

FRI-216-1-NMTS(S)-06

AN INVESTIGATION OF THE VOLTAGE VARIATIONS OF POWER SUPPLY OF A HIGH-POWER INDUCTION FURNACE ¹⁰⁷

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 voltage variations of power supply of a high-power induction furnace are investigated. The three-phase power quality analyser is used to measurement and to record the results. The analyser is connected to the second side of the furnace transformer. The graphical results are presented and analysed. The values of some voltage variations meet the power quality standard. The experimental results can be used for improvement the power quality.*

Keywords: *High-Power Induction Furnace, Power Quality, Voltage Variations*

ВЪВЕДЕНИЕ

Изследвани са измененията на качеството на електрическата енергия в захранващата верига на мощна индукционна пещ. Токът и напрежението се характеризират с несинусоидални изкривявания, които са по-големи за тока (Grigorov, Sv., & Koev, K., 2022). Изследвани са и други показатели на качеството на електрическата енергия на същия обект - несиметрията на токовете и напреженията (Grigorov, Sv., & Koev, K., 2024). Установено е, че несиметрията на тока за обратната последователност не отговаря на изискванията.

Целта на изследването е да се анализират измененията на напрежението в захранващата верига на мощна електрическа индукционна пещ.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Обект на изследване

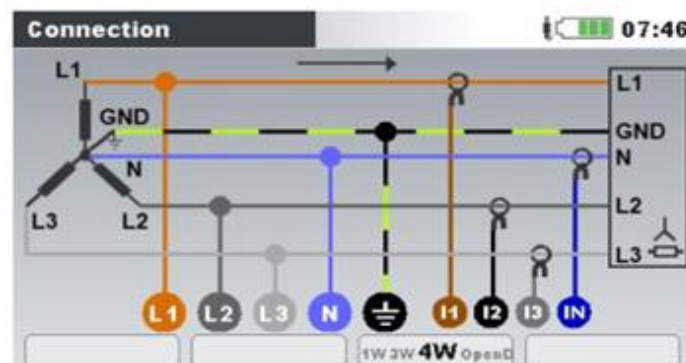
Електрическа индукционна пещ за топене на метали с мощност 800 kW, тигелен тип и максимален капацитет 1600 kg е обектът на изследването. Захранването с електрическа енергия на пещта се осъществява от самостоятелен трифазен трансформатор с мощност 1600 kVA. Линейното променливо напрежение на изхода на трансформатора е с ефективна стойност 380 V и честота 50 Hz. Тя се повишава до 1 kHz чрез електронен преобразувател, който позволява регулиране на напрежението и управление на работния режим на пещта.

¹⁰⁷ Докладът е представен пред секция “Природоматематически и технически науки” на 63-тата научна конференция на Русенския университет „Ангел Кънчев“ и Съюза на учените-Русе на 18 октомври 2024 година с оригинално заглавие на български език: ИЗСЛЕДВАНЕ ИЗМЕНЕНИЯТА НА ЗАХРАНВАЩОТО НАПРЕЖЕНИЕ НА МОЩНА ИНДУКЦИОННА ПЕЩ

Методика на изследването и измервателни средства

Измененията на напрежението се изследват в реални работни условия чрез анализатор на електрическа енергия Metrel Master Q4 MI 2885 (Metrel, 2021). Той се свързва по трифазна 4-проводна схема (Фиг. 1) към изводите за ниско напрежение на трансформатора, захранващ пещта. Номиналните стойности на фазните напрежения и на честотата, съответно, са $U_N = 230\text{ V}$ и $f_N = 50\text{ Hz}$.

Измерванията са извършени автоматично от анализатора в продължение на 7 дни, в съответствие с (BDS EN 50160:2010/A3:2020). Ефективните стойности на величините са измерени през интервал от 10 min и се изчисляват средни стойности. Резултатите са записани в преносима карта-памет (SD-карта) в анализатора, прехвърлени са на компютър и са обработени и анализирани.



Фиг. 1. Електрическата схема на свързване на анализатор на електрическа енергия Metrel Master Q4 MI 2885: снимка на дисплея на уреда (Metrel, 2021)

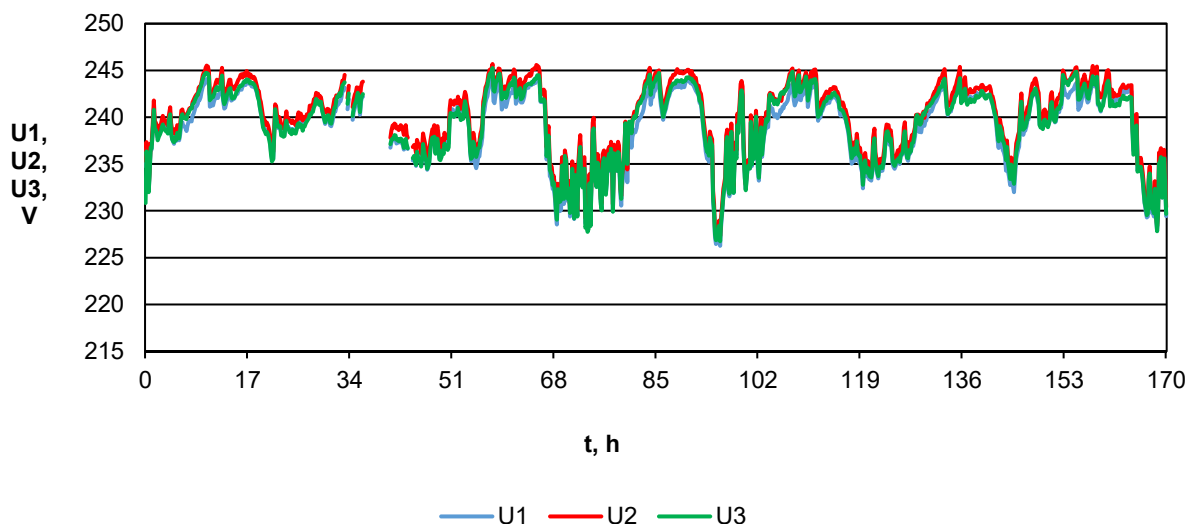
Измененията на напрежението в захранващата верига могат да бъдат класифицирани като два основни вида: бавни, продължителни (отклонения) и бързи, краткотрайни (колебания). Отклонението на напрежението е разликата между действителната и номиналната стойности на напрежението в дадена точка от електрическата мрежа. Отклонението на напрежението освен в абсолютни единици V, може да се представи и в %, като относителна стойност спрямо номиналното напрежение (Baggini, 2008, Gönen, T., 2014, Stefanov, St., & V. Ruseva, 2010). Колебанието на напрежението е единично бързо изменение на напрежението между две последователни устойчиви нива (минимално и максимално) с определени продължителности. Това изменение на напрежението може да се определи количествено в абсолютни единици V, като разлика между стойностите на напрежението в двете последователни устойчиви нива, или в %, като относителна стойност спрямо номиналното напрежение.

Отклоненията на напрежението оказват неблагоприятно въздействие върху електрическите, надеждностни, енергийни характеристики на елементите и схемите, технологичните процеси и др. (Stefanov, St., & V. Ruseva, 2010). Колебанията на напрежението влияят негативно върху електронни устройства, системи и елементи за измерване, контрол и управление, електромеханични релета и контактори, регулируеми електрозадвижвания, осветителни уредби с газоразрядни лампи с високо налягане и др., а при определени условия и върху електрически въртящи се машини (Baggini, 2008). Всички въздействия на измененията на напрежението върху електрическите устройства и системи са предпоставка за изменение на характеристиките им, нарушаване на работните режими и съкращаване на експлоатационния им срок.

Представените особености за влиянието на измененията на напрежението върху електрическите устройства и системи дават основание за изследването на тези изменения, като показатели за качеството на електрическата енергия.

Резултати от изследванията

Измененията на средните ефективни стойности на фазните напрежения на трите фази U1, U2, U3 са показани на Фиг. 2. Кривите на трите напрежения са с подобна форма и само в някои моменти се наблюдават незначителни разлики. Това се обяснява със сравнително равномерното разпределение на напреженията в трите фази, което се потвърждава от изследванията за несиметрията на напреженията (Georgieva, A. & S. Tzvetkova, 2019, Grigorov, Sv., & Koev, K., 2024).



Фиг. 2. Изменения на напреженията в трите фази (U1, U2, U3, V) във времето (t, h)

Регистрирани са едно по-продължително и едно по-кратко прекъсвания на напрежението в интервалите (36,0...40,2) h и (43,3...43,8) h, съответно. Те се дължат на аварийни режими на захранващата мрежа.

Границите на изменения на измерените стойности на фазните напрежения и изискванията на стандарта, за мрежи ниско напрежение, са дадени в Таблица 1.

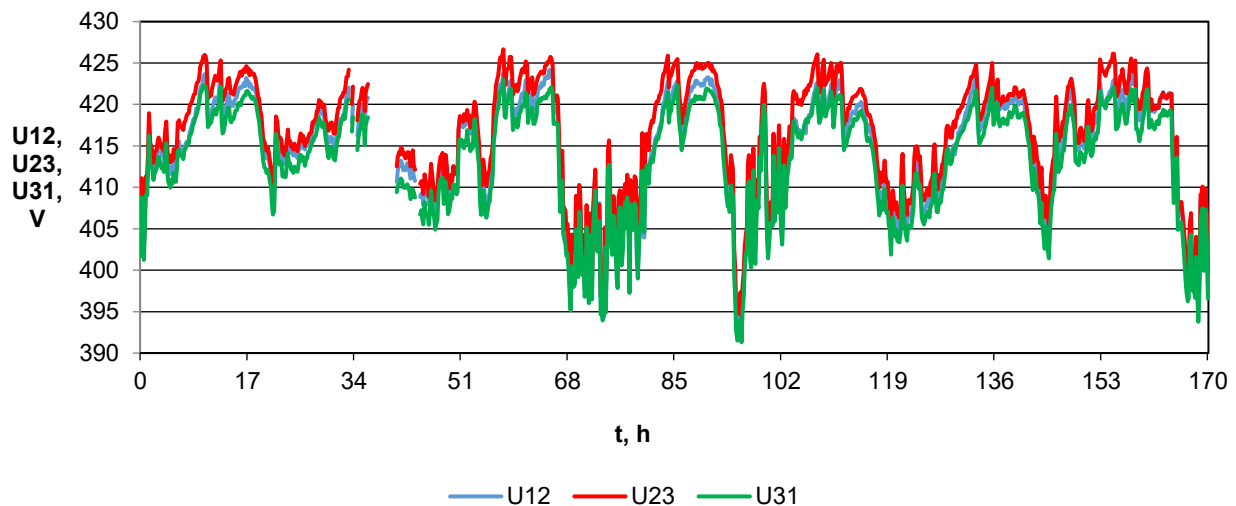
Таблица 1. Отклонения на фазните напрежения (U)

Допустимо отклонение на номиналното напрежение (U_N , V), според стандарт EN 50160	Условия на измерване	Интервал на измерените стойности на напрежението общо за трите фази (U, V)
$U_N \pm 10\% = (230 \pm 23) = (207,00...253,00)$	95 % от средните ефективни стойности на напрежението за интервал на измерване 10 min, за всеки период от една седмица	(226,26...244,87)
$U_{N+10\%}^{-15\%} = (195,50...253,00)$	100 % (всички) средни ефективни стойности на напрежението за интервал на измерване 10 min	(226,26...245,68)

Минималните, средните и максималните стойности на напреженията за всяка фаза, съответно, са: U1 – 226,26 V, 239,04 V, 244,37 V; U2 – 227,32 V, 240,16 V, 245,68 V; U3 – 226,75 V, 239,36 V, 245,25 V. Максималните отклонения на фазните напрежения са: U1 – 6,25%, U2 – 6,82%, U3 – 6,63%.

Сравняването на определения от стандарта интервал на изменение на средните ефективни стойности на напрежението с резултатите от измерванията показва, че отклоненията на фазните напрежения са в допустимите граници!

Линейните напрежения (Фиг. 3) се изменят и прекъсват подобно на фазните напрежения (Фиг. 2). Изменението на средните ефективни стойности на линейните напрежения, според (BDS EN 50160:2010/A3:2020), трябва да бъде в границите $U_H \pm 10\% =$



Фиг. 3. Изменения на линейните напрежения (U_{12} , U_{23} , U_{31} , V) във времето (t)

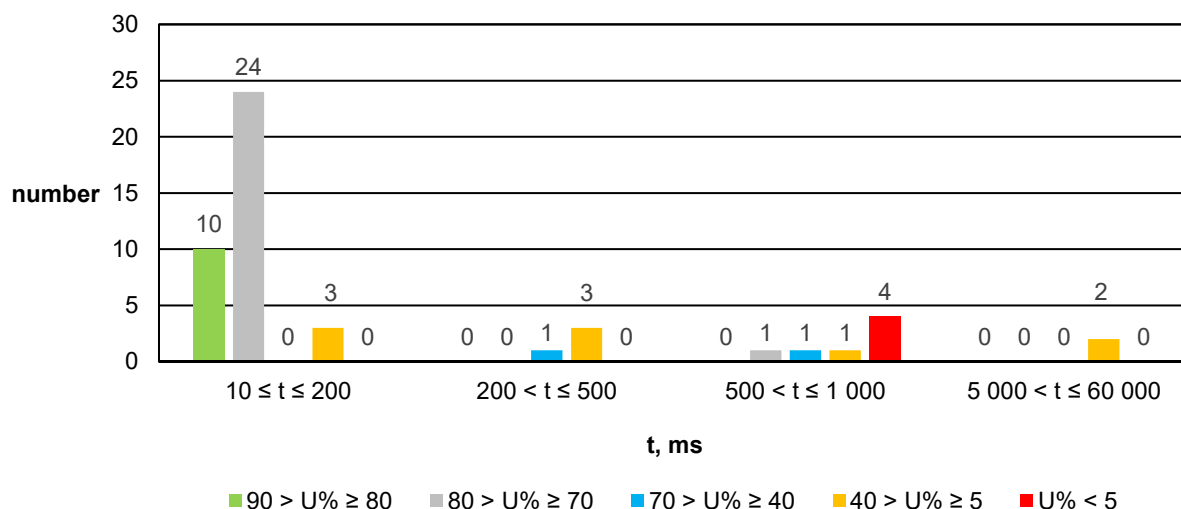
$= (400 \pm 40) \text{ V} = (360,00 \dots 440,00) \text{ V}$. Минималните, средните и максималните стойности на линейните напрежения, съответно, са: U_{12} – 392,58 V, 414,78 V, 424,16 V; U_{23} – 391,31 V, 416,48 V, 426,65 V; U_{31} – 391,31 V, 413,31 V, 422,99 V. Максималните отклонения на линейните напрежения са: U_{12} – 6,04%, U_{23} – 6,66%, U_{31} – 5,75%. Представените резултати показват, че отклоненията на трите линейни напрежения са в допустимите граници!

В работните периоди на индукционната пещ, стойностите на фазните и линейните напрежения са по-ниски от обичайните. Причината е увеличението на загубите на напрежение, поради големите токове на мощната индукционна пещ.

Колебанието на напрежението се изразява с краткотрайни събития: спадане (пропадане), прекъсване и повишаване на напрежението (пренапрежение). Тези изменения на напрежението се проявяват единично или в комбинация, поради наличие на мощни променливи товари. Разглежданата индукционна пещ е от тази група. Количествената оценка на спаданията на напрежението се определя с техния брой, продължителност и стойността на изменението на напрежението. Обикновено последният параметър се изразява в % от номиналното напрежение – $U\%$. Спаданията и пренапреженията са с продължителност до 1 min (BDS EN 50160:2010/A3:2020). Резултатите от изследването на спаданията на трите фазни напрежения са представени общо на Фиг. 4.

Анализът на резултатите от графиката показва, че спаданията на напрежението в интервала $80 \geq U\% \geq 70$ са с най-голям брой – 24. Те се характеризират с най-малката продължителност $10 \text{ ms} \leq t \leq 200 \text{ ms}$. Същата продължителност и по-малко изменение на напрежението спрямо номиналната му стойност $90 \geq U\% \geq 80$ характеризират други 10 броя спадания на напрежението. Общият брой на колебанията на напрежението за двете разгледани групи е 34 и представлява 68% от общо 50 броя регистрирани спадания. Сравнително голям е броят на спаданията на напрежението със стойности в интервала $40 \geq U\% \geq 5$ – общо 9, но с различна продължителност. Най-големите колебания на напрежението $U\% < 5$ са 4 броя с голяма продължителност $500 \text{ ms} \leq t \leq 1000 \text{ ms}$. Тези последни колебания

се наблюдават в трите фази на захранващата линия на пещта и, понеже стойността им е $U\% < 5$, те се разглеждат като краткотрайни прекъсвания (до 3 min) на напрежението. Ако продължителността на прекъсванията е по-голяма от 3 min, те



Фиг. 4. Брой (number), стойност ($U\%$) и продължителност (t) на спаданията на напрежението

се разглеждат като продължителни (BDS EN 50160:2010/A3:2020).

Спаданията на напрежението се дължат на аварийни режими (къси съединения) на електрическите вериги и/или особености на технологичния процес, свързани с протичане на големи токове.

Регистрираните краткотрайни пренапрежения общо за трите фазни напрежения са 5 броя, със стойности в интервала $120 > U\% > 110$ и продължителности $10 \text{ ms} \leq t \leq 500 \text{ ms}$. Причина за тези пренапрежения са комутационните процеси при технологичните режими на пещта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резултатите от проведените изследвания за измененията на напрежението в захранващата верига на мощна индукционната пещ показват, че отклоненията на фазните и линейните напрежения са в допустимите граници, определени от стандарта. Краткотрайните колебания на напрежението са сравнително голям брой – спаданията на напрежението общо за трите фазни напрежения са 50, от които 4 броя са класифицирани като прекъсване. Спаданията на напрежението в интервала $80 \geq U\% \geq 70$ и с най-малката продължителност $10 \text{ ms} \leq t \leq 200 \text{ ms}$ са с най-голям брой – 24.

Краткотрайните колебания на напрежението се дължат на аварийни режими (къси съединения) на електрическите вериги, особености на технологичния процес, свързани с протичане на големи токове и поява на пренапрежения, поради комутационни процеси.

Измененията на напрежението влияят неблагоприятно върху електрическите устройства и системи, като създават условия за промяна на характеристиките им, нарушаване на работните режими и съкращаване на експлоатационния им срок.

REFERENCES

- Baggini, A. (2008). Handbook of Power quality. John Wiley & Sons Ltd., England.
- 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).

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

Georgieva, A. & S. Tzvetkova (2019). Quality of electrical energy in an electrical supply system, supplying separate consumers. *Proceedings of the Technical University of Sofia*, vol. 69, pp. 111-120, 2019, Bulgaria, Sofia, Technical University of Sofia, ISSN 1311-0829 (**Оригинално заглавие:** Георгиева, А., Св. Цветкова (2019). Качество на електрическата енергия в електроснабдителна система, захранваща обособени консуматори X Конференция на Електротехнически факултет БулЕФ2019, Годишник на ТУ-София, том 69, стр. стр. 111-120, 2019, България, София, ТУ-София, ISSN 1311-0829).

Grigorov, Sv., & K. Koev (2024). An investigation of some indicators of the power quality of a high power induction furnace. 63rd Science Conference of Ruse University – SSS, Ruse. (**Оригинално заглавие:** Св. Григоров, К. Коев (2024). Изследване на някои показатели на качеството на електрическа енергия на мощна индукционна пещ. 63-а научна конференция на Русенския университет „Ангел Кънчев” – Студентска сесия).

Grigorov, Sv., & K. Koev (2022). Investigation on some electrical power quality indices of a metals melting electric induction furnace. 61st Science Conference of Ruse University - Ruse. (**Оригинално заглавие:** Св. Григоров, К. Коев (2022). Изследване на някои показатели на качеството на електрическата енергия на електрическа индукционна пещ за топене на метали. 61-ва научна конференция на Русенския университет „Ангел Кънчев”).

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).

Metrel (2021). Power Quality Analyser MI 2885 Master Q4. Manual.