

INVESTIGATION THE ELECTRICAL POWER QUALITY OF A METALS MELTING ELECTRIC INDUCTION FURNACE

Assist. Svetlozar Grigorov, M.Sc.Eng. – PhD Student

Department of Philological and Natural Sciences, Silistra Branch,
University of Ruse “Angel Kanchev”
E-mail: sgrigorov@uni-ruse.bg

Assoc. Prof. Konstantin Koev, PhD

Department of Electric Power Supply and Electrical Equipment,
Department of Philological and Natural Sciences, Silistra Branch,
University of Ruse “Angel Kanchev”
Phone: +359 82 888/ 201, 661
E-mail: kkoev@uni-ruse.bg

***Abstract:** The paper analyses electric power quality of a steel melting electric induction furnace. The measurements have been made in the second of the furnace transformer, on the LV line. The values of currents, voltages and its harmonics are recorded by three-phase power quality analyser MI 2885 Master Q4. The conclusions of experimental results of electric power quality of the investigated induction furnace are drawn.*

***Keywords:** steel melting electric inductance furnace, electric power quality, harmonics.*

ВЪВЕДЕНИЕ

Енергийната ефективност на електрическите уредби е актуална тема, която е свързана с рационалното използване на енергийните ресурси. Качеството на електрическата енергия влияе на енергийната ефективност и е фактор при експлоатацията на електрическите уредби и съоръжения (Belgaum Foundry Cluster, Gönen, T., 2014, Stefanov, St., V. Ruseva, 2010).

Голяма част от индустриалните обекти, в съответствие с принципа на действие на използваните елементи и уредби, изменят параметрите на електрическата енергия, като понижават качеството ѝ. Такива обекти са металургичните, в които се извършва топене и леене на метали. Основните съоръжения за реализация на тези процеси са електрическите пещи. Те са различни видове, но с много добри характеристики са индукционните. Принципът на работа се основава на топлинното действие на индуктираните вихрови токове в метала, който се разтопява (Iagar, A. et al., 2009). Използват се електронни преобразуватели за повишаване на честотата на захранващото ниско напрежение – например 430 Hz, 1 kHz, 2,5 kHz и др. Електронните преобразуватели на честота са източник на изменения в параметрите на електрическата енергия, а нейното качество е важен фактор за ефективна, надеждна и безопасна работа на уредбите (Kermeli, K. et al. 2016, Rajalakshmi, D. et al. 2019).

Изследвано е (Коев, К., Sv. Grigorov 2021) потреблението на електрическа енергия от електрическа индукционна пещ за топене на метали. Количеството консумирана енергия през годината е голямо и това е предпоставка за изследване влиянието на работата на съоръжението върху захранващата електрическа мрежа.

Целта на изследването е да се проведе предварително измерване и анализ на някои показатели на качеството на електрическата енергия на електрическа индукционна пещ за топене на стомана.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Характеристики на изследвания обект

Електрическата индукционна пещ е без стоманен магнитопровод. Необходимата температура за топене на стоманата е около 1600°C, а масата на разтопения метал може да бъде до 600 kg. Уредбата е с мощност 400 kW и се захранва с трифазно променливо

напрежение 380 V. То се изправя от токоизправител, филтрира се и се преобразува отново в променливо чрез тиристорен инвертор на ток. Честотата на така полученото променливо напрежение е 1 kHz, която е значително по-висока от честотата на напрежението в мрежата 50 Hz. Напрежението с високата честота захранва индукционната пещ. Нейната намотка се изработва от тръбен проводник, по който циркулира вода, за да се осигури необходимия температурен режим.

Измервателна апаратура и методика на измерването

Използван е трифазен анализатор на електрическа енергия MI 2885 Master Q4, производство на фирмата Metrel, Словения (MI 2885 Master Q4, Metrel, 2021). Фирмата е световно доказана в производството на този вид измервателна техника. Уредът измерва всички величини в трифазни или еднофазни мрежи, както и показатели за качеството на електрическата енергия.

Уредът е разработен в съответствие със стандартите за безопасност EN 61010-1 и за електромагнитна съвместимост EN 61326. Измерванията се реализират при спазване изискванията на стандартите EN 50160, IEC/EN 61000-4-15, IEC/EN 61000-4-30 Class S, IEC/EN 61000-4-7 Class I, IEC/EN 61557-12 и IEEE 1459. Анализаторът може да измерва различни величини, като активна, реактивна и пълна мощност; фактор на мощността (power factor) PF; $\cos \varphi$; стойностите на линейни и фазни токове и напрежения; хармоници и интерхармоници на тока и напрежението до 50 номер.

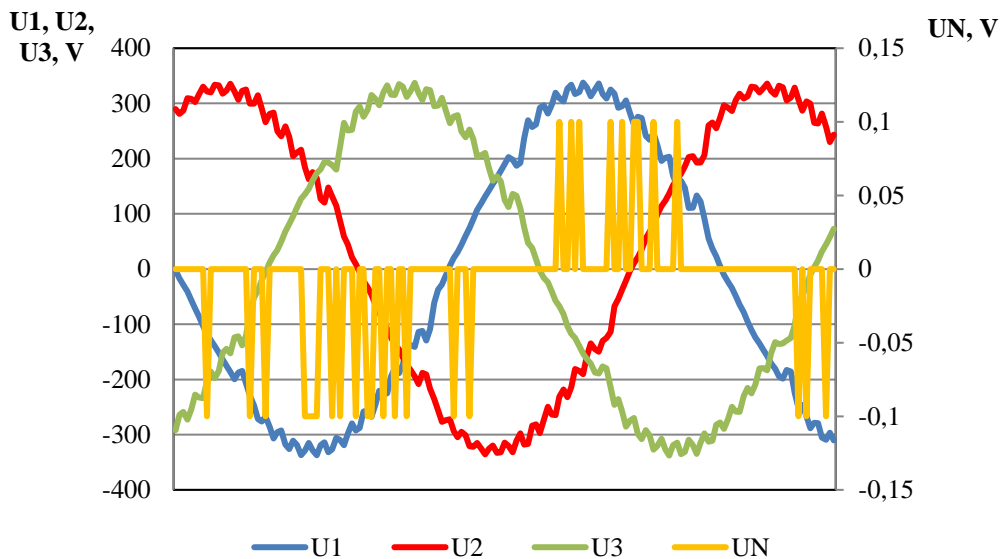
Точността на анализатора при измерване на фазните и линейните напрежения е $\pm 0,1$ % от номиналната стойност. Точността на токовете входове, към които се присъединяват четирите токови измервателни преобразуватели (навивка на Роговски) с обхват от 3...6000 A, е $\pm 1,5$ %, а точността на преобразувателите е ± 1 %. Записите от измерванията се записват в microSD карта, чиято памет може да бъде до 32 GB. Анализаторът може да се свързва към компютър чрез сериен интерфейс RS 232. Други възможности за връзка са чрез USB и Ethernet изходи. Записаните данни се прочитат и анализират на компютър с помощта на специален програмен продукт PowerView.

Параметрите на електрическата енергия се измерват в разпределителна уредба 0,4 kV, на извода, захранващ индукционната пещ. Измерването се провежда за кратък период, по време на процеса топене на стомана.

Изследване на на качеството на електрическата енергия

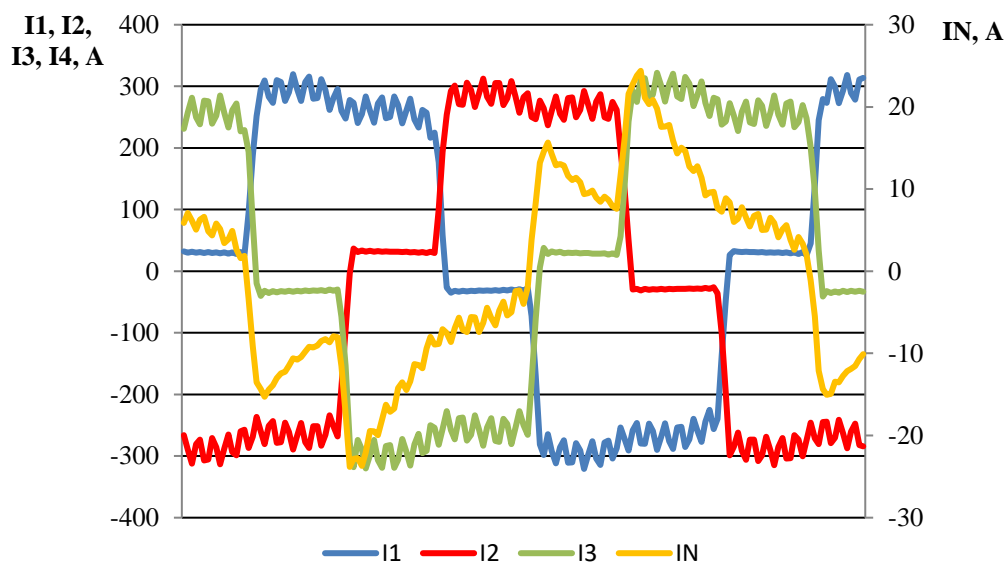
Особен интерес, при анализ на качеството на електрическата енергия, в уредби с полупроводникови преобразуватели, е несинусоидалността на токовете и напреженията (Gönen, T., 2014, Iagar, A. et al., 2009, Rajalakshmi, D. et al. 2019).

На фиг.1 са показани измененията на фазните напрежения в трите фази на четирипроводната захранваща електрическа мрежа (L1, L2, L3, N), при топенето на стоманата в индукционната пещ. Графиките за трите фази са почти еднакви – разликите са много малки и най-вероятно се дължат на изменения в параметрите на електрическите вериги. Формата на напреженията е подобна на синусоидалната, но за голяма част от всеки полупериод на фазните напрежения се забелязват периодични изкривявания с различна амплитуда. Те се дължат на работата на електронните преобразуватели на захранващата уредба на пещта. Размахът на изкривяванията са най-малки (около 3 V) в областта на максималните стойности на фазните напрежения.



Фиг.1. Изменения във формата на напреженията в отделните фазни проводници U_1 , U_2 , U_3 и в неутралния проводник U_N на захранващата мрежа.

Представено е изменението на напрежението на неутралния проводник U_N , което е в много малки граници $(-0,1 \dots 0,1)$ V. Формата на напрежението може да се разглежда като пакети тригълни импулси със стръмни фронтове и малка продължителност, които се появяват при работа на електронните преобразуватели на захранващата уредба на печта. Графиките на токовете в трите фази (фиг.2) се различават много повече от синусоидалната форма, в сравнение с графиките на напреженията (фиг.1). Характерна е правоъгълната форма на токовете, която се дължи на вида на използвания инвертор – на ток. Този вид преобразуватели се характеризират с постоянна стойност на тока през всеки полупериод. В случая стойността на тока не е постоянна, а се изменя периодично в областта на максималните стойности (платото на правоъгълните импулси). Най-големият размах на изкривяванията е около 50 A.



Фиг.2. Изменения във формата на тока в отделните фазни проводници I_1 , I_2 , I_3 и в неутралния проводник I_N на захранващата мрежа.

Изкривяванията на токовете, както и на напреженията, се дължат на работата на електронните преобразуватели.

Изменението на тока в неутралния проводник IN съществено се различава от това на напрежението (фиг.1), а размахът е много по-голям - около 48 А. Във формата на тока се забелязват малки периодични изменения, подобно на тези в областта на максималните стойности на токовете във фазните проводници. Причината е същата, както и при графиките на другите токове и напрежения – работата на електронните преобразуватели.

Деформацията на кривите на токовете и напреженията, в сравнение със синусоидалната форма (фиг.1, фиг.2), се оценяват чрез коефициентите на несинусоидалност по напрежение THD_U (Total Harmonics Distortion of Voltage) и по ток THD_I (Total Harmonics Distortion of Current), в съответствие с (BDS EN 50160:2010/A3:2020). Стойностите на посочените коефициенти се определят по формулите:

$$\text{THD}_U = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{50} U_i^2}}{U_1} \cdot 100, \%, \quad (1)$$

$$\text{THD}_I = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{50} I_i^2}}{I_1} \cdot 100, \%, \quad (2)$$

където U_i (I_i) е ефективната стойност на i-тия хармоник на напрежението (тока);

U₁(I₁) – ефективната стойност на първия хармоник на напрежението (тока).

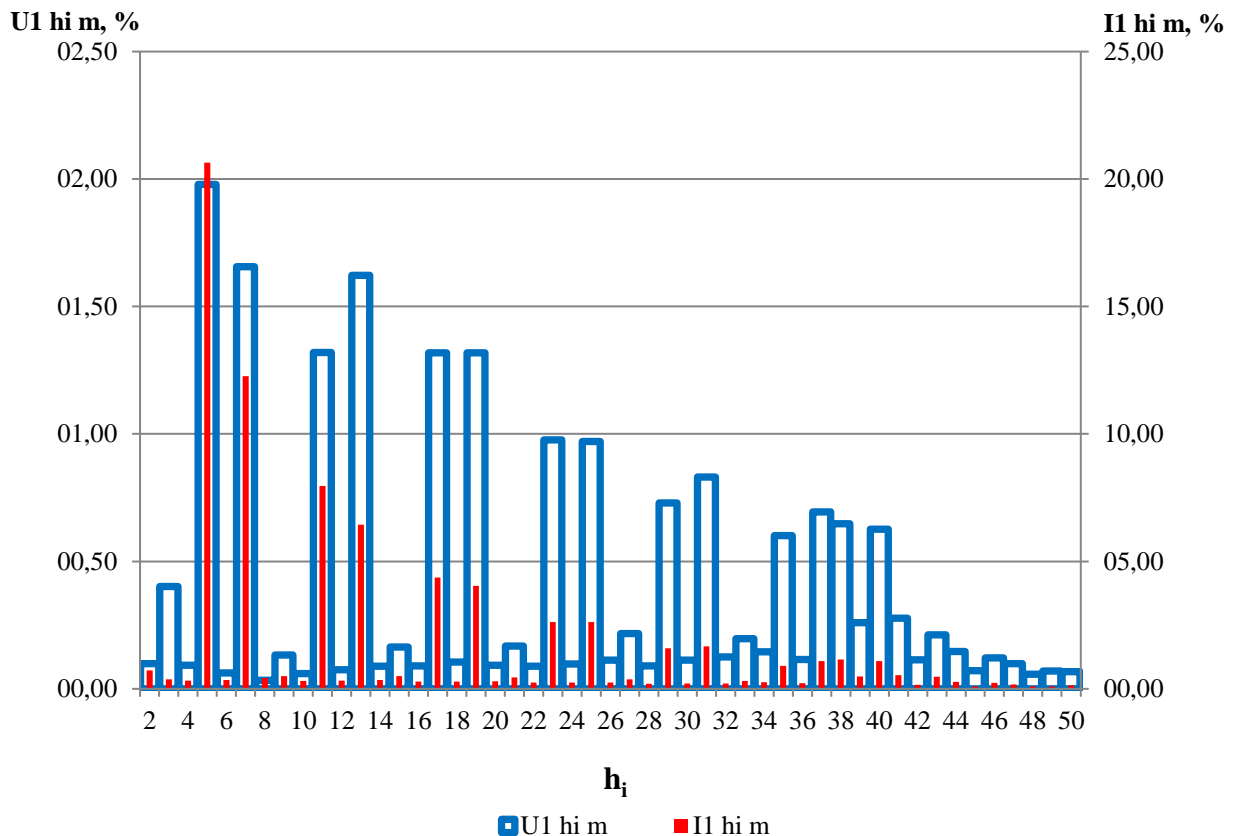
Използваният анализатор на електрическа енергия MI 2885 Master Q4 измерва хармониците до 50-и и представя стойностите на коефициентите на несинусоидалност в абсолютни единици и в проценти, спрямо основния хармоник (първи) (табл.1).

Таблица 1. Стойности на коефициентите на несинусоидалност по напрежение THD_U и по ток THD_I за всяка фаза L1, L2 и L3

№	Коефициенти	Фази на захранващата мрежа		
		L1	L2	L3
1	THD _U , %	4,2	4,1	4,2
2	THD _U , V	9,5	9,4	9,6
3	THD _I , %	27,1	28,3	28,1
4	THD _I , A	58,5	59,9	60,2

Максималните стойности на хармониците на тока и напрежението в първата фаза на захранващата мрежа графично са представени на фиг.3. Показани са относителните стойности спрямо основния хармоник. Той не е представен, за да се виждат по-добре амплитудните стойности на хармониците и да се сравнят.

Най-големите амплитудни стойности са на вторите (h₂) хармоници на напрежението и тока, съответно 2,0 % и 20,6 %.



Фиг.3. Стойности (%) на амплитудите на хармониците на напрежението ($U1\ h_i\ m$) и на тока ($I1\ h_i\ m$) в първа фаза на захранващата мрежа.

Според (BDS EN 50160:2010/A3:2020), стойностите на THD_I не трябва да са по-големи от 8 %. Представените резултати в табл.1 са около 3,5 пъти по-големи от изискваните. Следователно условието за стойностите на THD_I не е изпълнено.

ИЗВОДИ

Проведени са изследвания за качеството на електрическата енергия в електрическа уредба, захранваща електрическа индукционна пещ за топене на стомана. Измерени са големините на токовете и напреженията и хармоничните им съставки.

Установено е, че стойностите на коефициентите на несинусоидалност по напрежение THD_U , за всяка от трите фази, са от 4,07 % (L2) до 4,19 % (L3). Стойностите на коефициентите на несинусоидалност по ток THD_I , за всяка от трите фази, са от 27,11 % (L1) до 28,31 % (L2).

Амплитудните стойности на хармониците на тока 5, 7, 11 и 13 са големи, а за останалите хармоници до 50-и стойностите им не надвишават 5 %.

Необходими са по-продължителни изследвания, за да се даде по-точна и по-пълна представа за качеството на електрическата енергия в разглежданата електрическа уредба, с цел предлагане на решения за повишаване на ефективността на разглеждания обект.

REFERENCES

BDS EN 50160:2010/A3:2020 Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks. (*Оригинално заглавие: БДС EN 50160:2010/A3:2020. Характеристики на напрежението на електрическата енергия, доставяна от обществените разпределителни електрически мрежи.*)

Belgaum Foundry Cluster, Best Operating Practices, A GEF-UNIDO-BEE Project, Promoting Energy Efficiency and Renewable Energy in Selected MSME Clusters in India,

Ministry of New and Renewable Energy, Bureau of Energy Efficiency, MICRO, SMALL & MEDIUM ENTERPRISES, <https://beeindia.gov.in/sites/default/files/BOP-Belgaum.pdf>.

Gönen, T. (2014) Electric Power Distribution Engineering. 3rd Edition, CRC Press, Boca Raton.

Iagar, A., G. N. Popa, C. M. Dinis (2009). Assessment of Power Quality for Line Frequency Coreless Induction Furnaces. WSEAS TRANSACTIONS on CIRCUITS and SYSTEMS, Issue 1, Volume 8, January, ISSN: 1109-2734.

Kermeli, K. et al. (2016). Energy Efficiency and Cost Saving Opportunities for Metal Casting. An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers. Document Number 430-R-16-001. United States Environmental Protection Agency. January.

Rajalakshmi, D., R.Kavitha, K.Premalatha (2019). Harmonic Research and Mitigation Techniques in Induction Furnace. International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), Volume-8 Issue-6S, August 2019, ISSN: 2249 – 8958.

Koev, K., Sv. Grigorov (2021). Investigation the electric energy consumption of an object of metallurgical industry. 60th Science Conference of Ruse University - SSS, Ruse. (*Оригинално заглавие: Коев, К., Св. Григоров (2021). Изследване потреблението на електрическа енергия от индустриален металургичен обект. 60-та научна конференция на Русенския университет „Ангел Кънчев”, Студентска научна сесия).*

Power Quality Analyser MI 2885 Master Q4. Manual. Metrel, 2021.