

## Результаты исследования электрических параметров агрегата «печь-ковш» большой мощности и его влияния на питающую сеть

АПРЕЛКОВ И.Н.

ИНТЕКО, Брук-ан-дер-Мур, Австрия

*Процессы рафинирования стали и ее доводки по химическому составу и температуре в сталеразливочном ковше путем подогрева металла электрической дугой получили большое распространение на современных металлургических предприятиях. В статье рассмотрен электрический режим работы агрегата «печь-ковш» (АПК) с электропечным трансформатором мощностью 40 МВ·А. Ожидалось относительно незначительное изменение нагрузки АПК, так как электрическая дуга горит между электродами и поверхностью уже расплавленного металла без коротких замыканий. Однако проведенные исследования свидетельствуют о том, что нагрузка АПК является резкопеременной и нелинейной, создающей в питающей сети значительные колебания напряжения и гармонические искажения. Дана оценка коэффициента интенсивности (жесткости) фликера и определен уровень гармонических составляющих тока, вызываемых работой АПК. Полученные результаты позволяют прогнозировать влияние электрического режима работы АПК на уровни показателей качества электроэнергии при изменении параметров питающей сети, а также принять схемно-технические решения по обеспечению качества электроэнергии в заводской системе электроснабжения.*

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** агрегат «печь-ковш», электрические параметры, короткая сеть, питающая сеть, электропечной трансформатор, колебания напряжения, гармонические искажения, показатели качества электроэнергии

Агрегат «печь-ковш» (АПК) является неотъемлемой частью современного металлургического производства при доводке стали по химическому составу и температуре. Преобразование электрической энергии в тепловую на АПК осуществляется так же, как и в дуговых сталеплавильных печах (ДСП), но мощность печных трансформаторов АПК значительно меньше, чем ДСП, и составляет примерно 0,1–0,16 МВ·А/т. Это объясняется отсутствием такой энергозатратной стадии, как расплавление шихты: тепло затрачивается только на расплавление вводимых материалов и поддержание температуры металла.

Известно, что дуговые печи являются источниками мощных электромагнитных помех (ЭМП), отрицательно влияющих на работу других электроприемников. Основными видами ЭМП, создаваемыми дуговыми печами, являются отклонения и колебания напряжения, несинусоидальность и несимметрия токов и напряжений. В отличие от ДСП исследования помех, вызываемых АПК средней и большой мощности, в научной литературе практически не освещены. Однако измерения показателей качества электроэнергии (ПКЭ) в системах электроснабжения печных агрегатов свидетельствуют о том, что работа АПК оказывает существенное негативное влияние на питающую сеть. Поэтому при

проектировании и эксплуатации АПК большой мощности важной задачей является адекватная оценка влияния их режимов работы на ПКЭ и работу электроприемников, получающих питание от заводской электрической сети.

В качестве объекта исследования взят двухпозиционный агрегат «печь-ковш» емкостью 265 т кислородно-конвертерного цеха № 2 Thyssenkrupp Steel Europe AG (Дуйсбург, Германия). Данный АПК был поставлен фирмой INTECO Melting and Casting Technologies GmbH (Австрия) и введен в работу в 2018 г. [1].

Двухпозиционные АПК используются в конвертерных цехах большой производительности и предназначены для одновременной обработки двух ковшей с поочередным подогревом. Ковши устанавливают на двух сталевозах. Каждый ковш накрывают индивидуальной крышкой, а нагрев металла осуществляют поочередно путем переустановки электродов из одной крышки в другую.

Однолинейная схема электроснабжения двухпозиционного 265-тонного АПК представлена на рис. 1. Питание агрегата «печь-ковш» осуществляется кабельными линиями 25 кВ от силового понижающего трансформатора номинальной мощностью 63 МВ·А напряжением 110/25 кВ, установленного на заводской подстанции (ПС) 110 кВ.

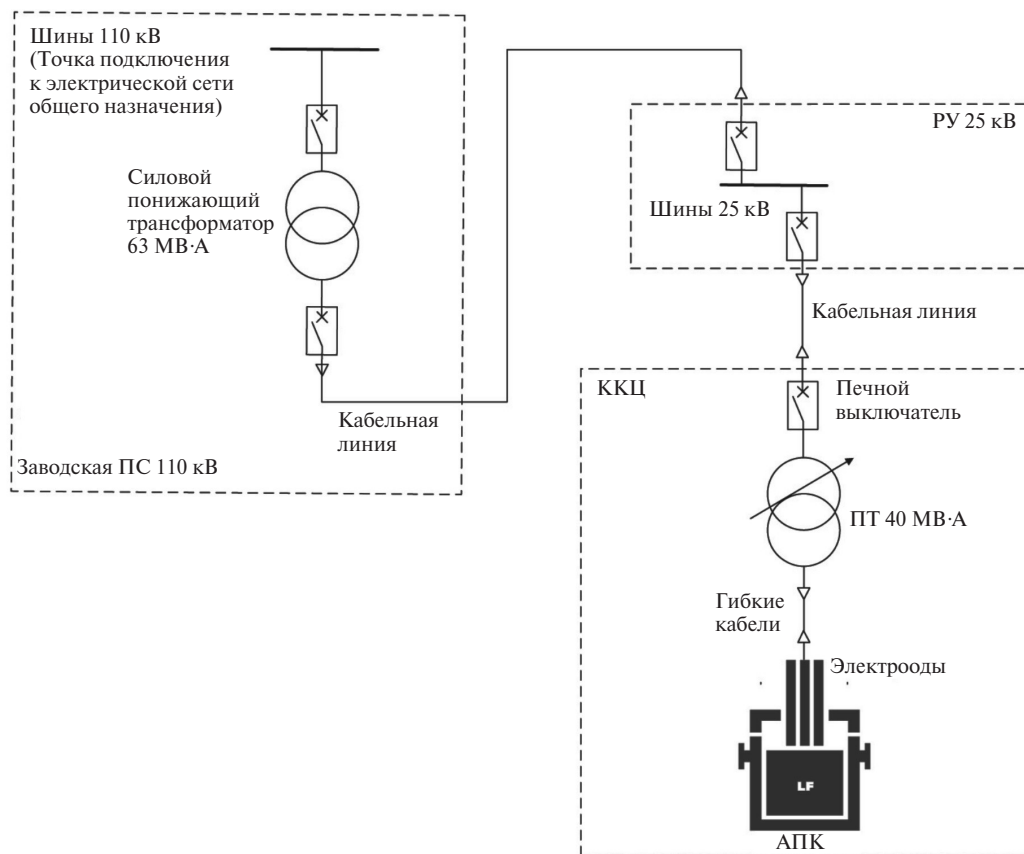


Рис. 1. Упрощенная однолинейная схема электроснабжения 265-тонного АПК

Fig.1. Simplified single line diagram of power supply for 265t LF

К шинам распределительного устройства (РУ) 25 кВ подключен только исследуемый АПК. Значения мощности короткого замыкания в месте подключения к электрической сети общего назначения (шины заводской ПС 110 кВ) составляют 4000 МВ·А в минимальном режиме и 6400 МВ·А в нормальном режиме. Исходя из требований энергосистемы к показателям КЭ на шинах 110 кВ установка компенсации реактивной мощности на шинах 25 кВ не предусмотрена. Таким образом, были предоставлены идеальные условия для исследования электромагнитных помех, вызываемых работой АПК.

**Характеристика объекта исследования.** Агрегат «печь-ковш» укомплектован печным трансформатором (ПТ) номинальной мощностью 40 МВ·А. Регулирование вторичного напряжения осуществляется под нагрузкой. Основные электрические характеристики ПТ приведены в табл. 1.

Схема соединения обмоток электропечного трансформатора — звезда/открытый треугольник. Допускается 12%-я перегрузка по току на всех ступенях вторичного напряжения ПТ не более 15 мин. Номинальное напряжение на стороне высшего напряжения (ВН) — 25 кВ. Напряжение на стороне низшего напряжения (НН) меняется дискретно в

диапазоне 531–349 В (10 ступеней регулирования). На ступенях регулирования напряжения 10–5 мощность ПТ сохраняется постоянной, равной 40 МВ·А. На ступенях 4–1 мощность снижается пропорционально уменьшению вторичного напряжения при одинаковом вторичном токе.

Многоамперный вторичный токопровод (короткая сеть) АПК представляет собой трехфазную линию передачи электроэнергии с участками шинного моста, гибких кабелей, токопроводящих электрододержателей и электродов.

Соединение обмоток НН электропечного трансформатора в треугольник выполнено на неподвижных контактных терминалах. Пластинчатые вводы НН расположены на крышке бака ПТ. Медные токоведущие трубы шинного моста — триангулированы. Гибкие водоохлаждаемые кабели скомпонованы в три триангулированные гирлянды (по два кабеля в гирлянде). Плакированные медью токопроводящие электрододержатели конструктивно выполнены и размещены таким образом, что образуют в поперечном сечении треугольник. Триангулированное расположение проводников по участкам вторичного токопровода способствует симметрированию сопротивлений фаз электрической цепи АПК и равномерному выделению мощности в

Таблица 1

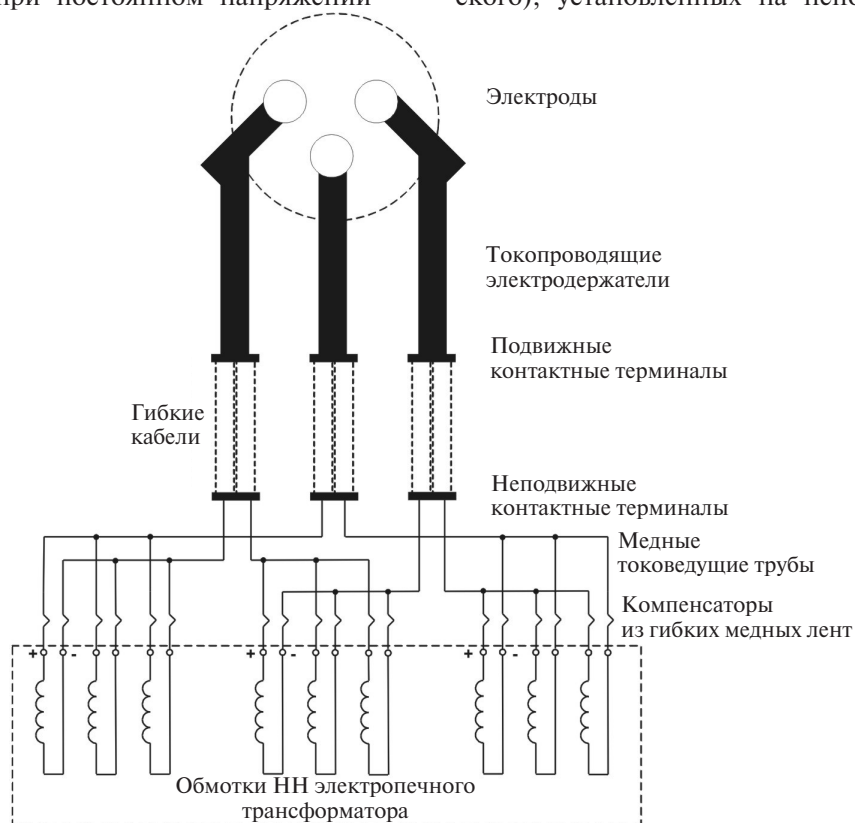
**Технические характеристики печного трансформатора АПК**  
**Technical parameters of LF transformer**

Положение указателя	Номинальная мощность, МВ·А	Мощность с перегрузкой, МВ·А	Номинальное напряжение на стороне ВН, В	Номинальный ток на стороне НН, А	Номинальное напряжение на стороне НН, В	Номинальный ток на стороне НН, А
1	31,5	35,3	25000	728	349	52131
2	33,2	37,2		767	368	
3	35,2	39,4		813	390	
4	37,5	42,0		865	415	
5	40	44,8		924	443	48619
6					475	47324
7					488	46096
8					501	44756
9					516	43492
10					531	

электрических дугах. Схематическое изображение вторичного токопровода АПК, отражающее схему его соединений и расположение проводников по участкам, приведено на рис. 2.

В процессе нагрева металла в АПК необходимо регулировать мощность дуг, изменяя количество энергии, подводимой к печи. Активная мощность дуги регулируется путем изменения вторичного напряжения ПТ, а при постоянном напряжении –

путем изменения тока в электрическом контуре печи. Для поддержания заданного значения тока фазы, и соответственно мощности дуги, используется цифровой регулятор электрического режима типа *ISEC* фирмы *INTECO Melting and Casting Technologies GmbH* [2]. Сигналы, пропорциональные токам в электродах АПК, поступают в регулятор от измерительных трансформаторов тока (пояс Роговского), установленных на неподвижных контакт-



**Рис. 2.** Схематическое изображение вторичного токопровода (короткой сети) АПК

**Fig. 2.** The schematic representation of the LF high-current circuit

ных терминалах вторичного токопровода. Сигналы фазного и линейного напряжений на стороне НН ПТ поступают в регулятор от измерительных трансформаторов напряжения, подключенных также к неподвижным терминалам вторичного токопровода.

В рамках пусконаладочных работ на АПК были проведены опыты короткого замыкания (КЗ) для определения значений  $X_{кС}$  и  $R_{кС}$  вторичного токопровода в соответствии с методикой Международной электротехнической комиссии (МЭК) [3]. Средние значения сопротивления короткой сети АПК по результатам четырех опытов КЗ составили:  $X_{кС} = 2,8$  мОм;  $R_{кС} = 0,4$  мОм.

Под короткой сетью понимается силовая цепь от вводов НН электропечного трансформатора до металла в АПК включительно. С учетом реальных параметров питающей сети, электрооборудования АПК и фактического сопротивления короткой сети была построена диаграмма рабочих электрических характеристик печи (рис. 3).

Как уже было указано выше, управление процессом нагрева металла осуществляется за счет регулирования вторичных напряжений и рабочих токов. Линиями зеленого цвета на диаграмме выделен проектный рабочий диапазон электрических режимов АПК. Согласно фиксированным уставкам в регуляторе электрического режима АПК работает

на ступенях печного трансформатора с 3-й по 8-ю включительно. Уставки рабочих токов варьируются в диапазоне от 30 до 47 кА.

**Измерение электрических параметров агрегата «печь-ковш» и ПКЭ питающей сети.** Исследования проводились в разные периоды времени в двух точках электрической сети: 1) шины РУ 25 кВ в кислородно-конвертерном цехе; 2) шины заводской ПС 110 кВ (место подключения к электрической сети общего назначения).

Для измерений использовался сертифицированный переносной анализатор качества электроэнергии типа G4500 фирмы *ELSPEC Ltd* (Израиль) [4]. Сигналы в прибор поступали от измерительных трансформаторов тока и напряжения, установленных в РУ. Прибором регистрировались фазные токи, фазные и линейные напряжения, активная и реактивная мощности (суммарные и по фазам), коэффициент мощности и пр.

Измерения ПКЭ (длительной  $P_{lt}$  и кратковременной  $P_{st}$  доз фликера, суммарного коэффициента искажения синусоидальности напряжения  $K_U$ , коэффициента  $n$ -й гармонической составляющей напряжения  $K_U(n)$ , коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности  $K_{2U}$ ) были проведены в течение недели по методике Европейского стандарта качества электроэнергии EN 50160 [5, 9,10].

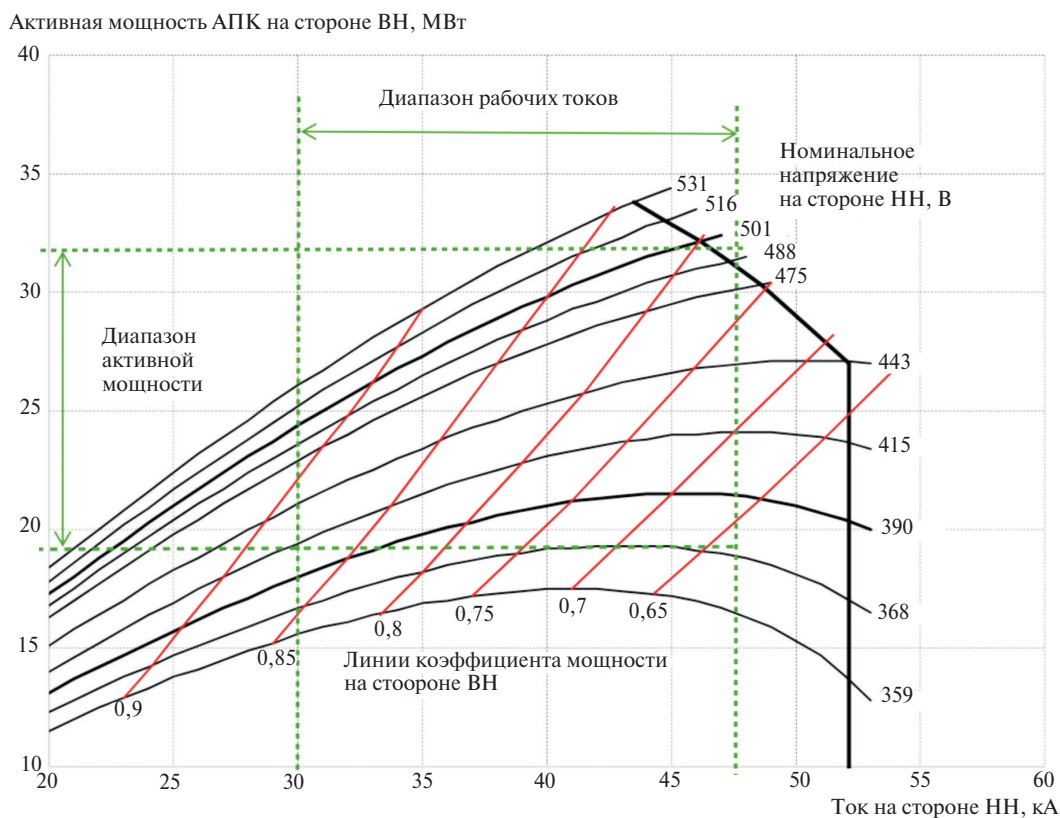


Рис. 3. Расчетная диаграмма рабочих электрических характеристик АПК

Fig. 3. LF power diagram (calculated)



Кроме этого, определялись уровни гармоник фазных токов АПК на стороне ВН ПТ. Одновременно регулятором *I*SEC фиксировались электрические параметры АПК на стороне НН ПТ.

Полученные данные об изменяющихся во времени значениях тока и мощности АПК на стороне НН позволяют нанести в координатах (*P*, *Q*, *S*,  $I_{\text{ср}} = (I_A + I_B + I_C)/3$ ) всю совокупность наблю-

давшихся на выбранном интервале времени плавки режимных точек *P*, *Q* и *S* и тем самым оценить реальные рабочие характеристики печного агрегата (рис. 4).

На рис. 4 выполнены соответствующие построения для режимов работы на ступенях ПТ с 3-й по 8-ю. Сплошные линии показывают расчетную зависимость мощности от вторичного тока. Точки –

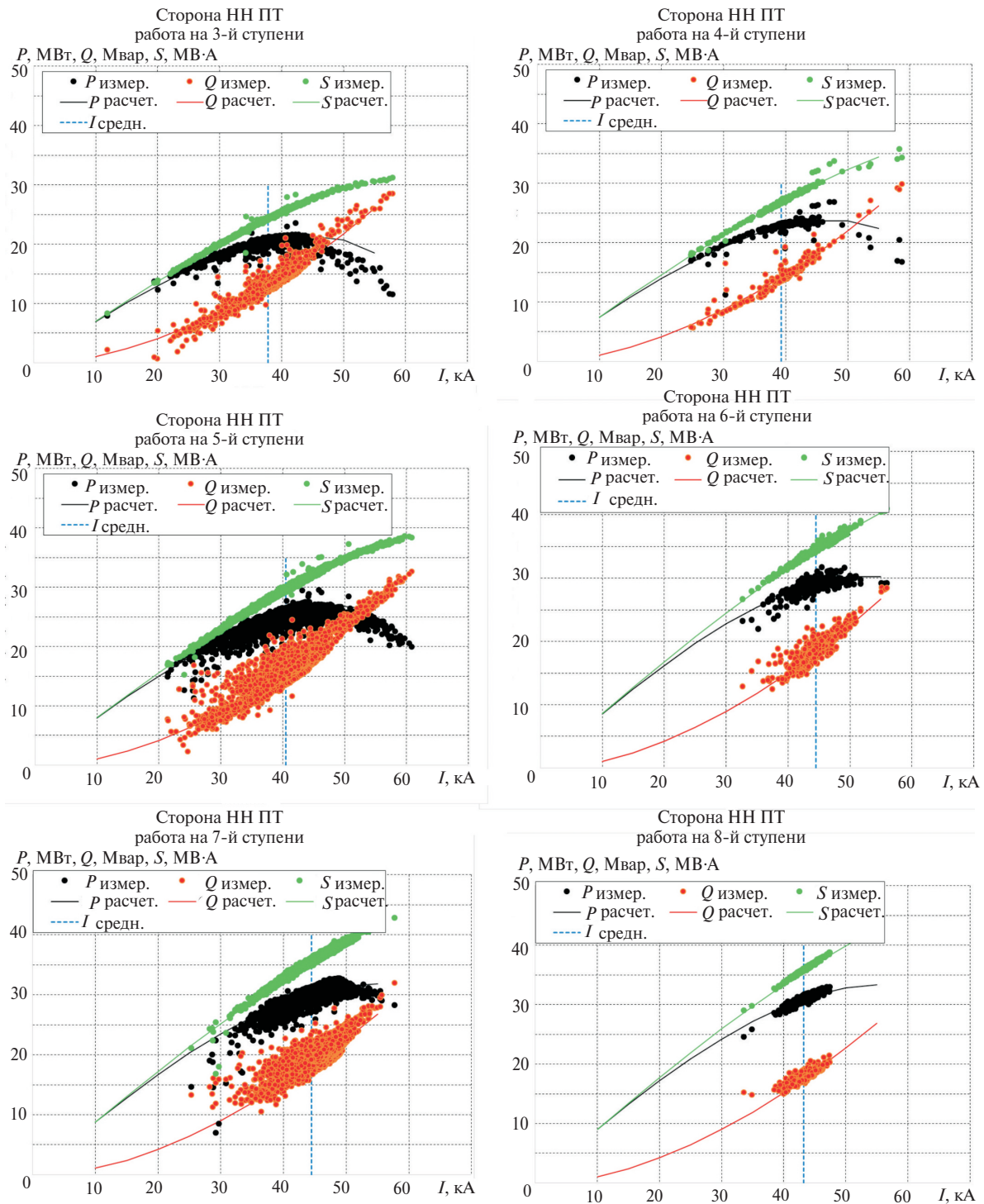


Рис. 4. Диаграммы зависимости *P*, *Q* и *S* АПК от усредненного по трем фазам тока на стороне НН ПТ (для ступеней с 3-й по 8-ю)

Fig. 4. *P*, *Q*, and *S* diagrams independence on LF average current over three-phases on the secondary side of the furnace transformer (operation at voltage taps 3 to 8)

Таблица 2

**Результаты измерений электрических параметров АПК**  
**Measurement results of LF electrical parameters**

Наименование параметра		Значения параметров на ступенях напряжения печного трансформатора					
		3	4	5	6	7	8
Время работы на ступени под током		7,8	1,6	39,9	3,1	45,1	2,5
Суммарное время работы под током, %							
Среднее рабочее значение на стороне НН	$I$ , кА	37,8	39,3	40,5	44,5	44,5	43,3
	$P$ , МВт	19,8	22,3	24,7	28,8	29,9	31,0
	$Q$ , МВ·Ар	13,3	14,4	15,8	18,8	19,1	17,9
	$S$ , МВ·А	24,2	26,8	29,5	34,6	35,6	35,9
	Коэффициент мощности $\cos\varphi$	0,83	0,84	0,84	0,83	0,84	0,86

измеренные значения суммарной мощности в зависимости от усредненных по трем фазам значений тока на стороне НН ПТ (данные с регулятора *ISEC*). Электрические параметры фиксировались с однократным усреднением. Длительность интервала анализа – 205 минут (суммарное время работы АПК под током).

Как видно из рис. 4, усредненные за 1 с значения суммарных мощностей изменяются в диапазонах:  $P = 7–33$  МВт,  $Q = 2–32$  МВ·Ар и  $S = 8–42$  МВ·А.

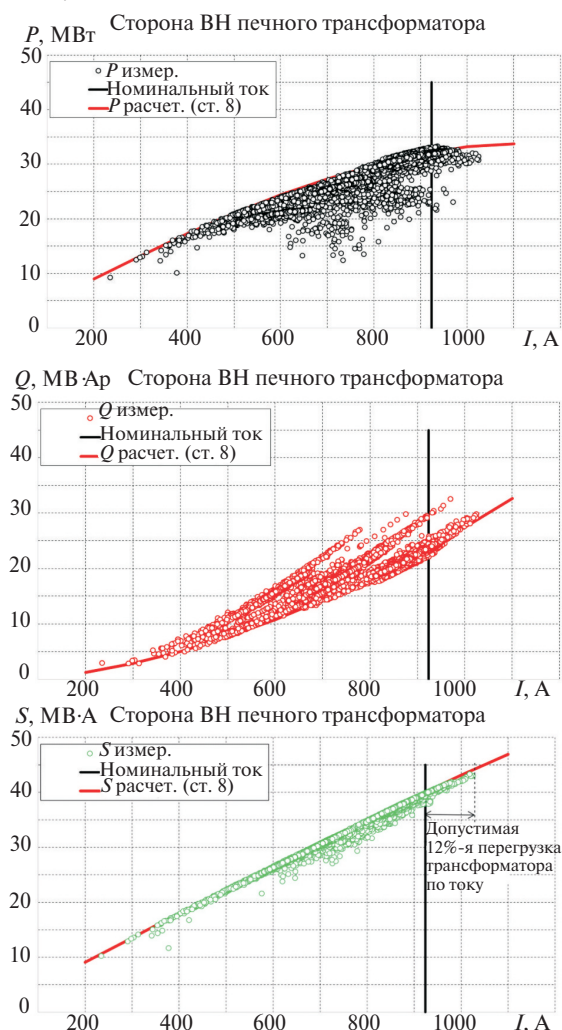
Средние значения измеренных электрических параметров АПК на стороне НН для отдельных ступеней напряжения печного трансформатора сведены в табл. 2.

Диапазон колебаний мощности АПК имеет регулярный характер и зависит в основном от следующих факторов технологического режима [11]: времени прибытия ковша на АПК для нагрева после выпуска из конвертера (наличие корки шлака); толщины шлакового слоя на зеркале металла до и во время нагрева; времени под током; интенсивности перемешивания при продувке металла в ковше инертным газом.

Результаты измерений прибором G4500 на стороне 25 кВ показывают аналогичный характер изменения мощности в зависимости от выбранной ступени ПТ (см. рис. 5). Точки – измеренные значения мощности в зависимости от усредненных по трем фазам значений тока ПТ на стороне ВН. Электрические параметры фиксировались также с однократным усреднением. Номинальный ток ПТ показан сплошной черной линией. Наблюдается кратковременная 12%-я перегрузка по току (не более 4% суммарного времени наблюдения), что допустимо для применяемого печного трансформатора АПК. Усредненные за 1 с значения суммарных мощностей на стороне 25 кВ изменяются в

диапазонах:  $P = 9–33$  МВт,  $Q = 3–32$  МВ·Ар и  $S = 10–43$  МВ·А.

Полученные экспериментально характеристики электрических параметров АПК близки расчетным данным.



**Рис. 5.** Диаграммы зависимости  $P$ ,  $Q$  и  $S$  АПК от усредненного по трем фазам тока на стороне ВН ПТ

**Fig. 5.**  $P$ ,  $Q$ , and  $S$  diagrams independence on LF average current over three-phases on the primary side of the furnace transformer

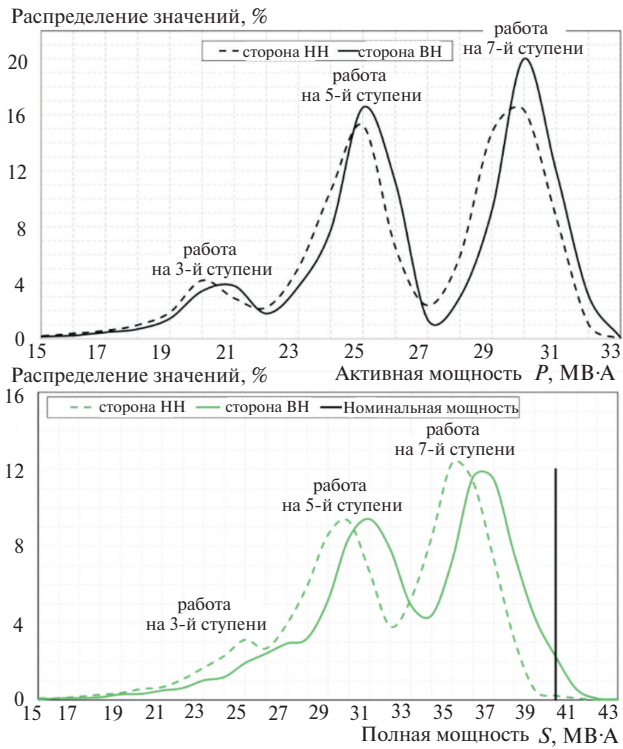


Рис. 6. Функции плотности распределения значений активной и полной мощности на сторонах НН и ВН ПТ

Fig. 6. Frequency distribution function of  $P$  and  $S$  values on LV and MV sides of furnace transformer

На рис. 6 представлены функции плотности распределения значений активной и полной мощ-

ности ПТ на сторонах НН и ВН за суммарное время наблюдения работы АПК под током. Функция плотности распределения значений  $S$  наглядно демонстрирует фактическую загрузку печного трансформатора АПК. Потери активной мощности в нем составляют 0,3–0,4 МВт.

Следует отметить, что процесс нагрева металла в АПК происходит в основном на 5-й и 7-й ступенях напряжения (85% суммарного времени работы печи по током).

В табл. 3 приведено сравнение средних значений электрических параметров АПК на обеих сторонах ПТ на всем интервале анализа (205 мин работы под током).

Таблица 3

Средние значения электрических параметров АПК  
Average working values of LF electrical parameters

Наименование параметра	Среднее рабочее значение	
	ВН	НН
Ток $I$ , кА	0,78	42,2
Активная мощность $P$ , МВт	27,2	26,8
Реактивная мощность $Q$ , МВ·Ар	19,1	17,2
Полная мощность $S$ , МВ·А	33,5	32,1
Коэффициент мощности $\cos\varphi$	0,81	0,84

На рис. 7 показан фрагмент изменения линейного напряжения на шинах 25 кВ, полной мощно-

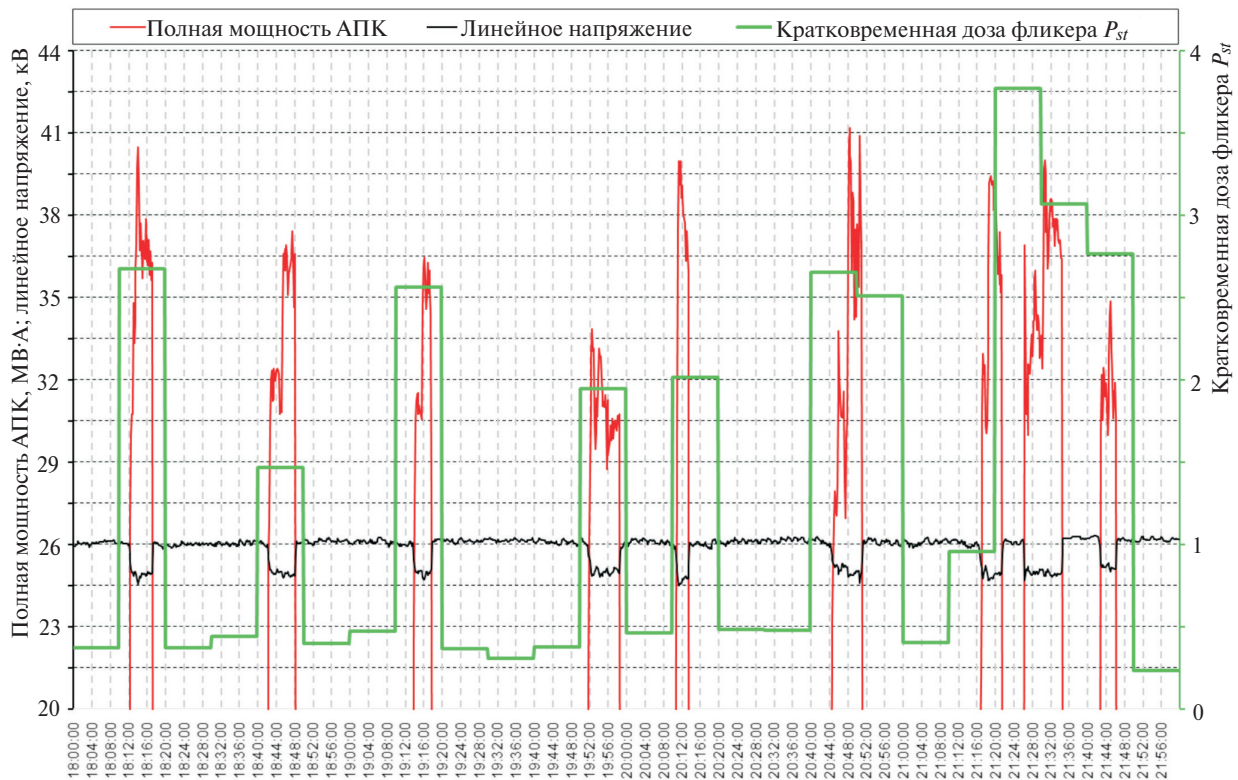


Рис. 7. График изменения линейного напряжения на шинах 25 кВ, суммарной мощности АПК и кратковременной дозы фликера  $P_{st}$

Fig. 7. Time curves of phase-to-phase voltage at 25 kV furnace busbar, LF total apparent power, and short-term voltage flicker  $P_{st}$



**Показатели качества электроэнергии**  
**Power Quality Indicators**

ПКЭ	Шины 25 кВ печного РУ в ККЦ		Шины заводской ПС 110 кВ		Допустимые предельные значения
	95%-е значение	пиковое значение	95%-е значение	пиковое значение	95%-е значение
$P_H$ , отн.ед.	2,1	2,7	0,4	0,7	$\leq 0,5$
$P_{st}$ , отн.ед.	2,5	5,9	0,6	0,9	$\leq 0,8$
$K_{2U}$ , %	0,3	0,8	0,11	0,18	$\leq 2,0$
$K_U$ , %	1,4	1,6	1,24	1,4	$\leq 2,0$

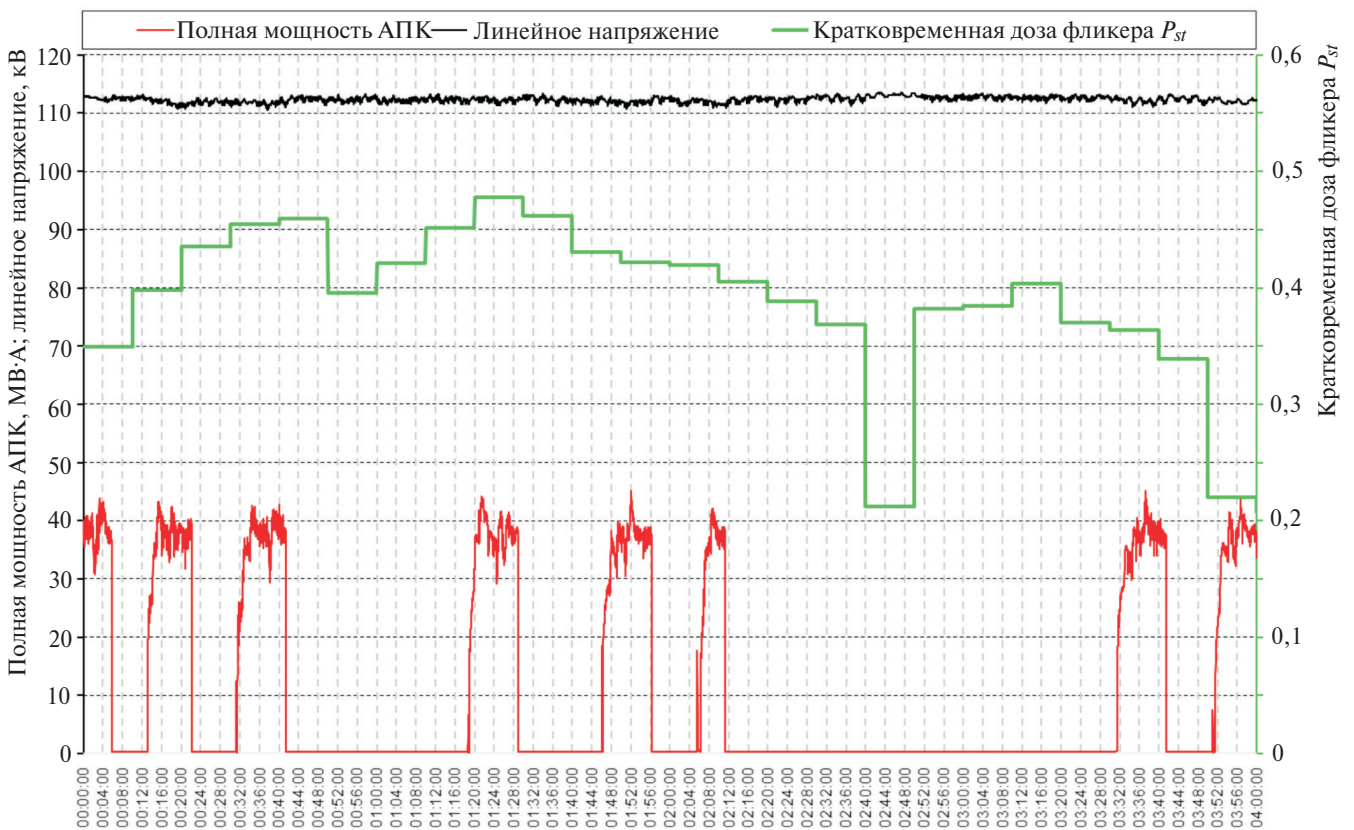
сти АПК и кратковременной дозы фликера  $P_{st}$  в процессе нагрева металла. Даже при принятом здесь 10-секундном усреднении колебания напряжения значительны, при этом напряжение изменяется от уровня напряжения холостого хода  $U_{xx} \approx 26,2$  кВ до минимального значения 24,5 кВ во время нагрузки ПТ (диапазон изменений напряжения  $\Delta U \approx 6,5\%$ ).

Согласно [3, 5, 6] следует учитывать также высокочастотные изменения огибающей действующих значений напряжения (наиболее жесткие нормы на изменение напряжения с частотами 8–

10 Гц), которые можно получить только при измерении дозы фликера напряжения. Из рис. 7 видно, что при работе АПК значение кратковременной дозы фликера  $P_{st}$  линейного напряжения 25 кВ достигает уровня 3,75 отн. ед. В режиме без нагрузки значения фликера снижаются до 0,3–0,5 отн. ед.

В табл. 4 представлены основные ПКЭ. Измерения были проведены в течение 7 суток при нормальном режиме работы сети.

Отметим, что допустимые предельные значения ПКЭ установлены техническими требованиями сетевой организации и относятся к напряжению в



**Рис. 8.** График изменения линейного напряжения на шинах 110 кВ, суммарной мощности АПК и кратковременной дозы фликера  $P_{st}$

**Fig. 8.** Time curves of e voltage at 110 kV busbar, LF total apparent power, and short-term voltage flicker  $P_{st}$

месте подключения к электрической сети общего назначения (шины 110 кВ заводской подстанции).

**Анализ значений кратковременной дозы фликера  $P_{st}$  линейного напряжения.** Как видно из табл. 4, на шинах 25 кВ значения доз фликера  $P_{ft}$  и  $P_{st}$  линейного напряжения явно выше допустимых норм для сетей общего назначения, питающих электроосветительную нагрузку, что, однако, принимая во внимание внутриводской статус сети 25 кВ, не требует обязательного принятия мер по снижению колебаний напряжения.

Измеренные в месте подключения сети общего назначения (шины 110 кВ заводской ПС) ПКЭ соответствуют требуемым нормам, однако 95%-е значения доз фликера  $P_{ft}$  и  $P_{st}$  приближаются к предельно допустимым значениям, и в случаях снижения мощности КЗ на этих шинах или подключения новых мощных потребителей с резкопеременной нагрузкой значения дозы фликера могут превысить допустимый уровень.

Коэффициент интенсивности (жесткости) 95%-е значения фликера для данного АПК определяется по следующей формуле из литературы [6]:

$$K_{st95\% \text{ АПК}} = P_{st95\%} \frac{S_{\text{КЗ}_{\text{сеть}}}}{S_{\text{КЗ.АПК}}} = 2,5 \frac{540}{70} \approx 20, \quad (1)$$

где  $P_{st95\%}$  – 95%-е значение кратковременной дозы фликера (по результатам анализа измерений);  $S_{\text{КЗ}_{\text{сеть}}}$  – мощность КЗ сети на шинах 25 кВ в точке присоединения АПК (расчетное или экспериментальное значение), МВ·А;  $S_{\text{КЗ.АПК}}$  – мощность эксплуатационного КЗ АПК (расчетное или экспериментальное значение), МВ·А.

Используя полученный из формулы коэффициент  $K_{st95\% \text{ АПК}}$ , можно оценить по нижеуказанному выражению уровень фликера  $P_{st95\%}$  на шинах 110 кВ, который создается режимом работы только от самого АПК (т.е. без работы существующей нагрузки заводской сети 110 кВ):

$$P_{st95\% \text{ АПК}} = K_{st95\% \text{ АПК}} \frac{S_{\text{КЗ}_{\text{линия АПК}}}}{S_{\text{КЗ}_{110 \text{ кВ}_{\text{сеть}}}}} = 20 \frac{80}{6400} \approx 0,25, \quad (2)$$

где  $S_{\text{КЗ}_{110 \text{ кВ}_{\text{сеть}}}}$  – мощность КЗ сети на шинах 110 кВ (6400 МВ·А в нормальном режиме);  $S_{\text{КЗ}_{\text{линия АПК}}}$  – мощность на стороне 110 кВ понижающего трансформатора 63 МВ·А при эксплуатационном КЗ АПК (расчетное значение).

Из рис. 8 видно, что значения фликера напряжения в сети 110 кВ практически не меняются при вводе АПК в работу вследствие уже существующих высокочастотных колебаний напряжения заводской сети 110 кВ от прочих резкопеременных нагрузок завода (прокатных станков и т.д.). Значение

существующего уровня фликера  $P_{st95\%}$  принимается равным 0,53 отн. ед. (по результатам обработки интервалов без работы АПК). Анализ интервалов с работой АПК показывает, что 95%-е значение уровня фликера  $P_{st}$  увеличивается до 0,6 отн. ед. Следовательно, исходя из результатов измерений, предоставлена возможность перепроверить вклад работы АПК в общий фон фликера напряжения на шинах 110 кВ по формуле из литературы [6]:

$$P_{st95\% \text{ АПК}} = \sqrt{P_{st \text{ общий}}^2 - P_{st \text{ существ}}^2} = \sqrt{0,6^2 - 0,53^2} \approx 0,28. \quad (3)$$

Следовательно, при снижении мощности КЗ до 4000 МВ·А (минимальный режим работы) доза фликера  $P_{st}$  от работы АПК возрастет до 0,4 отн. ед., а общий уровень фликера напряжения на шинах 110 кВ увеличится до 0,7 отн. ед. Прогнозируемый уровень при минимальном режиме работы сети 110 кВ довольно близок к предельно допустимому значению 0,8 отн. ед.

**Анализ гармонических составляющих.** Работа АПК сопровождается появлением высших гармоник тока за счет нелинейной характеристики электрической дуги [7, 8]. Случайный характер высших гармоник АПК делает проблематичным их аналитический расчет. Поэтому они определяются экспериментальным путём. В табл. 5 приведено процентное по отношению к первой гармонике содержание высших гармоник тока. Длительность интервала анализа – 205 мин (суммарное время работы АПК под током).

Таблица 5

Значения высших гармоник тока АПК на стороне ВН ПТ  
Values of current harmonic of LF on the MV side of the furnace transformer

Номер гармоники тока	95%-е значение	100%-е значение
2	2,7	6,7
3	3,5	5,7
4	1,3	3,3
5	1,6	2,6
6	0,7	1,3
7	0,7	1,0
8	0,2	0,7
9	0,2	0,6
10	–	0,4

В процессе нагрева металла в АПК генерируются гармоники тока порядков 2, 3, 4 и 5, максимальные значения которых достигают  $K_{I2 \text{ max}} = 6,7\%$ ,  $K_{I3 \text{ max}} = 5,7\%$ ,  $K_{I4 \text{ max}} = 3,3\%$  и  $K_{I5 \text{ max}} = 2,6\%$  при времени усреднения 1 с.



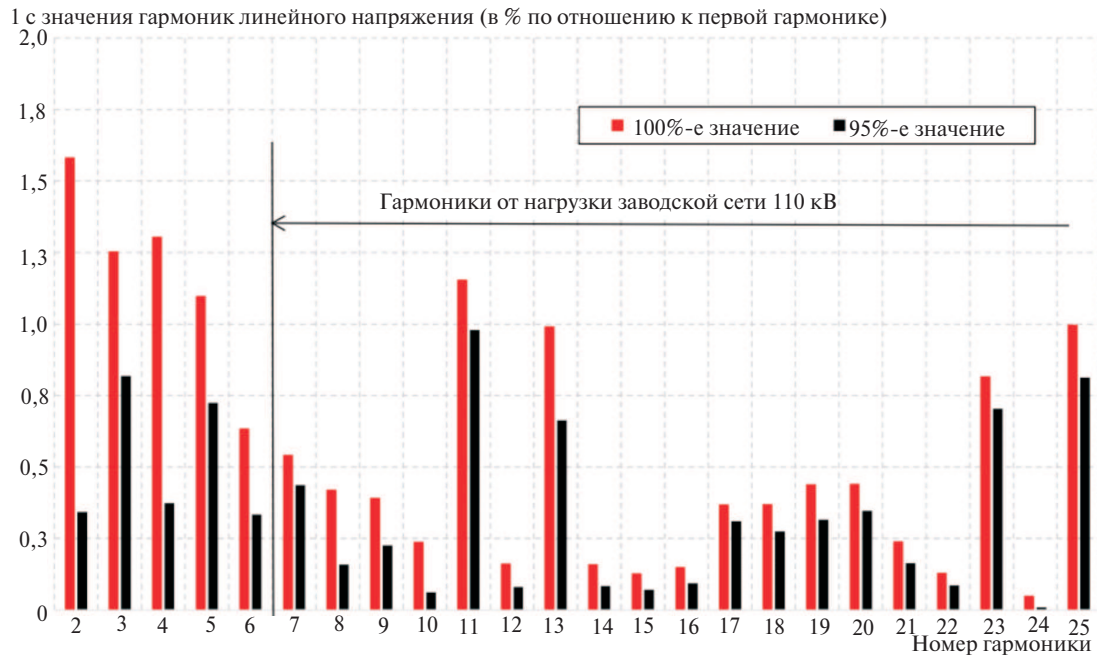


Рис. 9. Значения высших гармоник линейного напряжения на шинах 25 кВ

Fig. 9. Voltage harmonic values at 25 kV furnace busbar

Аналогичную тенденцию демонстрирует спектр высших гармоник линейного напряжения на шинах 25 кВ при обработке исследуемого интервала анализа с временем усреднения 1 с (рис. 9). Здесь можно отметить гармоники порядков 3 и 5, значения которых достигают  $K_{U395\%} = 0,8\%$  и  $K_{U595\%} = 0,7\%$ . Высокие пиковые значения гармоник порядков 2, 3, 4 и 6 связаны с большими гармоническими возмущениями в результате переходного процесса включения трансформатора АПК на холостом ходу. Уровни гармоник порядка 7 и выше практически не меняются при вводе АПК в работу вследствие уже имеющихся гармонических искажений напряжения заводской сети 110 кВ, трансформируемых в сеть 25 кВ через силовой понижающий трансформатор.

Следует отметить, что в связи с равномерной фазной нагрузкой диапазоны изменения значений мощности и тока фаз АПК примерно одинаковы, поэтому при анализе электрические параметры и ПКЭ усреднялись по трем фазам.

**Выводы.** В отличие от дуговых сталеплавильных печей (ДСП) агрегаты «печь-ковш» вследствие меньшей мощности и отсутствия стадии расплавления шихты работают в более спокойном режиме. Коэффициент интенсивности (жесткости) фликера АПК примерно в 3–4 раза меньше, чем при работе ДСП. Однако нагрузка АПК является переменной и нелинейной. В связи с этим важной задачей при проектировании и эксплуатации АПК является адекватная оценка влияния их режимов работы на показатели качества электроэнергии и на электро-

приемники, которые подключены к заводской системе электроснабжения. В статье представлены результаты основных ПКЭ, дана оценка коэффициента интенсивности (жесткости) фликера и определен уровень высших гармонических составляющих тока печи. Результаты исследования позволяют прогнозировать влияние электрического режима работы АПК на уровне ПКЭ при изменении параметров питающей сети, а также выбрать схемно-технические мероприятия по обеспечению качества электроэнергии в системе электроснабжения металлургического производства.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ponamarenko A., Brand T., Löcken M., Arns M., Meiss S., Dolle B. The first production results of new ladle-furnace in Oxygen Steel Plant No. 2, ThyssenKrupp Steel Europe AG, Germany", METEC 2019, Dusseldorf, Germany.
2. ISEC-INTECO smart electrode control system [Электрон. ресурс] URL: <https://www.inteco.at> (дата обращения 25.01.2021).
3. IEC 60676:2011. Industrial electroheating equipment – Test methods for direct arc furnaces. Ed.3.0, 2011, 23 p.
4. G4500 Portable power quality analyzer [Электрон. ресурс] URL: <https://www.elspec-ltd.com> (дата обращения 25.01.2021).
5. EN 50160:2010. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks, 2010, 44 p.
6. IEEE 1453-2015. IEEE Recommended practice for the analysis of fluctuating installations on power systems, 2015, 62 p.
7. Аркаев А.Ф. Об опыте проектирования электроснабжения агрегатов «печь-ковш». – Электрика, 2006, № 2, с. 11–15.
8. Егизарьян Д.К. Метод контроля рафинирования стали в агрегате ковш-печь по параметрам электрического режима. – Молодой ученый, 2012, № 12 (47), с. 55–60.
9. Вагин Г.Я., Куликов А.И. Качество электрической энергии в системах электроснабжения. Анализ состояния методов

нормирования и контроля. – Электрические станции, 2019, № 6, с. 54–59.

10. **Вагин Г.Я.** Комментарий к новому стандарту на качество электрической энергии ГОСТ Р 54149–2010 и сопровождающим его стандартам. – Промышленная Энергетика, 2013, № 1, с. 39–43.

11. **Переворочаев Н.М., Крикунов Б.П.** Совершенствование электрических и технологических режимов доводки металла на

установке ковш-печь. – Металл и литьё Украины, 2011, № 9–10 (220–221), с. 39–45.



[14.09.2020]

*Автор: **Апрелков Иван Николаевич** – кандидат техн. наук, ведущий инженер-электрик в компании ИНТЕКО, г. Брук-ан-дер-Мур (Австрия).*

*Elektrichestvo, 2021, No. 3, pp. 33–43*

*DOI:10.24160/0013-5380-2021-3-33-43*

## Study Results of the Electrical Parameters of the High-Power «Ladle-Furnace» Unit and its Impact on the Power Supply Network

**APRELKOV Ivan N.** (INTECO Company, Bruck a.d. Mur, Austria) – Senior Engineer Electrics & Automation, PhD (Eng.)

*The steel refinement and its chemical composition and temperature finalization processes in a pouring ladle carried out by heating the metal with electric arc have received wide use at modern metallurgical enterprises. The article considers the electrical operating conditions of the ladle furnace unit (LFU) equipped with a 40 MVA electric furnace transformer. It was expected that the LFU load would vary insignificantly, because the electric arc burns between the electrodes and the surface of already molten metal, without the occurrence of short circuits. However, the accomplished studies testify that the LFU load is abruptly variable and nonlinear in nature, and gives rise to significant voltage fluctuations and harmonic distortions in the power supply network. The flicker intensity (severity) factor has been estimated, and the level of current harmonic components generated due to LFU operation has been determined. By using the obtained results, it becomes possible to predict the influence of LFU electric operating conditions on the levels of electric power quality indicators in changing the power supply network parameters, and to adopt circuit engineering solutions for assuring the electric power quality in the plant electric power supply system.*

**Key words:** «ladle-furnace» unit, electrical parameters, short network, power supply network, electric furnace transformer, voltage fluctuations, harmonic distortion, power quality indicators

### REFERENCES

1. **Ponamarenko A., Brand T., Lucken M., Arns M., Meiss S., Dolle B.** The first production results of new ladle-furnace in Oxygen Steel Plant No. 2, ThyssenKrupp Steel Europe AG, Germany”, METEC 2019, Dusseldorf, Germany.

2. **ISEC-INTECO** smart electrode control system [Electron Resource] URL: <https://www.inteco.at> (Date of appeal 25.01.2021).

3. **IEC 60676:2011** Industrial electroheating equipment – Test methods for direct arc furnaces. Ed.3.0, 2011, 23 p.

4. **G4500** Portable power quality analyzer [Electron Resource] URL: <https://www.elspec-ltd.com> (Date of appeal 25.01.2021).

5. **EN 50160:2010** Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks, 2010, 44 p.

6. **IEEE 1453-2015.** IEEE Recommended practice for the analysis of fluctuating installations on power systems, 2015, 62 p.

7. **Arkaev A.F.** *Elektrika – in Russ. (Electric)*, 2006, No. 2, pp.11–15.

8. **Egiazar'yan D.K.** *Molodoj uchenyj – in Russ. (Young Scientist)*, 2012, No. 12 (47), pp. 55–60.

9. **Vagin G.Ya., Kulikov A.L.** *Elektricheskie stantsii – in Russ. (Power Plants)*, 2019, No 6, pp.54–59.

10. **Vagin G.Ya.** *Promyshlennaya energetika – in Russ. (Industrial Energy)*, 2013, No. 1, pp. 39–43.

11. **Perevorochaev N.M., Krikunov B.P.** *Metall i lit'yo Ukrainy – in Russ. (Metal and Casting of Ukraine)*, 2011, No. 9–10 (220–221), pp. 39–45.

[14.09.2020]