

FRI-1.417-1- MEMBT-06

---

## ENERGY CONSUMPTION AND ENERGY EFFICIENCY OF MACHINE TOOLS – AN OVERVIEW

---

**Assoc. Prof. Krasimir Ivanov, PhD**

Department of Mechanical and Manufacturing Engineering,

“Angel Kanchev” University of Ruse

Phone: +359 082 888 451

E-mail: kivanov@uni-ruse.bg

**Eng. Borislav Tonkovski**

Department of Mechanical and Manufacturing Engineering,

“Angel Kanchev” University of Ruse

Phone: +359 88 878 5554

E-mail: b\_tonkovski@abv.bg

***Abstract:** Being a main source of energy consumption in production systems, globally the machine tools are a base study object for research communities. This paper presents the research methodology, sustainability trends in the manufacturing industry, the technologies for collecting basic information and forecasting the energy effectiveness, as well as the scientific development in this topic. In addition, there is a connection to various economic, ecological and design aspects when developing research of the energy consumption and the effectiveness of machine tools. The results outline the leading countries, institutions, authors and thematic areas in this domain.*

**Keywords:** CNC machining; machine tools; energy; sustainable manufacturing.

### ВЪВЕДЕНИЕ

Нарастването на потреблението на енергия, касаещо социалните, екологичните и икономическите аспекти, е сред водещите световни проблеми на нашето съвремие. Производственият сектор е основен потребител на енергия, понеже е отговорен за приблизително една трета от използването на първична енергия и 38% от емисиите на CO<sub>2</sub> в световен мащаб (според US EIA - 2010 г.). Поради това намаляването на търсенето на енергия на производствените системи е първостепенно значение. След 70-те години на XX век, машините с цифрово програмно управление (CNC) са преобладаващи в промишленостите на индустриалните държави, особено в автомобилостроенето и авиационния и космическия сектор. Освен това, според Liu и др. (2013 г.), тези машини са основните енергоемки устройства в производствените системи. Поради тази причина металорежещите машини са в центъра на вниманието на изследователските общности за постигане на устойчивост на производството по целия свят.

### ИЗЛОЖЕНИЕ

Последните проучвания сочат, че приблизително 80% от всички изследвания в тази област са публикувани в периода от 2007 до 2017 г. (Moreira и др., 2015, Moreira и др., 2018), поради което този е разглеждания период в настоящата статия.

В прогнозният доклад BP Energy Outlook 2035 (2014), между 2012 и 2035 година ще се наблюдава среден растеж на годишното потребление на енергия от 1,5%, т.е. общо ще се увеличи с 41%. Водещите индустриални страни, като Китай, САЩ, Германия, Япония и Индия, отчитат решаващото значение на техния производствен сектор за потреблението на енергия. Китай, се очертава като ключов фактор за растежа на потреблението на енергия през последното десетилетие. Освен това в тази страна в производството се консумират около 50% от цялата произведена електроенергия и се генерират поне 26% от общите емисии на CO<sub>2</sub> (Tang и др., 2006). Заедно САЩ и Китай са източник на над една трета от глобалните емисии на парникови газове (Белия дом, 2014 г.). Тъй като в света е третият по големина

източник на емисии, Индия е подложена на все по-голям натиск за спазване на ангажиментите и целите (NAPCC от Индия, 2008 г.). Промисленият сектор в Германия консумира около 46% от общата енергия в страната (König, 2010). За сравнение, през 2013 г. индустриалният сектор е представлявал 25,1% от крайното потребление на енергия в Европа.

Според Chartered Institute of Managing Accountants (CIMA, 2010 г.) производственият сектор се разглежда като източник на по-силен и по-устойчив растеж с производствени политики в различни направления. Като основен източник на потребление на енергия в производствените системи, металорежещите машини са ключов фактор за постигането на по-голяма устойчивост в този сектор. В индустриите, където металорежещите машини са в основата на производствените процеси, приемането на устойчиви техники като оптимизиране и съкращаване на технологичните процеси, рециклиране на технологичните метални отпадъци, използване на екологични смазочни материали, бои, лакове, смоли и разреждатели, по-устойчиви техники на смазване по време на процесите за обработване, оптимизиране на конфигурацията и размерите на заготовките и минимизиране консумацията на енергия е от голямо значение за постигане на екологични и устойчиви процеси на обработка.

### CNC машини и устойчивост в индустриалния сектор

Наред с транспорта, производствените системи за обработване на суровини и материали са другият основен консуматор на енергия. В употреба са няколко вида машини с ЦПУ, които се използват за обработване чрез стружкоотнемане като струговане, фрезование, пробиване, разстъргване и т.н.; в металообработването като огъване, коване, плазмено рязане, щанцоване, лазерно рязане, формоване, заваряване и др.; при електроискровото обработване и много други.

В тази връзка Международната организация за Стандартизация (ISO) през 2010 г. изготви стандарта за оценка на металорежещите машини Environmental evaluation of machine tools (ISO14955-1, 2014), който включва три основни части:

- a) методология за екодизайн на металорежещи машини
- b) методи за изпитване на енергийната консумацията на металорежещи машини и функционални модули
- c) тестове/тестови процедури за изпитване и параметри за енергийната консумацията на металорежещи машини.

Този ISO стандарт показва, че могат да бъдат приети различни подходи за подобряване на работата на машините.

Newman и др. (2012 г.) посочва, че консумираната енергия при CNC машинна обработка е разделена в различни категории и има отношение не само към задвижването на механичните елементи участващи пряко в процеса на рязане. През последните години бяха разгледани няколко изследователски теми за подобряване на процесите на обработка, които обикновено се оценяват по отношение на потреблението на енергия, производителността и качеството на повърхността. Таблица 1 обобщава някои теми и свързаната с тях работа в тази област.

Таблица 1 Основни направления на изследванията за енергийна ефективност на МРМ (Moreira и др., 2018)

<i>Тематика</i>	<i>Изследвания и публикации</i>
Екодизайн на оборудването/продукта	Braungart и др. (2007), Lopes De Lacalle и др. (2011), Kok-Soo and Sheng (2010), Strano и др. (2013)
Анализ на режимите на рязане и параметрите на процеса	Newman и др. (2012), Rajemi и др. (2010), Xue и др. (2010), Li et Kara (2011)
Технологичен процес (маршрут)/ оптимизиране на пътя на инструмента	Qudeiri и др. (2007), Lazoglu и др. (2009), Kong и др. (2011)

Представяне при обработване/оценка на движение.	Avram and Xirouchakis (2011), Li и др. (2015), Tang и др. (2012)
Мониторинг на обработката.	Wang (2013), Segreto и др. (2013), Behrendt и др. (2012), Hu и др. (2012)
Многоцелева оптимизация на условията на обработването	Wang и др. (2015), Yan and Li (2013)
Производство чрез използване на облачните технологии	Wang (2013), Xu (2012)

Във всичките публикации, независимо от третираната тематика, водещата идея е да се изследва енергийната консумация като основен фактор за енергийната ефективност на металорежещите машини. Прецизното регистриране и описване на консумираната енергия при различните видове машинна обработка е отправната точка за подобряване на енергийната ефективност на производството. Това ще рефлектира върху намаляването на въздействието на металообработващите машини върху околната среда (Li и др., 2015 г.).

### Моделиране на енергийната ефективност на металорежещите машини

В най-общ план енергийното потребление от производствените системи се разглежда като общо количество енергия за определен процес, отнесено към произведен обем продукция. Тази енергия се разглежда като съставена от: а) пряка консумирана енергия – от главен и подавателни преводи, смяна на инструмента или заготовката, хидравлична и охлаждаща системи и б) като обща консумирана енергия, която освен предходната включва още енергията за контрол и управление, за отделяне на технологичните отпадъци, за съхранение, манипулиране и сглобяване и др.

Според Zhou и др. (2015 г.), разпределението на енергийното потребление в зависимост от метода на обработване и от вида и структурата на металорежещата машина е в основата на оценката на енергийната ефективност. Двете основни направления на изследванията са:

- Многокритериална оптимизация с целева функция консумирана енергия или грапавост, производителност, машинно време, себестойност и т.н.

- Математично моделиране на консумацията на енергия от главния превод или от машината като цяло, при отчитане на множество влияещи фактори.

С най-пряко отношение към темата и хронологично подредени модели са представени в Табл. 2.

Таблица 2. Модели на енергийната консумация при обработване чрез рязане

	Автор	Група	Модел
1	Draganescu и др. (2003)	СЕ	$E_{cs} = \frac{P_c}{60\eta Z}$
2	Li and Kara (2011)	СЕ	$SEC = C_o + \frac{C_1}{MRR}$
3	Mori и др. (2011)	СЕ	$E = P_1(T_1 + T_2) + P_2T_2 + P_3T_3$
4	Diaz и др. (2011)	ДЕ	$E = P_{avg} * \Delta t = (P_{cut} + P_{air}) * \Delta t$
5	Kong и др. (2011)	ДЕ	$E_{machine} = E_{const} + E_{run-time-transient} - E_{run-time-steady} + E_{cut}$
6	Avram и др. (2011)	СЕ	$E_{DE} = \int_{t'_0}^{t'_1} P_{AY}dt + \int_{t'_1}^{t'_2} P_{SY}dt + \int_{t'_2}^{t'_3} P_{AY}dt + \int_{t'_0}^{t'_3} P_{run}dt + \int_{t'_1}^{t'_2} P_c dt$

7	Newman и др. (2012)	СЕ	$e = \frac{P}{f \cdot h \cdot D}$
8	Balogun and Mativenga (2013)	ДЕ	$E = P_b \cdot t_b + (P_b + P_r) \cdot t_r + P_{air} \cdot t_{air} + (P_b + P_r + P_{cool} + k \cdot v) \cdot t_c$
9	Li и др. (2013)	СЕ	$SEC = k_0 + k_1 \cdot \frac{n}{MRR} + \frac{k_2}{MRR}$
10	Peng and Xu (2013)	ДЕ	$E = \sum_{i=1}^n E_{statei} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m E_{statei,componentj}$ $= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_{statei componentj} \cdot t_i$
11	Velchev и др. (2014)	СЕ	$e_{ec} = \frac{P_0}{MRR} + B_0 MRR^{B_1}$
12	Wang и др. (2015)	ДЕ	$E(M_i) = E(M_i)_{idle} + E(M_i)_{working} + E(M_i)_{toolchange} + E(M_i)_{set-up}$

За всички цитирани емпирични модели на енергийна консумация е характерно, че с числените си стойности са валидни само за конкретните условия на експеримента – обработван материал, вид на режещия инструмент, модел и параметри на металоурежещата машина и т.н., което създава определени затруднения пред широкото им практическо приложение.

В редица случаи все по-голяма популярност сред научната общност намират модели на потреблението на енергия, основани на механиката на процеса рязане. При тях за различните подходи за определяне на мощността на рязане като функция на силите на рязане и на скоростта, в комбинация с компютърна симулация (МКЕ) са получени резултати с висока точност (Kadi и др., 2014).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Информацията, получена чрез методологията, базирана на технологиите и прогнозите, показва голям потенциал за подпомагане на развитието на научните изследвания. Междувременно са открити различни подходи за насърчаване на по-добро използване на енергията при обработване чрез рязане, като мониторинг на механичната обработка, моделиране на консумацията на енергия и т.н.

Освен това, тя предполага, че компютърните науки и инженерните области заедно водят до разработване на научни изследвания за повишаване на ефективността на обработването чрез рязане. В обобщение, аспекти като повишаването на цените на енергията, споразуменията за изменението на климата, по-екологичното поведение на предприятията, както и нарастващото търсене на персонализирани продукти водят индустриалния сектор до приемането на стратегии за прилагане на устойчивостта. По този начин енергийната ефективност ще остане световна цел в сектора на преработващата промишленост.

*Тази публикация е разработена (във връзка и) с подкрепата на проект ФМТ 03-2018 от Фонд научни изследвания на Русенския университет „А. Кънчев“.*

### REFERENCES

- Avram, O.I. and Xirouchakis, P. (2011) 'Evaluating the use phase energy requirements of a machine tool system', Journal of Cleaner Production, Vol. 19, Nos. 6–7, pp.699–711.
- Balogun, V.A. and Mativenga, P.T. (2013) 'Modelling of direct energy requirements in mechanical machining processes', Journal of Cleaner Production, Vol. 41, pp.179–186.
- Behrendt, T., Zein, A. and Min, S. (2012) 'Development of an energy consumption monitoring procedure for machine tools', CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 61, No. 1, pp.43–46.
- BP Energy Outlook 2035 (2014) [online] <http://bp.com/energyoutlook/> (accessed 5 December 2015).

Braungart, M., McDonough, W. and Bollinger, A. (2007) '*Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions – a strategy for eco-effective product and system design*', Journal of Cleaner Production, Vol. 15, Nos. 13–14, pp.1337–1348.

Carbon Trust (2015) *CRC Energy Efficiency Scheme* [online] <http://www.carbontrust.com/resources/guides/carbon-footprinting-and-reporting/crc-carbon-reduction-commitment> (accessed 7 December 2015).

Chartered Institute of Management Accountants (CIMA) (2010) *The Global Manufacturing Sector: Current Issues, CIMA Sector Report*, London, ISBN: 978-1-85971-674-8 [online] [http://www.cimaglobal.com/Documents/Thought\\_leadership\\_docs/Global\\_manufacturing\\_report.pdf](http://www.cimaglobal.com/Documents/Thought_leadership_docs/Global_manufacturing_report.pdf) (accessed 7 December 2015).

CNC Cookbook (2015) [online] <http://www.cnccookbook.com/CCCNCMachine.htm> (accessed 3 December 2015).

Diaz, N., Redelsheimer, E. and Dornfeld, D. (2011) '*Energy consumption characterization and reduction strategies for milling machine tool use*', in Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Braunschweig, Germany, pp.263–267.

Draganescu, F., Gheorghe, M. and Doicin, C.V. (2003) '*Models of machine tool efficiency and specific consumed energy*', Journal of Materials Processing Technology, Vol. 141, No. 1, pp.9–15.

Ehmann, K.F., Kapoor, S.G., Devor, R.E. and Lazoglu, I. (1997) '*Machining process modeling: a review*', Journal of Manufacturing Science & Technology, Vol. 119, No. 4B, pp.655–663.

European Commission – *Energy Efficiency Communication (2014) Energy Efficiency and its Contribution to Energy Security and the 2030 Framework for Climate and Energy Policy, COM(2014) 520 Final, Brussels* [online] [http://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2014\\_energy\\_efficiency\\_communication.pdf](http://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2014_energy_efficiency_communication.pdf) (accessed 7 December 2015).

Giret, A., Trentesaux, D. and Prabhu, V. (2015) '*Sustainability in manufacturing operations scheduling a state of the art review*', Journal of Manufacturing Systems, Vol. 37, No. 1, pp.126–140.

Gupta, K., Laubscher, R.F., Davim, J.P. and Jain, N.K. (2015) '*Recent developments in sustainable manufacturing of gears: a review*', Journal of Cleaner Production, Vol. 112, No. 4, pp.3320–3330.

India's National Action Plan on Climate Change (NAPCC) (2008) [online] <http://www.c2es.org/international/key-country-policies/india/climate-plan-summary> (accessed 6 December 2015).

International Organization for Standardization ISO14955-1 (2014) *Environmental Evaluation of Machine Tools*, ISO, Geneva.

Kadi, El.H., Deiab, I.M. and Khattab, A.A. (2014) '*Predicting cutting forces in aluminum using polynomial classifiers*', Eighth International Conference on Materials Sciences, CSM8-ISM5, Physics Procedia, Vol. 55, pp.237–242.

Kong, D., Choi, S., Yasui, Y., Pavanaskar, S., Dornfeld, D. and Wright, P. (2011) '*Software-based tool path evaluation for environmental sustainability*', Journal of Manufacturing Systems, Vol. 30, No. 4, pp.241–247.

König, J. (2010) '*Energieeffiziente Produktherstellung*' in Uhlmann 2012: FUTUR Produktionstechnik für die Zukunft, Vol. 12, No. 2, pp.12–13.

Lazoglu, I., Manav, C. and Murtezaoglu, Y. (2009) '*Tool path optimization for free form surface machining*', CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 58, No 1, pp.101–104.

Li, W. and Kara, S. (2011) '*An empirical model for predicting energy consumption of manufacturing processes: a case of turning process*', in Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, Journal of Engineering Manufacture, Vol. 225, No. 9, pp.1636–1646.

Liu, F., Wang, L.Q. and Liu, G.J. (2013) '*Content architecture and future trends of energy efficiency research on machining systems*', Journal of Mechanical Engineering, Vol. 49, No. 19, p.87.

Lopes De Lacalle, L.N., Zulaika, J.J. and Campa, F.J. (2011) '*An integrated process machine approach for designing productive and lightweight milling machines*', International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 51, Nos. 7–8, pp.591–604.

Li, J., Tang, R., Jia, S. and Liu, Y. (2015) '*Experimental study on energy consumption of computer numerical control machine tools*', Journal of Cleaner Production, Vol. 112, No. 5, pp.3864–3874.

Moreira, L.C., Li, X.X., Li, W.D., Lu, X. and Fitzpatrick, M.E. (2015) '*Research publications on energy consumption and efficiency of machine tools: an overview*', Paper presented at the 16th International Manufacturing Conference in China, Hangzhou, China, 22–25 October.

Mori, M., Fujishima, M., Inamasu, Y. and Oda, Y. (2011) '*A study on energy efficiency improvement for machine tools*', CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol. 60, No. 1, pp.145–148.

Newman, S.T., Nassehi, A., Imani-Asrai, R. and Dhokia, V. (2012) '*Energy efficient process planning for CNC machining*', CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol. 5, No. 2, pp.127–136.

O'Driscoll, E. and O'Donnell, G.E. (2013) '*Industrial power and energy metering – a state-of-the-art review*', Journal of Cleaner Production, Vol. 41, pp.53–64.

Peng, T. and Xu, X. (2013) '*A universal hybrid energy consumption model for CNC machining systems*', in Reengineering Manufacturing for Sustainability: Proceedings of the 20th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Singapore, pp.251–256.

Rajemi, M.F., Mativenga, P.T. and Aramcharoen, A. (2010) '*Sustainable machining: selection of optimum turning conditions based on minimum energy considerations*', Journal of Cleaner Production, Vol. 18, Nos. 10–11, pp.1059-1065.

Schulz, H. and Schiefer, E. (1998) '*Prozessführung und Energiebedarf bei spanenden Fertigungsverfahren*', Zwf, Vol. 93, No. 6, pp.266–271, ISSN: 0947-0085.

Strano, M., Monno, M. and Rossi, A. (2013) '*Optimized design of press frames with respect to energy efficiency*', Journal of Cleaner Production, Vol. 41, pp.140–149.

Tang, D., Dai, M., Salido M. A. and Giret, A. (2015) '*Energy-efficient dynamic scheduling for a flexible flow shop using an improved particle swarm optimization*', Computers in Industry, Vol. 30, No. 3, pp.223–232.

US Energy Information Administration (EIA) (2010) *Annual Energy Review, Technical report DOE/EIA-0384, Office of Energy Statistics, US Department of Energy, Washington, DC*, [online] <http://www.eia.gov/totalenergy/data/annual/archive/038410.pdf> (accessed 03 December 2015).

Velchev, S., Kolev I., Ivanov K., Gechevski S. (2014) '*Empirical models for specific energy consumption and optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption during turning*', Journal of Cleaner Production, Vol. 80, pp.139–149.

Wang, L. (2013) '*Machine availability monitoring and machining process planning towards cloud manufacturing*', CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol. 6, No. 4, pp.263–273.

Wang, S., Lu, X., Li, X.X. and Li, W.D. (2015) '*A systematic approach of process planning and scheduling optimization for sustainable machining*', Journal of Cleaner Production, Vol. 87, pp.914–929.