

FRI-10.326-1-EEEE-01

AN INVESTIGATION OF SOME CHARACTERISTICS OF THE POWER QUALITY OF POWER SUPPLY OF AN INDUSTRIAL INDUCTION FURNACE¹

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

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

Abstract: *The paper analyses some characteristics of electric current of power supply of a metal melting electric inductance furnace. The measurements of some of electric quantities have been made in the second of the furnace transformer and outside of the power electronic converter. The measurements were realized and results were recorded by three-phase power quality analyser MI 2885 Master Q4. The results are presented graphically and the changes in the electric current are analysed. The conclusions of experimental results can to use for development of technical solutions to improve the power quality of the power supply of the investigated induction furnace.*

Keywords: *metals melting electric inductance furnace, electric current, power quality.*

ВЪВЕДЕНИЕ

Електрическата енергия, като всеки продукт, се характеризира с качество. То се определя от специфични параметри и стойностите им трябва да бъдат такива, че да се гарантира надеждно и ефективно електроснабдяване и функциониране на електрическите уредби и съоръжения (Belgaum Foundry Cluster, Gönen, T., 2014, Stefanov, St., V. Ruseva, 2010). Характеристиките на електрическия ток, който протича в електрическите вериги, се използват за оценка на качеството на електрическата енергия (IEC 61000-3-4: 1998).

Металургичните индустриални индукционни електрически пещи обикновено са мощни консуматори на електрическа енергия (десетки и стотици kW). Това определя тяхното значение при анализа на качеството на електрическата енергия. В тези пещи металите се разтапят под влияние на топлинното действие на индуктираните в тях вихрови токове (Iagar, A. et al., 2009). В захранващите системи на тези уредби се използват електронни преобразуватели на честотата на напрежение, които изменят характеристиките на протичащия електрически ток (Rajalakshmi, D. et al. 2019).

Изследвани са някои показатели на качеството на електрическа енергия на мощни индукционни пещи за топене на метали (Grigorov, Sv., K. Koev, 2021, Grigorov, Sv., K. Koev, 2022). Разгледано е влиянието на металургичните съоръжения върху някои величини, които характеризират работата на захранващата електрическа мрежа.

¹ Докладът е представен на пленарната сесия на 28 октомври 2022 с оригинално заглавие на български език: ИЗСЛЕДВАНЕ НА НЯКОИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА КАЧЕСТВОТО НА ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА ЕНЕРГИЯ В ЗАХРАНВАЩАТА МРЕЖА НА ИНДУСТРИАЛНА ИНДУКЦИОННА ПЕЩ

Целта на изследването е да се анализират някои характеристики на електрическия ток, чрез които се оценява качеството на електрическата енергия в захранващата мрежа на индустриална индукционна пещ.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Изследван обект

Електрическата индукционна пещ конструктивно е изпълнена без стоманен магнитопровод, тигелен тип, с максимален капацитет 1600 kg. Проводникът, от който е изработена намотката, е кух (тръбен), в който протича охлаждаща вода с определени характеристики. Охлаждането е необходимо, защото токовете (няколко стотици А и над 1000 А), поради голямата мощност на пещта, загряват значително тоководещите елементи. Работната температура в тигела, при топене, достига около 1600°C. Електрическата мощност на уредбата е 800 kW, а захранването с трифазно променливо напрежение с ефективна стойност 380 V се осъществява от отделен трансформатор с мощност 1600 kVA. Чрез електронен преобразувател се повишава честотата на напрежението в мрежата от 50 Hz до 1 kHz.

Измервателна апаратура и методика на измерването

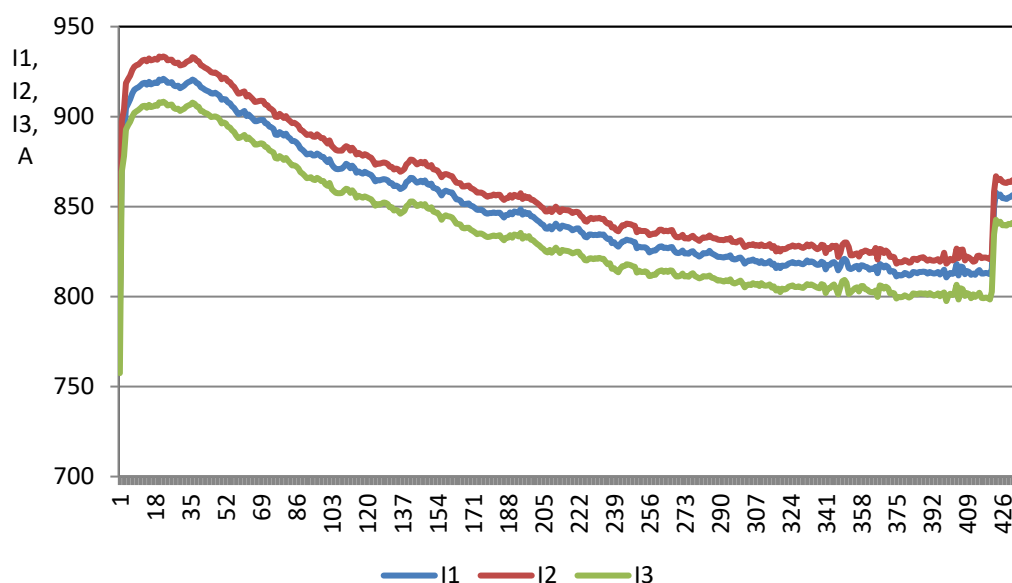
Изследването на характеристиките на протичащия ток е извършено с помощта на трифазен анализатор на електрическа енергия MI 2885 Master Q4, производство на фирмата Metrel, Словения (MI 2885 Master Q4, Metrel, 2021). Уредът е предназначен за измервания при спазване изискванията на стандартите за качество на електрическа енергия 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 се свързва към разпределителна уредба 0,4 kV, на извода, захранващ индукционната пещ.

Изследване на качеството на електрическата енергия

Изследването се провежда чрез анализ на някои характеристики на електрическия ток в съответствие с (IEC 61000-3-4: 1998).

Измененията на токовете в трите фази на захранващата мрежа са показани на фиг.1. Графиките обхващат само периода на топене на метала, който в случая е 26 min и 46 s.



Фиг.1.Изменения на токовете в отделните фазни проводници I1, I2, I3 на захранващата мрежа.

Тези изменения се отнасят само за периода на топене на метала, който е с продължителност 26 min и 46 s.

Характерно е скокообразното нарастване на токовете в момента на включване на уредбата. След това, за целия период, с изключение на последния пик, се наблюдават изменения в граници около 22 А. Общата тенденция на измененията на токовете е намаляваща, като промените са подобни и в трите фази. Последният пик се характеризира с рязко нарастване на токовете с около 42 А, след което пещта се изключва.

Формата на токовете в захранващата мрежа на индукционните пещи се различава от синусоидалната, поради използваните електронни преобразуватели (Grigorov, Sv., K. Koev, 2021).

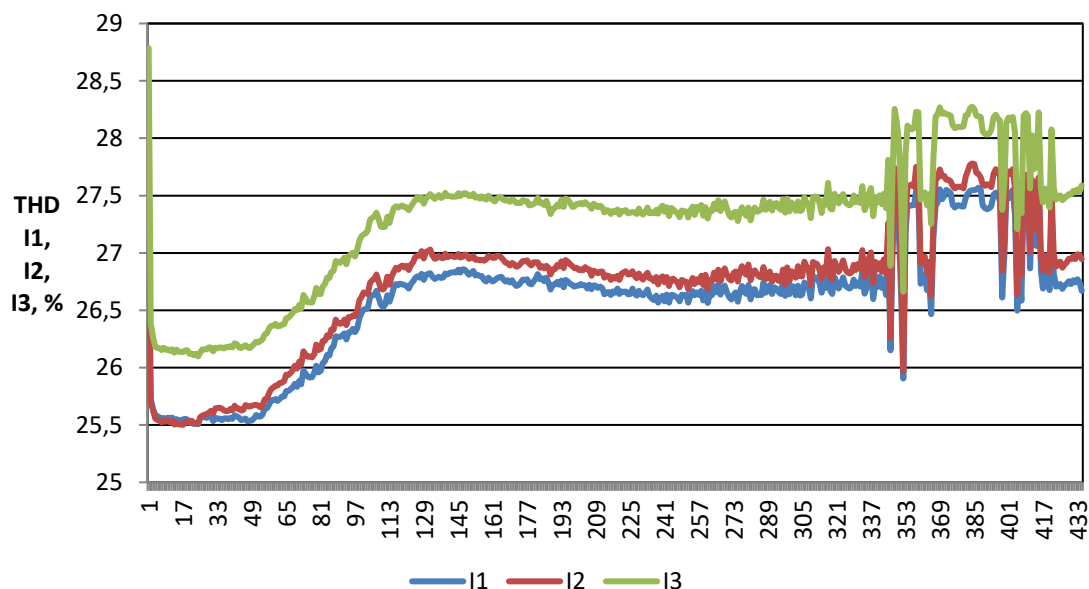
Количествена оценка на деформацията на формата на тока се дава с коефициента на несинусоидалност по ток THD_I (Total Harmonics Distortion of Current), в съответствие с (BDS EN 61000-4-7:2002/A1:2009). Стойностите на коефициента се определят по формулата:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{40} I_i^2}}{I_1} \cdot 100, \% \quad (1)$$

където I_i е ефективната стойност на i -тия хармоник на тока, А;

I_1 – ефективната стойност на първия (основния) хармоник на тока, А.

Измененията на стойностите на коефициентите THD_I за всяка от трите фази на захранващото напрежение на индукционната пещ са показани на фиг.2. Измененията в трите фази са подобни и близки по стойност, а измерванията са извършени само за периода на топене на метала (продължителността на процеса е 26 min и 46 s, както и за графиката на фиг.1).



Фиг.2. Изменения на стойностите на коефициентите на несинусоидалност по ток THD_I за всяка от трите фази.

В началото на графиките се забелязва пик на стойностите на коефициента THD_I (в момента на включване на уредбата), след който стойностите рязко намаляват до минималните - около 25,5% (за фази I1, I2) и 26,1% (за фаза I3). Следва по-плавното продължително нарастване до максималната стойност - около 26,8% (за фаза I1), 27% (за фаза I2) и 27,5% (за фаза I3). През следващия период, с изключение на последния пик, се наблюдават изменения в сравнително тесни граници – под 1%. Стойностите на коефициента

THD_I намаляват, като промените са подобни и в трите фази. В края на периода, преди последните големи аплитудни изменения, стойностите на коефициентите за трите фази се увеличават с около 0,25%. Големите аплитудни промени на стойностите, в края на изследвания период, се изменят с размах над 1,5 %, след което пещта се изключва. Стойностите на коефициента **THD_I** са най-големи за третата фаза (I3) и най-малки за първата фаза (I1), за целия изследван период. Причините са особеностите на използваната схема и различното натоварване на фазите – най-натоварена е третата (I3), а с най-малък товар е първата фаза (I1).

Интервалите на изменение на стойностите на коефициента **THD_I**, %, на трите фази са: $25,5 \leq I1 \leq 27,6$; $25,5 \leq I2 \leq 27,8$; $26,1 \leq I3 \leq 28,8$.

Използваният анализатор на електрическа енергия измерва хармониците до 50-и и изчислява стойностите на коефициента **THD_I** в абсолютни единици (A) и в проценти (%). В табл.1 са представени стойностите на коефициентите на несинусоидалност по ток **THD_I** за всяка фаза L1, L2 и L3. Стойностите са за продължителна работа на индукционната пещ, при последователно реуване на процеси на топене (уредбата е включена) и на леене (уредбата е изключена).

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

№	Коефициент	Фази на захранващата мрежа		
		L1	L2	L3
1	THD_I , %	26,6	27,8	29,0
2	THD_I , A	198,1	205,1	204,4

Показаните стойности (%) са по-големи от предписаните 16 % (IEC 61000-3-4:1998). В същия стандарт са дадени и относителните ефективни стойности (%) на токовете на 5, 7, 11 и 13-я хармоници **I₅**, **I₇**, **I₁₁**, **I₁₃** по отношение на основния хармоник **I₁**. Относителните стойности на токовете за изброените хармоници в трите фази на захранващата мрежа са близки, като разликите не са по-големи от 1%. Само стойностите за 5-ия хармоник на тока - (22,1...22,9)% не съответстват на дадената в стандарта 14%.

ИЗВОДИ

Измененията на токовете в трите фази, с изключение на нарастването към последния пик, са граници - около 22 A. Общата тенденция на измененията е намаляваща, с изключение на последния пик, като промените са подобни и в трите фази.

Стойностите на коефициента **THD_I**, %, се изменят в интервали с почти еднакви граници: $25,5 \leq I1 \leq 27,6$; $25,5 \leq I2 \leq 27,8$; $26,1 \leq I3 \leq 28,8$.

Измерените стойности на коефициентите на несинусоидалност по ток **THD_I**, за трите фази, за изследваните работни цикли на индукционната пещ, са 26,6% (L1), 27,8% (L2), 29,0 % (L3).

Измерените стойности на коефициента **THD_I** и относителните ефективни стойности на тока за 5-ия хармоник са по-големи от дадените в стандарта. Това налага да се анализират схемата на уредбата и работните режими и да се предложат подходящи решения за осигуряване необходимото качество на електрическата енергия.

REFERENCES

BDS EN 61000-4-7:2002/A1:2009. Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 4-7: Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto (**Оригинално заглавие:** БДС EN 61000-4-7:2002/A1:2009. Електромагнитна съвместимост (EMC). Част

4-7: Методи за изпитване и измерване. Общо ръководство за измерване и уреди за измерване на хармоници и междинни хармоници в захранващи системи и съоръженията, свързани с тях (IEC 61000-4-7:2002/A1:2008).

Belgaum Foundry Cluster, Best Operating Practices (2017), **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.

Grigorov, Sv., K. Koev (2021). Investigation the electrical power quality of a metals melting electric induction furnace. 60th Science Conference of Ruse University - Ruse. volume 60, Best Papers, ISBN: 978-954-712-864-4. **(Оригинално заглавие: Св. Григоров, К. Коев (2021). Изследване качеството на електрическата енергия на електрическа индукционна пещ за топене на метали. 60-та научна конференция на Русенския университет „Ангел Кънчев”, отличени доклади, ISBN: 978-954-712-864-4).**

Grigorov, Sv., K. Koev (2022). Investigation on some electrical power quality indices of a metals melting electric induction furnace. Proceedings 61st Science Conference of Ruse University – SSS Ruse, volume 61, book 11.4, ISSN: 1311-3321). **(Оригинално заглавие: Св. Григоров, К. Коев (2022). Изследване на някои показатели на качеството на електрическата енергия на електрическа индукционна пещ за топене на метали. Сборник доклади на 61-а научна конференция на Русенския университет „Ангел Кънчев” - Студентска научна сесия, Том 61, серия 11.4, ISSN: 1311-3321).**

Grigorov, Sv., K. Koev (2022). An investigation of the electric voltage quality of power supply of an industrial induction furnace. Proceedings 61st Science Conference of Ruse University – Ruse, volume 61, book 11.1, ISSN: 1311-3321). **(Оригинално заглавие: Св. Григоров, К. Коев (2022). Изследване на качеството на електрическото напрежение в захранващата мрежа на индустриална индукционна пещ. 61-а научна конференция на Русенския университет „Ангел Кънчев”, Том 61, серия 11.1, ISSN: 1311-3321).**

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.

IEC 61000-3-4:1998. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-4: Limits - Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A.

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

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.

Stefanov, St., V. Ruseva (2010). Electric power supply. University of Ruse “Angel Kanchev” press, Ruse. **(Оригинално заглавие: Стефанов, Ст., В. Русева (2010). Електроснабдяване. Русенски университет „Ангел Кънчев”, Университетско издателство Русе).**