

ИЗСЛЕДВАНЕ ОТКЛОНЕНИЕТО И НЕСИМЕТРИЯТА НА НАПРЕЖЕНИЕТО ПРИ РАБОТА НА МОЩНИ ЕЛЕКТРОДЪГОВИ СТОМАНОДОБИВНИ ПЕЩИ

Иван Стоилов¹, Кирил Джустров², Тодор Николов³

¹ Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, E-mail: ivan_stoilov@mgu.bg

² Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, E-mail: justrov@mgu.bg

³ СТОМАНА ИНДЪСТРИ АД, Перник, E-mail: tnikolov@stomana.bg

РЕЗЮМЕ: Проведени са експериментални изследвания на отклонението на напрежението при едновременна работа на мощна стоманодобивна електродъгова пещ и кофъчно-пещна инсталация. Изследван е и коефициентът на несиметрия по обратна последователност на напрежението. Измерванията са проведени на високата страна на пещен трансформатор (35kV) и на системното захранващо напрежение (220kV). Резултатите от измерванията ще се използват при избора на подходяща цифрова релейна защита на пещните трансформатори и при определяне параметрите на защитните й характеристики.

STUDY OF VARIATIONS AND VOLTAGE UNBALANCE DURING OPERATION OF POWERFUL ELECTRIC ARC FURNACES

Ivan Stoilov¹, Kiril Dzhustrov², Todor Nikolov³

¹ University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, e-mail: ivan_stoilov@mgu.bg

² University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, e-mail: justrov@mgu.bg

³ STOMANA INDUSTRY, Pernik, E-mail: tnikolov@stomana.bg

ABSTRACT: Experimental analysis of voltage variations during simultaneous operation of powerful steel making electric arc furnace and a ladle furnace have been carried out. Also, negative phase-sequence voltage ratio has been studied. Measurements have been done at the high voltage side of a furnace transformer (35kV) and of the system power supply voltage (220kV). The results of the measurements will be used for selection of suitable digital relay protection of furnace transformers and for determination of specifications of its protection parameters.

Увод

Проблемите с качеството на електрическата енергия с всяка изминала година стават все по-актуални. Необходимостта от провеждане на мероприятия за повишаване качеството на електроенергията нараства с развитието и широкото прилагане в производството на вентилни преобразователи и различни технологични установки като електродъгови стоманодобивни пещи, заваръчни агрегати и др. Проблемите, свързани с качеството на електрическата енергия в системите на електроснабдяване на промишлените предприятия са предмет на редица публикации (Хацевский и др., 2012, Коновалов и др., 2014, De Keulenaer, 2002). Методика за оценка на щетите от влошено качество на електро-енергията е дадена в (Charman, 2001).

Управление качеството на електроенергията чрез стандарта ISO 50001 е предложено в (Савин и др., 2012). Изследвания на хармоничния състав на напрежението и тока при работа на мощни електродъгови стоманодобивни пещи са описани в (Стоилов и др., 2015).

Целта на настоящото изследване е да се определят някои от показателите за качество на напрежението при работа на мощни електродъгови стоманодобивни пещи.

Отклонението и колебанието на напрежението при работа на електродъговите пещи се определя от динамиката на тока на товара. Друг параметър, определящ колебанието на напрежението, е динамично генерираната реактивна мощност и скоростта, с която се извършва компенсацията. Размахът на колебанието на напрежението и честотата на повторение в дадена точка от системата зависят и от броя на едновременно работещите електродъгови пещи. Неравномерното натоварване на отделните фази при работа на електродъговите пещи води и до значителна несиметрия на напрежението.

Изследването е проведено на мощна електродъгова стоманодобивна пещ (ЕДП), работеща с кофъчно-пещна инсталация (КПИ) в електростоманодобивен цех (ЕСДЦ) на „Стомана Индъстри“ АД гр. Перник. Топенето на стоманата се извършва в електродъгова пещ с три въглеродни електрода с вместимост 125t скрап. Окончателното легиране на стоманата се извършва в кофъчно-пещна инсталация (КПИ). Пещният трансформатор на ЕДП е с мощност 120MVA, с диапазон на регулиране на напрежението 35/0,780-1,302kV.

Пещният трансформатор на КПИ е с мощност 18MVA. Компенсацията на реактивните товари при работа на пещните инсталации се осъществява с шест блока за

динамична компенсация, захранвани от трансформатор с мощност 45MVA и напрежение 35/2,4kV.

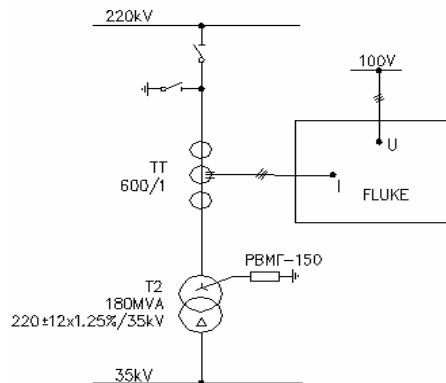
I. Експериментални изследвания

Всички експериментални изследвания са извършени със съвременни цифрови мрежови анализатори FLUKE 437-II и FLUKE 435-II.

Уредите са свързани към вторичните вериги на измервателните трансформатори (фиг. 1).

- Клас на точност на уредите при измерване:
- на напрежение 0,1% от номиналното (1000V);
 - по ток за съответните амперклеци 1,5% .

Измерванията са проведени по методиката, дадена в (IEC 61000-4-30:2008) едновременно на страна 220 kV и 35kV при съвместна работа на ЕДП №1 и КПИ-1.

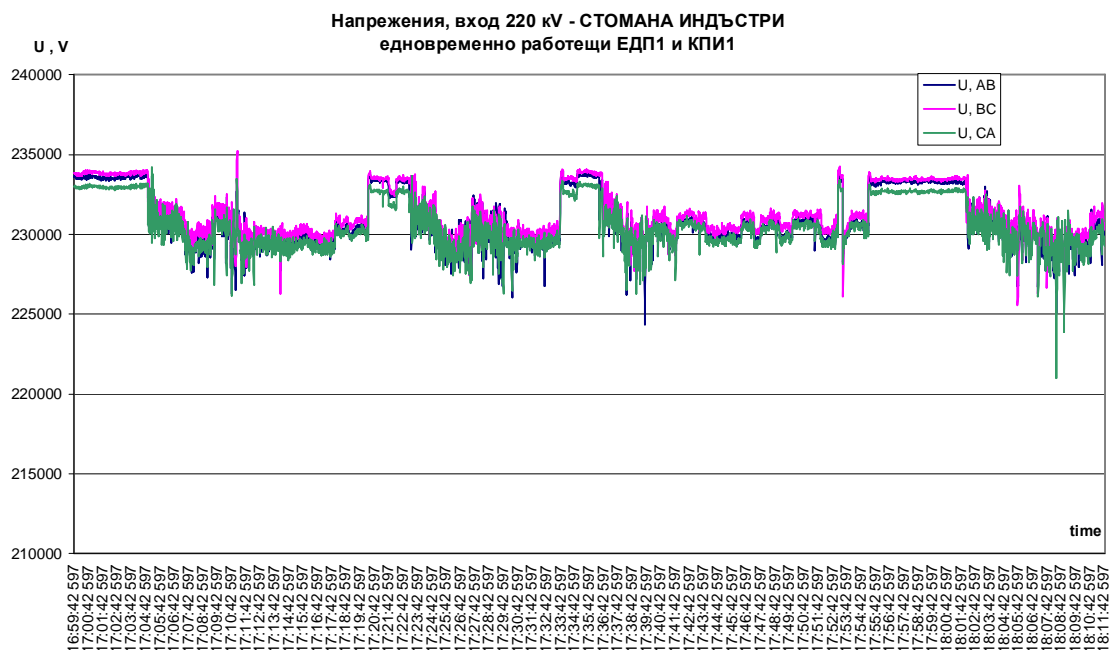


Фиг. 1

II. Отклонение на напрежението

II.1 Линейни напрежения на страна 220kV

На фиг. 2 е показано изменението на линейното напрежение при едновременна работа на ЕДП-1 и КПИ-1. Кривите показват ефективните стойности на линейните напрежения, осреднени на интервал от 250ms. Регистрираното напрежение на празен ход на трансформатора в отделните фази е в границите 233 до 234kV, като разликата не надхвърля 0,5%. По време на работа на електродъговите пещи напрежението е сравнително постоянно и със стойност около 230kV. Единствено в моментите на рязко спадане на тока са регистрирани



Фиг. 2

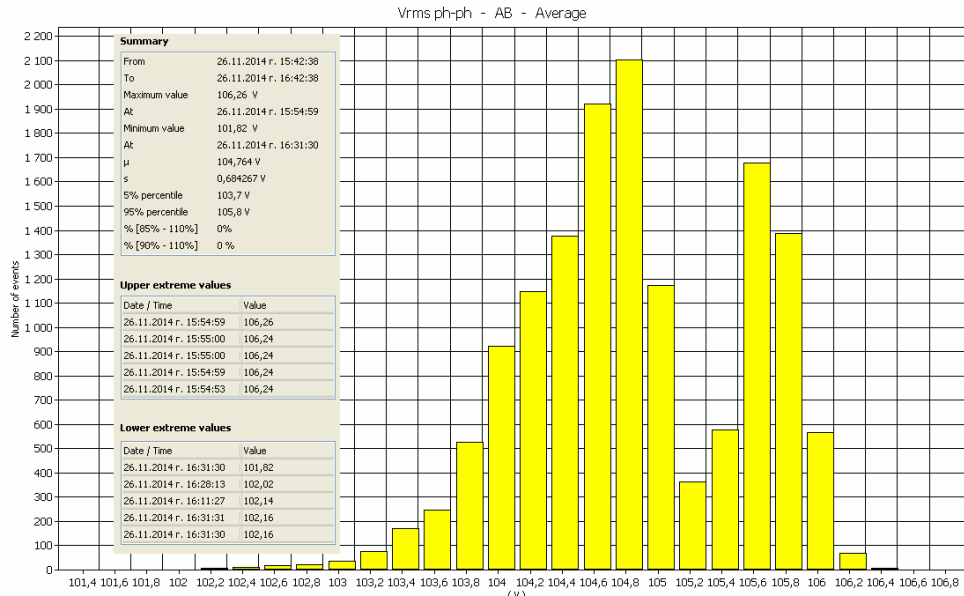
пикове в напрежението с малка продължителност. Максималната регистрирана стойност е 235,2kV. Минималната регистрирана моментна стойност на напрежението по време на плавката е 221kV. При едновременна работа на електродъговите пещи ЕДП №1 и КПИ-1 не се нарушават показателите за качество на напрежението, дефинирани в (БДС EN 50160:2010). Резултатите от статистическата обработка на данните от измерването на линейното напрежение АВ с продължител-

ност 1 час са дадени на фиг. 3. От обработените 14 400 данни са определени:

- максимална регистрирана стойност на линейното напрежение - 233,77kV;
- минимална регистрирана стойност на линейното напрежение - 224,00kV;
- средна стойност на линейното напрежение - 230,48kV;
- средно квадратично отклонение - 1,505kV.

- 5%-ият процентил показва, че 5% от данните в извадката са под 228,14kV;

- 95%-ият процентил показва, че 95% от данните в извадката са под 232,76kV.



Фиг. 3

Отклонението на напрежението е само в положителна посока и за средната стойност е:

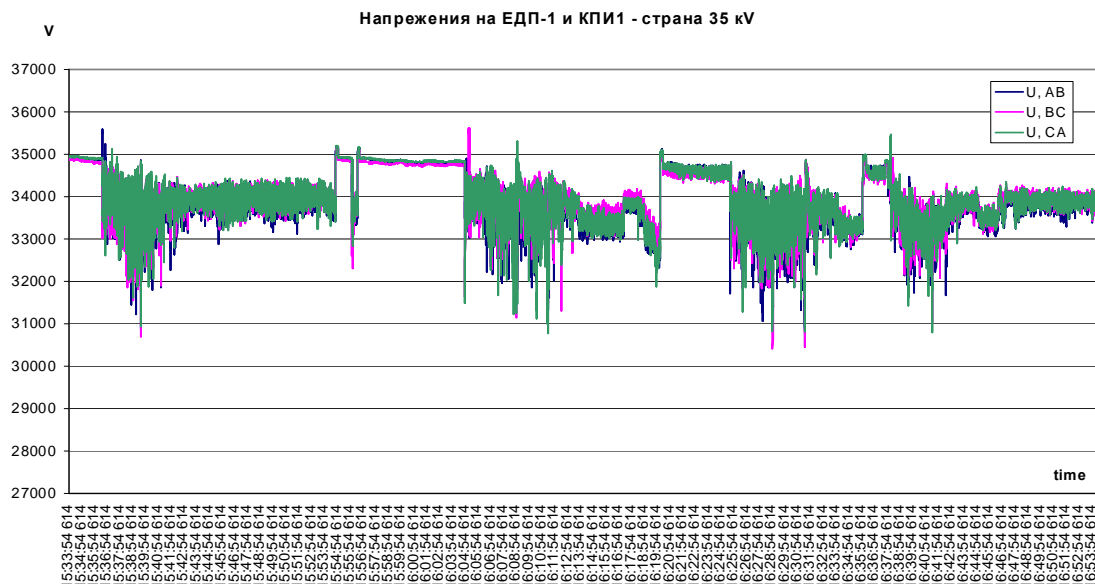
$$\delta U = [(U_m - U_0)/U_0]/100 = [(230,48 - 220)/220]/100 = 4,76\%$$

Това отклонение не надвишава допустимите стойности съгласно нормативните документи.

Не са регистрирани стойности в интервалите 85-110% и 90-110% от номиналното напрежение.

II.2. Линеини напрежения на страна 35 kV

Изменението на напрежението, регистрирано при работа на ЕДП 1 и КПИ-1, е показано на фиг. 4. Регистрираното напрежение на празен ход на трансформатора е около 35kV. По време на работа на пещите напрежението се изменя главно в границите 33-34kV. В моментите на рязко спадане на тока са регистрирани пикове в напрежението с малка продължителност. Максималната регистрирана стойност е 36kV. Минималната регистрирана моментна стойност на напрежението по време на плавката е 30,5kV.



Фиг. 4

Резултатите от статистическата обработка на извадката са дадени на фиг. 5. Получени са следните резултати:

- максимална регистрирана стойност на линейното напрежение - 35,588kV;
- минимална регистрирана стойност на линейното напрежение - 30,450kV;

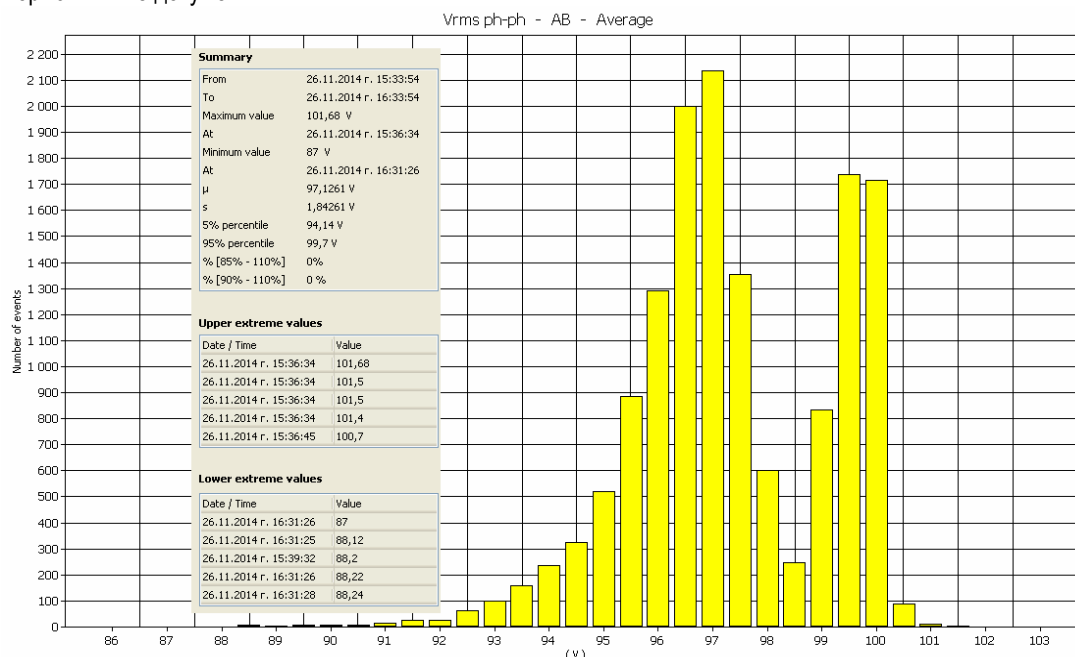
- средна стойност на линейното напрежение - 33,004kV;
- средно квадратично отклонение - 0,645kV;
- 5% -ият процентил е 32,949kV;
- 95%-ият процентил е 34,895kV.

Отклонението на напрежението е основно в отрицателна посока и за средната стойност е:

$$\delta U = [(U_o - U_m) / U_o] \cdot 100 = [(35 - 33,004) / 35] \cdot 100 = 5,7\%$$

Това отклонение не надвишава допустимите стойности съгласно нормативните документи.

Не са регистрирани стойности в интервалите 85-110% и 90-110% от номиналното напрежение.



Фиг. 5. КПИ1 и ЕДП1 – 35 kV

III. Несиметрия на напрежението

Несиметрията в напрежението е в резултат на несиметричния товар при работа на електродъговите пещи. Показателите за качество на електроенергията, дефинирани в БДС EN 50160:2010, са коефициент на несиметрията на напрежението по обратна последователност $K_{2U} = U_2/U_1$ и коефициент на несиметрията на напрежението по нулева последователност $K_{0U} = U_0/U_1$, където:

- U_1 - напрежение с права последователност;
- U_2 - напрежение с обратна последователност;
- U_0 - напрежение с нулева последователност.

За указаните показатели са установени следните норми:

Стойностите на коефициента на несиметрия на напрежението по обратна последователност K_{2U} и на коефициента на несиметрия на напрежението по нулева последователност K_{0U} в точката на предаване на електрическата енергия, осреднени в 10-минутен интервал, не трябва да превишават 2% в продължение на 95% от времевия интервал на една седмица.

Стойностите на коефициента на несиметрия на напрежението по обратна последователност K_{2U} и на коефициента на несиметрия на напрежението по нулева последователност K_{0U} в точката на предаване на електрическата енергия, осреднени в 10-минутен интервал, не трябва да превишават 4% в продължение на 100% от времевия интервал на една седмица.

Измерването на основната съставяща на входния сигнал трябва да се извършва на база на основния времеви интервал – 10 периода за система за електрооснабдяване с честота 50 Hz.

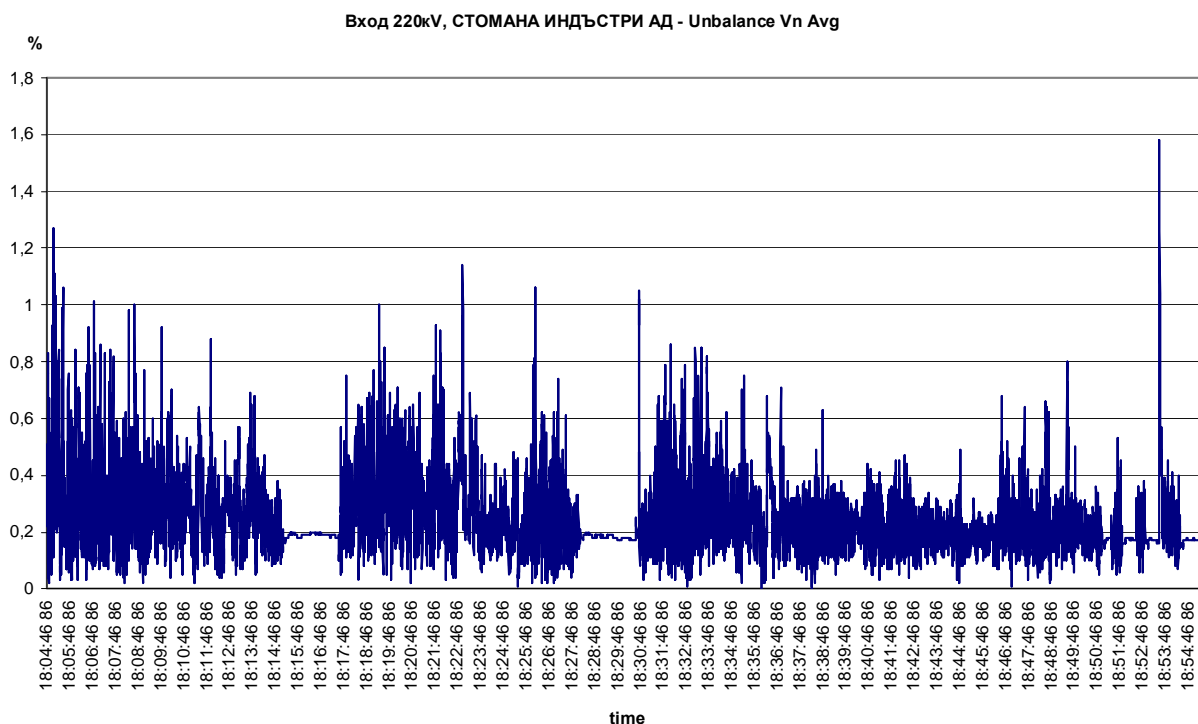
В трипроводните електрически системи коефициентът на несиметрия на напрежението по нулева последователност $K_{0U} = 0$.

III.1. Коефициент на несиметрия на напрежението по обратна последователност K_{2U} на страна 220kV

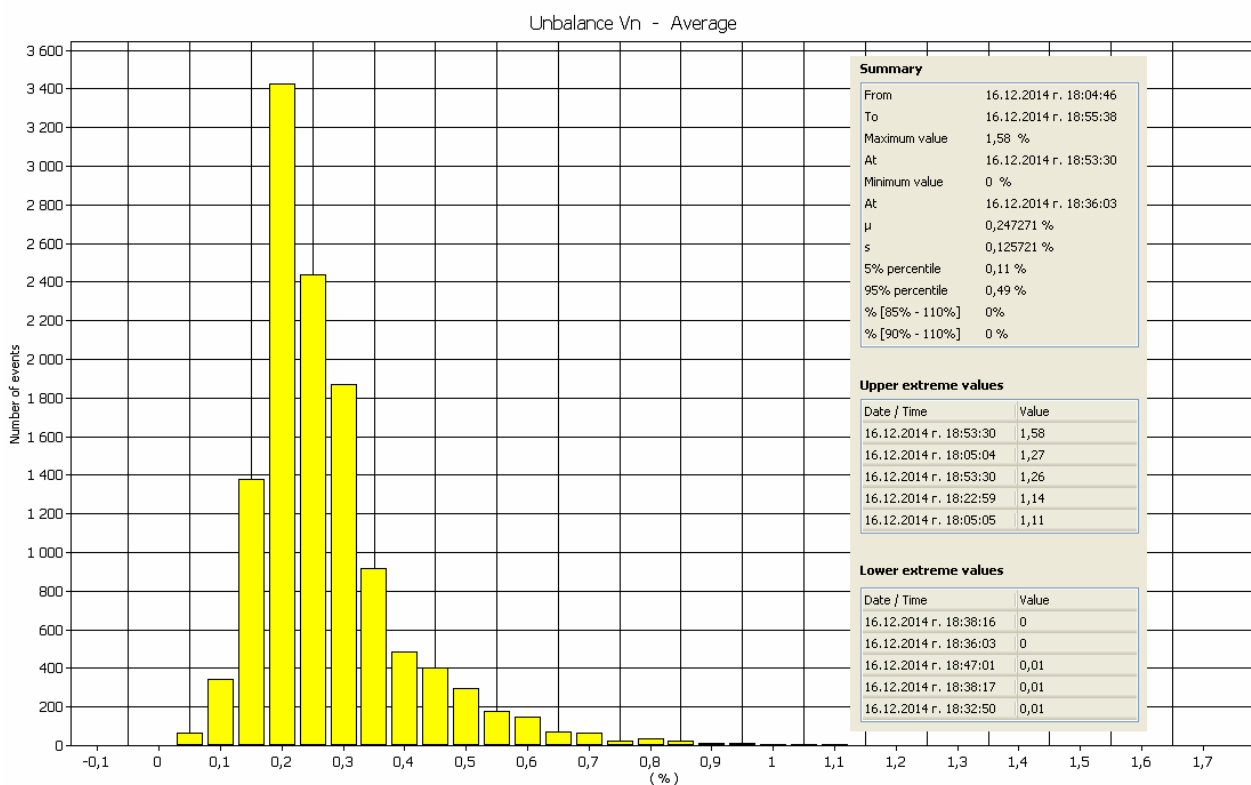
Изменението във времето на коефициента на несиметрия на напрежението по обратна последователност K_{2U} на страна 220kV е дадено на фиг. 6. По време на работа на електродъговите пещи K_{2U} е основно в границите 0,2%-0,4%. Регистрирани са единични стойности над 1%, но те са с малка продължителност. Максималната регистрирана стойност на коефициента на несиметрия на напрежението по обратна последователност K_{2U} е 1,58%.

Резултатите от статистическата обработка на извадката са дадени на фиг. 7. Получени са следните резултати:

- максимална регистрирана стойност на K_{2U} - 1,58%;
- минимална регистрирана стойност на K_{2U} - 0%;
- средна стойност на K_{2U} - 0,247%;
- средно квадратично отклонение - 0,126%;
- 5% -тият процентил е 0,11%;
- 95%-тият процентил е 0,49%.



Фиг. 6



Фиг. 7

От проведените измервания на страна 220кV се вижда, че при работа на електродъговите пещи в „Стомана Индъстри“ АД не се нарушават показателите на качеството на електрическата енергия по отношение коефициента на несиметрия на напрежението по обратна последователност K_{2U} .

III.2. Коефициент на несиметрия на тока по обратна последователност K_{2I} на страна 220кV

Коефициентът на несиметрия на тока е дефиниран аналогично на коефициента на напрежение по обратна последователност. Трябва да се отбележи, че в нормативните документи не се регламентират стойности на коефициента на несиметрия на тока. Презумпцията е, че за качеството на напрежението носи отговорност доставчикът на електроенергия, а за качеството на тока отговаря потребителят. Проведени са изследвания и на

качествените показатели на тока, тъй като той е задължителна входна величина в цифровите релейни защиты.

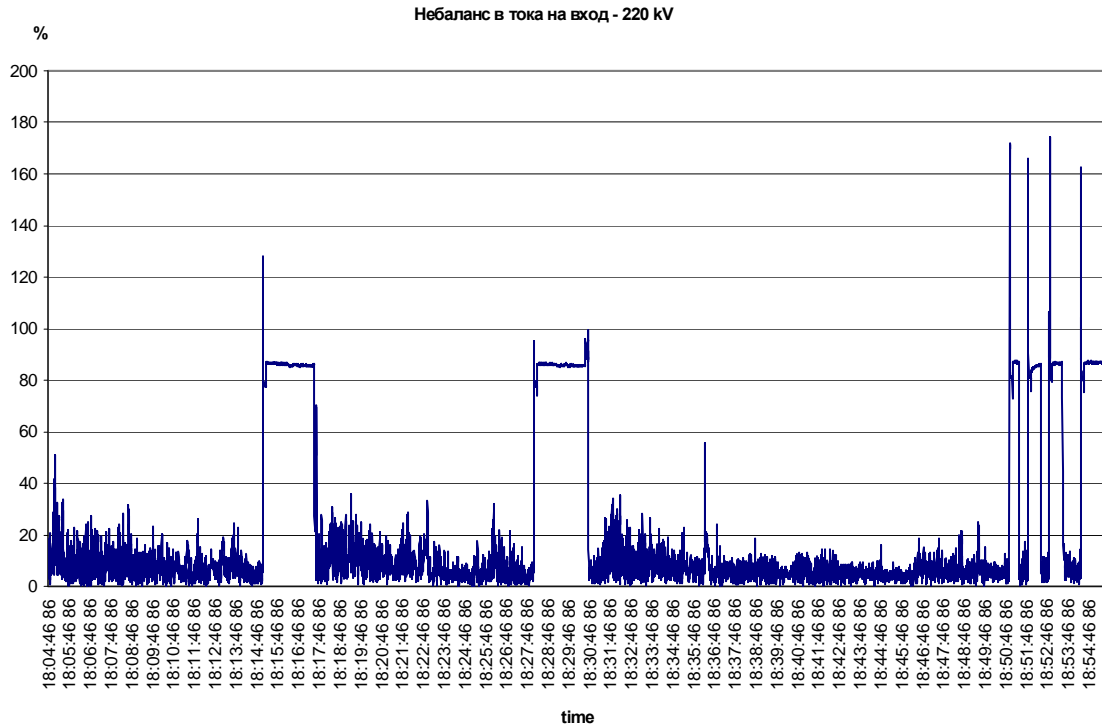
Кривата на фиг. 8 показва изменението на коефициента на несиметрия по обратна последователност K_{2I} на страна 220kV. В по-голямата част от времето K_{2I} е в границите 0-20%. В отделни моменти от време са регистрирани много високи стойности на K_{2I} с неголяма продължителност (до 4 min). Стойностите на K_{2I} в тези случаи надхвърлят 80%. Регистрирани са и единични стойности на K_{2I} , по-високи от 160%. Предполага се, че това са моментите от технологичния процес, когато се запалва електрическата дъга.

От статистическата обработка на данните от измерванията, показани на фиг. 9, ясно се очертават две зони:

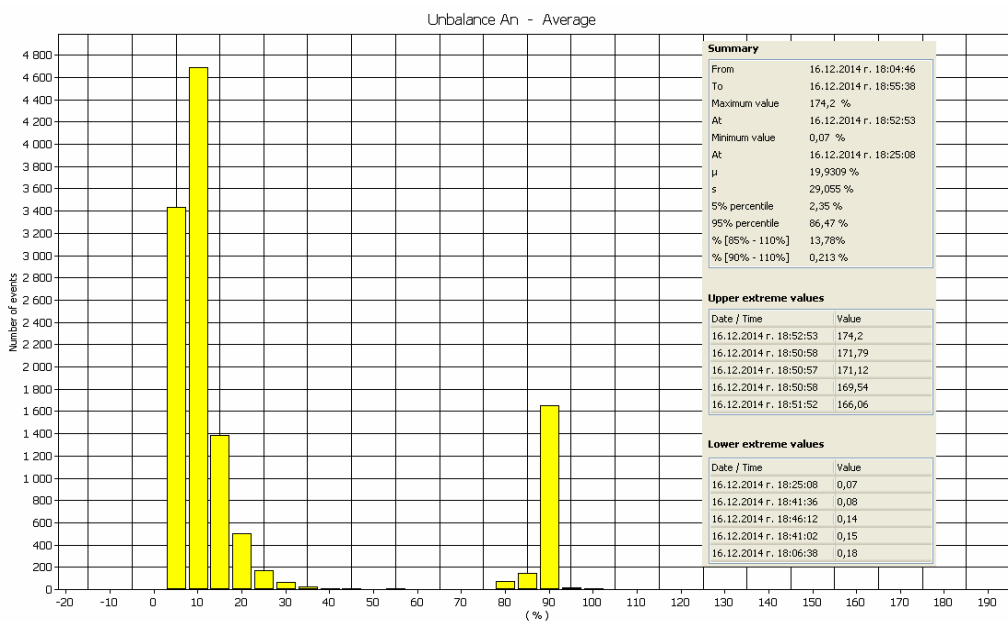
- със сравнително ниски стойности на K_{2I} – около 10%;
- със високи стойности на K_{2I} – около 90%.

От общата обработка на всички данни от извадката са получени следните резултати:

- максимална регистрирана стойност на K_{2I} – 174,2%;
- минимална регистрирана стойност на K_{2I} – 0,07%;
- средна стойност на K_{2I} – 19,93%;
- средно квадратично отклонение – 29,055%;
- 5%-тият процентил е 2,35%;
- 95%-тият процентил е 86,47%.



Фиг. 8



Фиг. 9

III.3. Коефициент на несиметрия на напрежението по обратна последователност K_{2U} на страна 35kV.

Голямата динамика в кривата на коефициента на несиметрия на напрежението по обратна последовател-

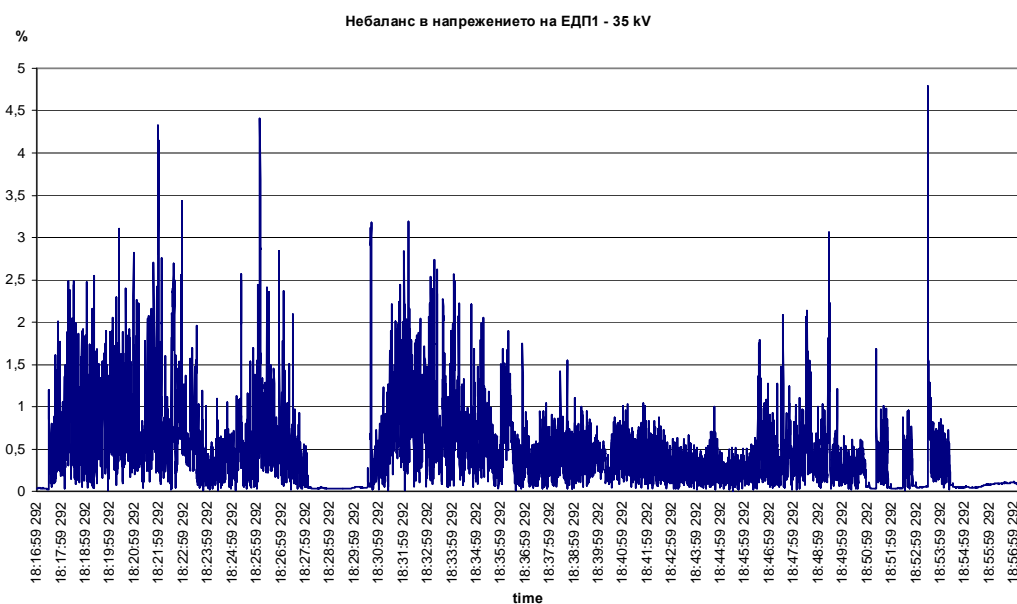
ност за времето на плавката е илюстрирана на фиг. 10. За отделните фази на технологичния процес стойностите на K_{2U} са различни, като в началото на плавката те са с високи стойности, а към края намаляват. Регистрирани са единични стойности на K_{2U} , надвишаващи 4%.

Статистическата обработка на извадката от измерванията е илюстрирана на фиг. 11. Получени са следните резултати:

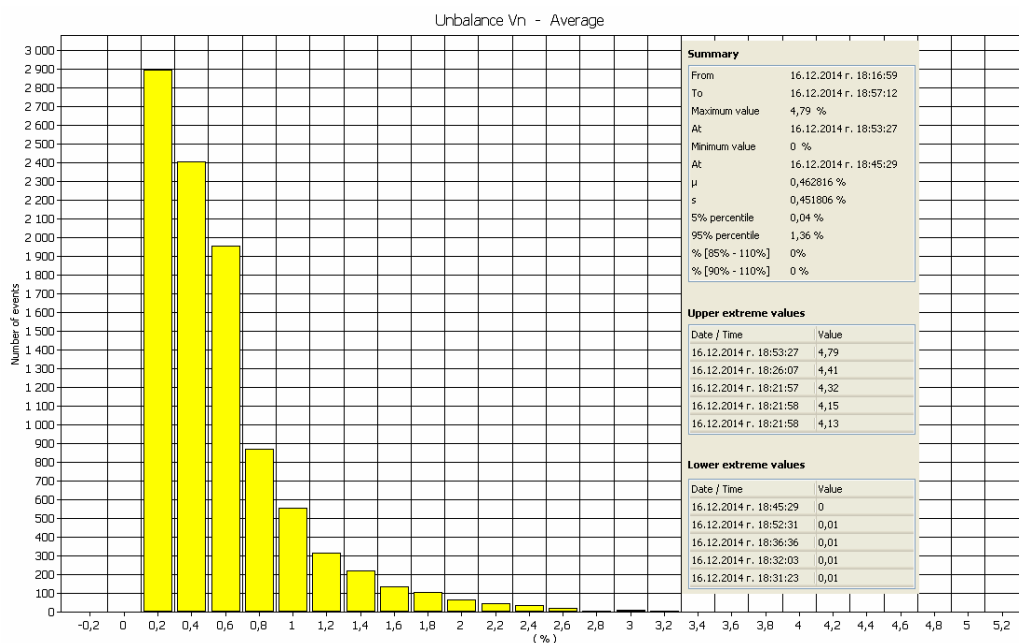
- максимална регистрирана стойност на K_{2U} – 4,79 %;
- минимална регистрирана стойност на K_{2U} – 0% ;
- средна стойност на K_{2U} – 0,463 %;

- средно квадратично отклонение – 0,452%;
- 5%-тият процентил е 0,04%;
- 95%-тият процентил е 1,36%.

Получените резултати за стойностите на коефициента на несиметрия на напрежението по обратна последователност K_{2U} на страна 35kV ще служат за изготвяне на лабораторен модел за изпитване на различни видове цифрови релейни защиты. Тези параметри не касаят електроснабдителното дружество на предприятието и нямат отношение към заложените в стандарта (БДС EN 50160:2010) изисквания.



Фиг. 10



Фиг. 11

Заклучение

Проведените експериментални изследвания на колебанието и несиметрията в напрежението при различни режими на работа на пещните трансформатори дават основание за следните изводи:

1. Едновременната работа на електродъговата стоманодобивна пещ и кофъчно пещната инсталация в „Стомана Индъстри“ АД не допринасят за влошаване на качеството на системното напрежение 220kV.

2. Получените експериментални данни са предпоставка за оптимален избор на цифрови релейни защиты, на защитните им функции и техните настройки. Те са основа за определяне оптималната структура на релейните защиты на пещните трансформатори, което е актуален въпрос за металургичните предприятия.

3. На база на резултатите от изследванията ще се извърши проектиране и избор на методика за настройване на подходящи цифрови защиты на пещни трансформатори. С помощта на съвременно товарно устройство (ARTES) в лабораторни условия ще се проведат експериментални изследвания на различни видове цифрови релейни защиты, като се генерират напрежения и токове с регистрираните стойности на колебанието и несиметрията в напрежението. На база на тези експерименти обосновано може да се избере най-подходящата релейна защита за пещните трансформатори на ЕДП и КПИ.

Литература

- БДС EN 50 160:2010, Характеристики на напрежението на електрическата енергия, доставяна от обществените електрически мрежи, 2014.
- Коновалов Ю.В., И.И.Воробьев. Анализ качества электро-энергии на предприятия. *Вестник АГТА №8, 2014.*
- Савин К.Н., Г.Л. Попова, В.А. Сыщиков Управление качеством электроэнергии через стандарт ISO 50001. *Фундаментальные исследования № 9, 2012, с. 410-413.*
- Стоилов И.Г., К.С.Джустров, Т.З.Николов. Изследване хармоничния състав на напрежението и тока при работа на електродъгови стоманодобивни пещи. *Енергиен форум, бр.15/16, 2015, с.64-69.*
- Хацевский К.В., Ю.М. Денчик, В.И.Клеутин, Д.А.Зубанов, А.В. Бубнов, В.В. Харламов. Проблемы качества электроэнергии в системах электроснабжения. *Омский научный вестник №2 (110)2012, с.212-214.*
- ARTES, Automatic Relay Test Systems, User Manual.
- Chapman D. The Cost of Poor Power Quality. *Copper Development Association, March 2001.*
- www.eurocopper.org.
- De Keulenaer H., Power Quality Self-assessment Guide, *European Copper Institute, May 2002.*
- IEC 61000-4-30:2008 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods (MOD).

Статията е препоръчана за публикуване от кат. „Електрификация на минното производство“.