odpowiedniego dla konkretnego rodzaju obróbki. Korzystnym z punktu widzenia minimalizacji energochłonności rozwiązaniem jest także zastosowanie smaru plastycznego w charakterze czynnika smarującego [3].

3. Możliwości zmniejszenia energochłonności obrabiarek

Sposobów na redukcję zapotrzebowania obrabiarek na energię elektryczną poszukiwać należy na każdym z 3 etapów cyklu życia obrabiarki, a więc w fazie projektowania, wytwarzania, a także eksploatacji.



Rys. 3.1. Możliwości redukcji energochłonności obrabiarek skrawających w cyklu życia produktu, oprac. własne.

3.1. Faza projektowania obrabiarki

Już w jej początkowym stadium wskazane jest możliwie precyzyjne określenie przeznaczenia konstruowanej maszyny technologicznej. Dobór parametrów obrabiarki poprzez przyjęcie jako kryterium spektrum jej zastosowania pozwala uniknąć sytuacji, w której niewykorzystana pozostaje znacząca część dostępnej w układzie mocy. Wśród producentów obrabiarek stosowanie konkretnych rozwiązań konstrukcyjnych często powodowane jest niekonięcznie realnymi potrzebami klienta. Nierzadko nadrzędnym celem jest możliwość zaoferowania obrabiarki o parametrach technicznych podobnych bądź lepszych niż u konkurencji. Dowodzić tego może fakt, że w ponad 80% przypadków do obróbki jest wykorzystywane zasadniczo mniej niż 50% dostępnej mocy obrabiarki [2].

W celu zmniejszenia energochłonności obrabiarek stosuje się szereg rozwiązań konstrukcyjnych [1, 2, 4]:

- smarowanie łożysk tocznych przy użyciu układów doprowadzających zredukowaną ilościowo, w porównaniu do rozwiązań konwencjonalnych, ciecz obróbkową. Stosuje się również powietrzno-olejowe układy smarowania oraz smary stałe. Skutkiem niniejszych rozwiązań jest zmniejszenie tarcia w łożyskach obrabiarki, co w konsekwencji prowadzi do mniejszych strat mocy;
- zastosowanie jednego systemu do chłodzenia wodnego szafy sterowniczej, układu hydraulicznego i wrzeciona obrabiarki. Poza oczywistą redukcją ilości cieczy chłodniczej zużywanej w 1, a nie w 3 odrębnych cyklach chłodzenia, dodatkową zaletą tego rozwiązania jest oszczędność kosztów i krótszy czas serwisowania obrabiarki;
- dwa wrzeciona w układzie TWIN pozwalające na wytwarzanie przedmiotów parami. Dzięki zmniejszeniu liczby ruchów jałowych i roboczych wykonywanych przez obrabiarkę w porównaniu z

wykonywaniem dwóch przedmiotów na dwóch osobnych obrabiarkach konwencjonalnych możliwe są znaczne oszczędności energii. Pobór mocy dla obrabiarki dwuwrzecionowej w układzie TWIN jest 20% niższy w porównaniu z parą obrabiarek jednowrzecionowych wykonującą pojedyncze przedmioty;

- szafy sterownicze chłodzone powietrzem z otoczenia. Dzięki specjalnym rozwiązaniom konstrukcyjnym chłodzenie odbywa się niewymuszonym obiegiem powietrza przepływającego przez szafę, co pozwala na rezygnację z wentylatorów;
- zastosowanie serwonapędów podwyższonej sprawności o konstrukcji powodującą redukcję strat energii w silniku elektrycznym- uzyskiwana sprawność rzędu 98÷99%;
- implementacja systemów odzysku energii Energy Recovery działających w sposób podobny do stosowanych w motoryzacji systemów KERS (Kinetic Energy Recovery System). Systemy te odzyskują energię podczas hamowania, pozwalając na jej ponowne wykorzystanie przy przyspieszaniu. Oszczędności energii, zależnie od czasu obróbki i rodzaju przedmiotu, mogą sięgać do 25%;
- zastosowanie transformatorów oraz zaworów układów hydraulicznych i pneumatycznych o zmniejszonym zapotrzebowaniu na energię elektryczną (moc elektrozaworów rzędu 8 W). W porównaniu z rozwiązaniami starszego typu oszczędności energii dochodzą do 70%;
- redukcja mas elementów obrabiarek. Zmniejszenie mas elementów strukturalnych i napędowych obrabiarek przekłada się na ograniczenie strat energii. Przykładem rozwiązań dążących do poszukiwania oszczędności energetycznych poprzez redukcję masy obrabiarek jest projekt Ecofit. W ramach tego projektu założono znaczną redukcję mas elementów obrabiarek (rzędu 70%) bez negatywnego wpływu na dokładność obróbki. W ramach projektu zostały przyjęte dwie strategię: pierwsza, polegająca na stosowaniu nowatorskich materiałów cechujących się niższą masą oraz druga, zakładająca oszczędności materiałowe dzięki optymalizacji struktury obrabiarek. W ramach pierwszej strategii w miejsce konwencjonalnych materiałów zastosowano przykładowo stopy tytanu, stopy aluminium czy polimerobetonu. Natomiast przy optymalizacji struktury podzespołów założono redukcję ich masy przy jak najmniejszych zmianach właściwości statycznych i dynamicznych. Kolejnym przedsięwzięciem mającym na celu redukcję energochłonności obrabiarek poprzez redukcję mas ich elementów jest projekt DEMAT (Dematerialised Production System).

3.2. Faza wytwarzania obrabiarki

Na tym etapie życia obrabiarki oszczędności energii poszukiwać można poprzez stosowanie rozwiązań cechujących się niższym zapotrzebowaniem na energię przy wytwarzaniu. Jak podaje Honczarenko [2] ilość energii potrzebna do wytworzenia korpusu z polimerobetonu jest o około 84% niższa niż potrzebna do wytworzenia analogicznego korpusu ze stali i około 79% niższa aniżeli dla korpusu wykonanego z żeliwa szarego.

3.3. Faza eksploatacji obrabiarki

Szereg rozwiązań technicznych oraz pakietów oprogramowania opisanych w niniejszym rozdziale pozwala na zmniejszenie energochłonności obrabiarki podczas jej eksploatacji. Wśród stosowanych rozwiązań wyszczególnić możemy [1, 2, 5]:

- rezygnację z tradycyjnych metod stosowania chłodziwa lub obróbka z jego minimalnym wydatkiem. Całkowita eliminacja stosowania chłodziwa z procesu technologicznego wydaje się bardzo pożądana nie tylko ze względów ekologicznych, lecz także ze względu na możliwość znacznego ograniczenia wielkości strat energii. Jednakże wyeliminowanie chłodziwa z obróbki skrawaniem nieuchronnie prowadzi do wzrostu temperatury w strefie skrawania, co skutkuje występowaniem odkształceń termicznych układu OUPN (obrabiaarka-uchwyt-przedmiot-narzędzie). Prowadzi to do problemów z osiągnięciem wymaganej dokładności wymiarowo-kształtowej i własności warstwy wierzchniej przedmiotu, a także jest przyczyną przyspieszonego zużycia się narzędzi skrawających. W związku z występowaniem szeregu problemów przy skrawaniu na sucho mało prawdopodobnym jest jego upowszechnienie się w przemyśle wytwórczym w najbliższym czasie;

- implementację oprogramowania powstałego z myślą o zminimalizowaniu zużycia energii przez obrabiarkę. Zainstalowane na obrabiarence CNC oprogramowanie tego rodzaju pozwala na monitorowanie zużycia i odzyskiwania energii przez napędy jej osi w czasie rzeczywistym (podczas trwania obróbki). Istnieją także programy pozwalające na optymalizację procesów skrawania. Przykładem takiego rozwiązania jest pakiet oprogramowania inżynierskiego Production Module 2D/3D firmy AdvantEdge. Production Module pozwala na optymalizację uprzednio wczytanego programu obróbki, jego weryfikację i optymalizację względem kryteriów takich jak składowe siły skrawania czy moc na wrzecionie obrabiarki. Program dostarcza szeregu informacji o przebiegu obróbki w postaci wykresów, zaś zmiany parametrów można obserwować w czasie rzeczywistym. Dzięki zastosowaniu optymalizacji uzyskać możemy skrócenie czasu obróbki, a także wyrównanie wartości obciążenia napędu obrabiarki, co przekłada się na oszczędności energii;
- zastosowanie metod sterowania zorientowanych na oszczędności energii. W ramach realizowanego w latach 2009-2015 projektu ECOMATION założono opracowanie metod redukcji energochłonności obrabiarek przez stosowanie odpowiedniego sterowania ich funkcjami oraz przebiegiem procesu produkcyjnego;
- zastosowanie analizy LCA (Life Cycle Assessment) do oceny korzyści dla środowiska wynikających ze stosowania wspomnianej na początku tego rozdziału metody chłodzenia z minimalnym wydatkiem cieczy smarująco-chłodzących (MQL, MQC). Badania takie przeprowadzane są dla porównania obróbki z tradycyjnym chłodzeniem (TFC- Total Flood Cooling) oraz z minimalnym wydatkiem CCS (MQL). Badania eksperymentalne przeprowadzone zgodnie z normą ISO 14040-44(2006) wykazały, iż oprócz korzyści dla środowiska, MQL jest korzystne również z punktu widzenia otrzymywanej jakości powierzchni i wydajności obróbki skrawaniem, jednocześnie ułatwiając utrzymanie czystości maszyny oraz usuwanie wiórów [6].

Z kolei funkcja *Standby* polegająca na wyłączaniu podzespołów podczas przerw w obróbce i okresów bezczynności obrabiarki, co przekłada się na wyeliminowanie poboru mocy na biegu jałowym. Oszczędności energii wynikają ze znaczącego udziału czasu oczekiwania w czasie pracy maszyny technologicznej. Zastosowanie funkcji *Standby* do wyłączania zasilania silnika pompy wysokociśnieniowego układu doprowadzania cieczy chłodząco-smarującej bądź układu hydraulicznego może skutkować oszczędnościami zużycia energii rzędu 80%.

4. Podsumowanie

W artykule przedstawione zostały sposoby zmniejszenia energochłonności obrabiarek skrawających. Obszary poszukiwania oszczędności zostały podzielone na trzy zasadnicze części, zgodnie z wyszczególnionym w początkowej części pracy cyklem życia produktu. Rozpatrzone i omówione zostały rozwiązania konstrukcyjne, materiały do produkcji części obrabiarek oraz metody wytwarzania i sterowania mające skutkować redukcją zapotrzebowania obrabiarek na energię elektryczną. Zostało wykazane, iż największych oszczędności energetycznych poszukiwać należy na etapie projektowania obrabiarki poprzez właściwy dobór elementów konstrukcyjnych oraz precyzyjne określenie jej zastosowania w fazie eksploatacji. Właściwe zaprojektowanie obrabiarki pozwala na zmniejszenie jej energochłonności w znacznie szerszym zakresie, niż dobór alternatywnych materiałów konstrukcyjnych bądź zastosowanie dedykowanych redukcji energochłonności systemów sterowania bądź metod obróbki. Niewłaściwie zaprojektowana, bądź dobrana do potrzeb użytkownika końcowego obrabiarka zawsze będzie wykazywać nadmierną energochłonność, którą można zmniejszyć jedynie na drodze zmian strategii obróbki bądź korzystając z opisanego w pracy specjalistycznego oprogramowania. Warto jednak nadmienić, iż modułowa konstrukcja współczesnych obrabiarek skrawających pozwala na doposażenie ich w trakcie eksploatacji w rozwiązania redukujące energochłonność (przykładowo implementacja systemów odzysku energii opisanych w podrozdziale 3.1.).

Literatura

1. Grzesik, W. (2013). Postawy projektowania i optymalizacji ekologicznych procesów obróbki skrawaniem. *Mechanik*, 86, 153-165;
2. Honczarenko, J. (2012). Ekologiczne obrabiarki. *Mechanik*, 85, (5-6), 371-376;

3. Stembalski M. (2010). Sposoby ograniczenia zużycia energii przez obrabiarki skrawające do metali. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, (5), 107-108;
 4. Kott J., Kott M., Szalbierz Z. (2012). Wskaźniki energochłonności w przemyśle. *Zarządzanie i Finanse*, 10, (1, cz. 2), 585-593;
 5. Grzesik W. (2010). *Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych*. Warszawa: WNT;
 6. Ginting, Y. R., Boswell, B., Biswas, W., & Islam, N. (2010). Advancing Environmentally Conscious Machining. *Procedia CIRP*, (26), 391-396.
-