

к.т.н. Кухарев А. Л.

(СУНИГОТ УИПА г. Стаханов, Украина,

alex.kuharev@mail.ru)

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ БАТАРЕЙ КОНДЕНСАТОРОВ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ФЕРРОСПЛАВНОГО ЗАВОДА

Представлены результаты экспериментальных исследований режимов работы конденсаторных батарей в системе электроснабжения мощного ферросплавного завода. Проведен анализ причин появления высших гармоник в спектрах тока и напряжения конденсаторных батарей.

Ключевые слова: Система электроснабжения, ферросплавная печь, батарея конденсаторов, высшие гармоники.

Постановка проблемы. В настоящее время ферросплавные печи являются одними из наиболее мощных электротермических установок, при этом максимальная единичная установленная мощность ферросплавных печей в СНГ достигает 81 МВА. Как правило, для ферросплавных цехов характерна непрерывная групповая работа ферросплавных печей, поэтому в системах электроснабжения ферросплавных заводов применяются крупные главные понизительные подстанции (ГПП), оборудованные двумя-тремя и более силовыми трансформаторами, мощным коммутационным электрооборудованием, а также устройствами компенсации реактивной мощности. Колебания активной и реактивной нагрузки, несимметрия, а также высшие гармоники токов и напряжений вызывают необходимость решения ряда технических задач, направленных на повышение эффективности работы электрооборудования в системах электроснабжения ферросплавных заводов.

Анализ последних исследований и публикаций. По способу преобразования электрической энергии в тепловую ферросплавные печи относятся к дуговым печам смешанного нагрева, в которых часть мощности, подводимой к печи, выделяется в электрических дугах, а другая ее часть расходуется при прохождении тока по шихте и расплаву [1]. Некоторые из последних исследований систем электроснабжения дуговых и ферросплавных печей приведены в публикациях [2–4]. В

данных работах особое внимание уделяется вопросам электромагнитной совместимости систем электроснабжения и печей, однако детально не рассматриваются режимы работы конденсаторных установок.

Целью данной статьи является экспериментальное исследование и анализ режимов работы батарей конденсаторов поперечной компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения ПАО «Стахановский завод ферросплавов».

Материалы и результаты исследования. Схема электроснабжения Стахановского завода ферросплавов приведена на рисунке 1. ГПП завода получает питание по двум воздушным линиям 220 кВ от подстанции «Михайловка» Донбасской электроэнергетической системы. По стороне 220 кВ ГПП выполнена по схеме блок «линия-трансформатор» с установкой отделителей и короткозамыкателей РЛНД-220-1000. На ГПП установлены три понижающих трансформатора ТРДЦН-160000/220, ТДЦ-125000/220, ТДЦГ125000/220. Распределительное устройство 10 кВ ГПП выполнено по схеме с двойной системой сборных шин, каждая из которых разделена на две рабочие секции. В качестве вводных и секционных выключателей используются выключатели генераторного класса МГ-10-5000. Каждая ферросплавная печь (№№1-8) присоединена к секциям шин через шинные разъединители РВР-10-4000, выключатель МГ-10-3000 и токоограничивающий реактор РБА-10-2000-8.

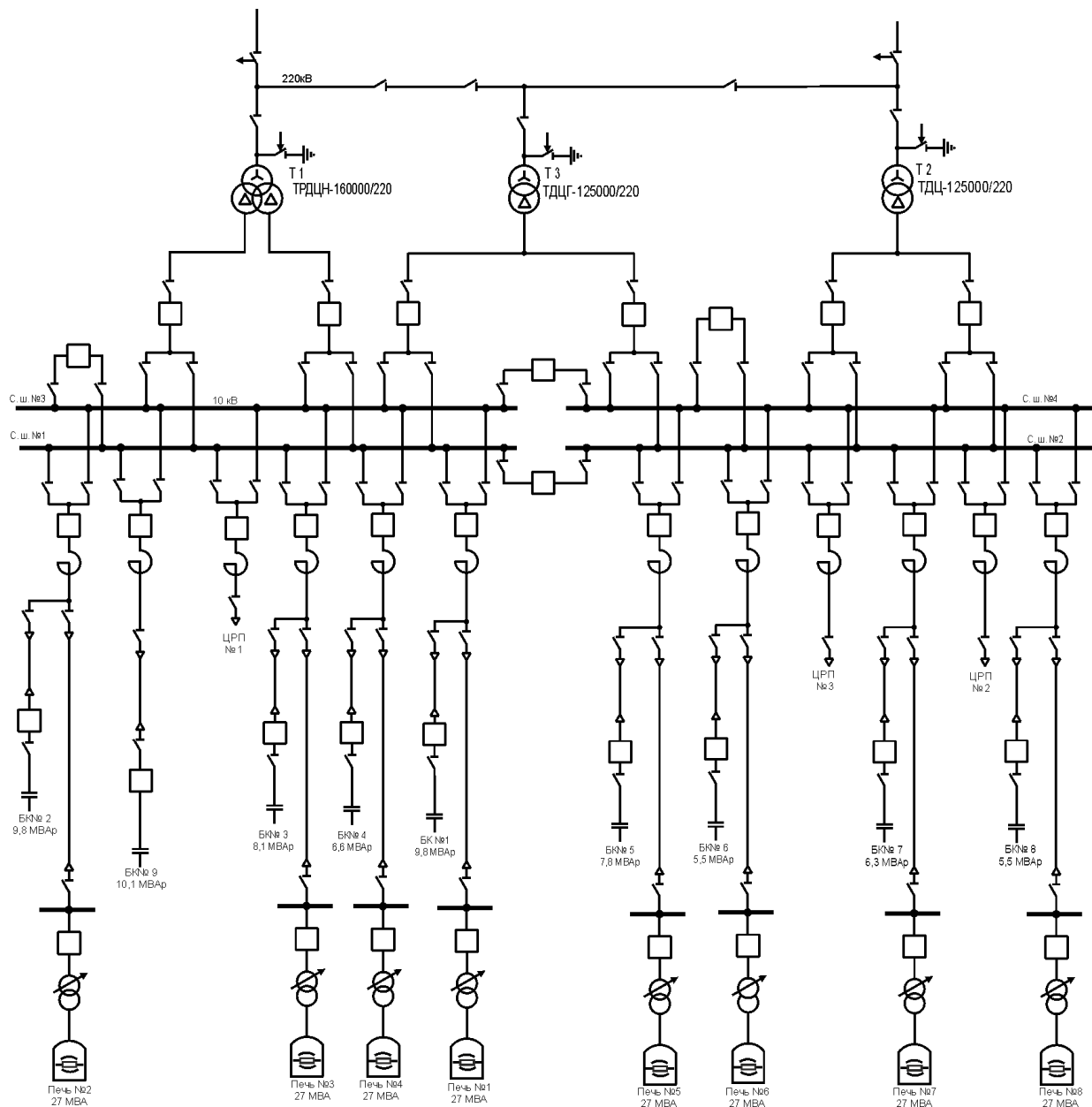


Рисунок 1 — Схема электроснабжения Стахановского завода ферросплавов

Благодаря наличию двух шинных разьединителей печь может подключаться к одной из двух систем шин.

Нормальной схемой электроснабжения завода предусмотрена одновременная работа трех силовых трансформаторов с раздельной работой секций шин, от каждой из которых питаются две электропечные установки. Кроме того, на заводе имеется центральная распределительная подстанция (ЦРП), состоящая из трех рабочих секций шин 10 кВ, которая служит для пи-

тания других потребителей завода (дымососов, вспомогательных механизмов плавильного цеха, электродного цеха, котельной, насосных установок и других участков завода).

Основные технические характеристики ферросплавных печей приведены в таблице 1. Питание каждой печи осуществляется от трех однофазных электропечных трансформаторов, расположенных в непосредственной близости от печи. Следует отметить, что коэффициент мощности рас-

смагиваемых ферросплавных печей лежит в пределах 0,7–0,82 и существенно зависит от их режима работы, который в большей степени определяется типом выплавляемого сплава. Поэтому на ГПП завода установлены устройства компенсации реактивной мощности в виде батарей конденсаторов (БК), включаемых по схеме индивидуальной поперечной компенсации на каждом печном присоединении. Кроме БК №№1-8 также имеется дополнительная БК №9.

Исследования проводилось на ГПП завода в режиме, когда сетевой трансформатор Т1 ТРДЦН-160000/220 мощностью 160 МВА был выведен в ремонт и секции шин № 3 и 4 получали питание от трансформатора Т2 ТДЦ-125000/220 мощностью 125 МВА. От секции шин №3 ГПП получала питание печь № 4 с БК №4. Схемными мероприятиями предусматривалось исключение взаимовлияния соседних нагрузок на режим работы БК№4.

Основные измерения проводились на присоединении БК № 4. Батарея выполнена в виде последовательно-параллельного соединения низковольтных конденсаторов КСП-0,66-40. Структурно каждая фаза конденсаторной батареи оснащена 11-ю последовательно и 5-ю параллельно соединёнными конденсаторами, фазы батареи соединены в «звезду».

Основные параметры БК №4:

- номинальное напряжение батареи $U_{ном}=12,56$ кВ;
- установленная реактивная мощность $Q_{ном}=6,6$ МВАр;
- количество конденсаторов — 165 шт.

Таблица 1 — Основные электротехнические характеристики ферросплавных печей

Тип печи	Установленная мощность электропечных трансформаторов, кВА	Схема соединения обмоток электропечных трансформаторов	Линейный первичный ток группы электропечных трансформаторов, А	Напряжение на электродах печи, В	Ток в электроде печи, А	Естественный коэффициент мощности
ОКБ-613	3×9000=27000	Δ/ Δ -на электродах	1561	140-80	80000	0,7-0,82

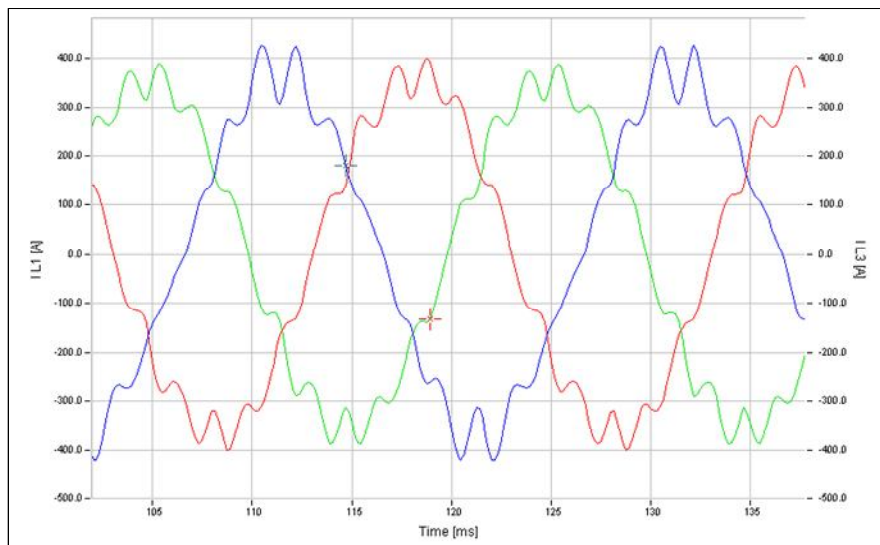
Для исследования режимов работы использовался анализатор качества электроэнергии TOPAS-1000, который подключался к соответствующим вторичным цепям трансформаторов тока и напряжения распределительного устройства 10 кВ ГПП. Методикой исследования предусматривалось измерение токов и напряжений, генерируемой реактивной мощности, а также спектра гармоник токов и напряжений и коэффициентов искажения синусоидальности.

По результатам замеров действующих значений электрических величин при рабочем напряжении $U_p=10,3-10,4$ кВ величина тока БК № 4 составляла 254-260 А, а генерируемая батареей (рабочая) реактивная мощность $Q_p=4,5-4,6$ МВАр. Следует отметить, что рабочая мощность БК в 1,4-1,5 раза меньше номинальной и зависит от величины рабочего напряжения, что поясняется выражением:

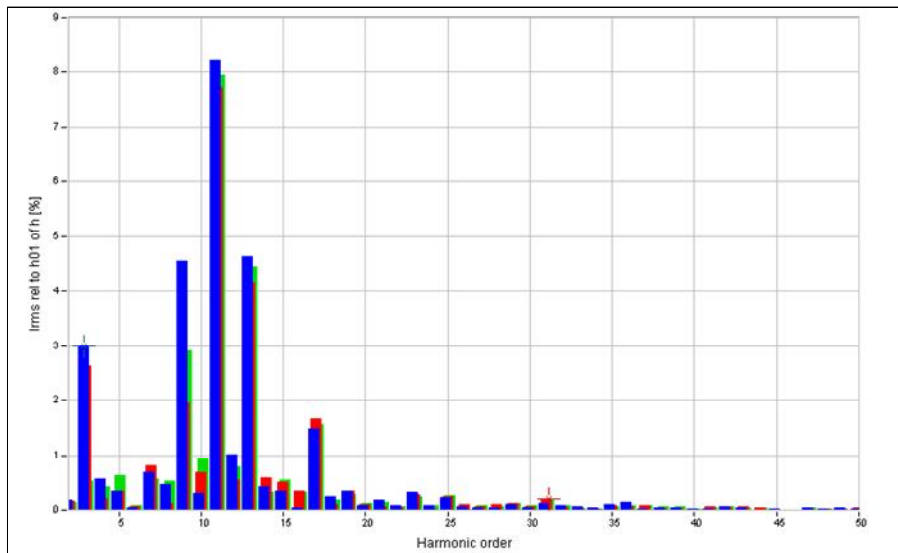
$$Q_p = Q_{ном} \frac{U_p^2}{U_{ном}^2}. \quad (1)$$

Показатели искажения синусоидальности кривых токов и напряжений исследовались на нескольких присоединениях ГПП. Вначале проводилось измерение на присоединении БК№ 4. Форма кривой и спектр гармоник тока БК№4 приведены соответственно рисунку 2.

Как следует из рисунков, ток конденсаторной батареи имеет несинусоидальную форму, при этом измеренный коэффициент искажения синусоидальности тока (THD) составил 9,6-11,5%.



а)



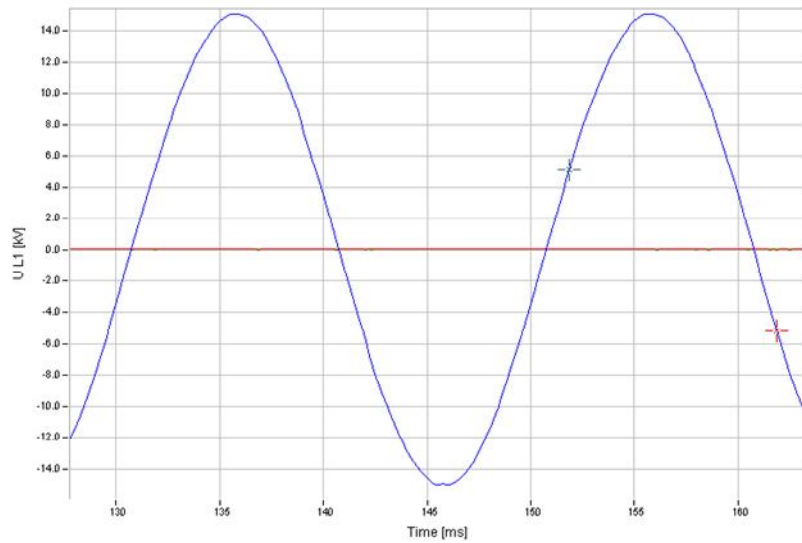
б)

Рисунок 2 — Осциллограмма тока конденсаторной батареи:
а) — форма тока; б) — спектр гармоник

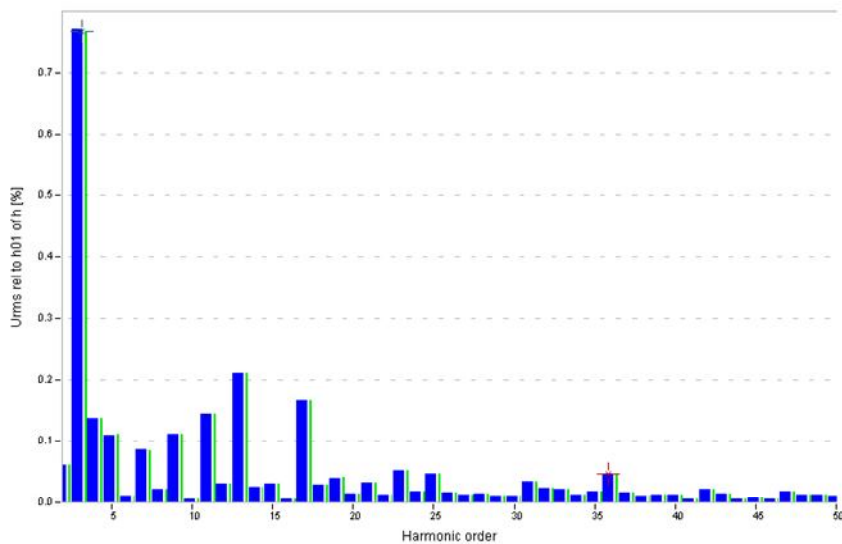
В спектре тока доминируют 3-я гармоника (2,3–3%), 9-я гармоника (2–4,6%), 11-я гармоника (7,8–8,2%), 13-я гармоника (4,2–4,6%) и 17-я гармоника (1,5–1,6%). Значения остальных гармоник не превышает 1%.

На рисунке 3 приведены форма кривой и спектр гармоник напряжения на секции шин № 3 ГПП. Данное напряжение имеет незначительные отличия от синусоидальной формы, при этом коэффициент иска-

жения синусоидальности составлял 0,8–1,05 %, что не превышает допустимых норм, устанавливаемых стандартом [5]. Максимальные значения в спектре напряжения имеет 3-я гармоника (0,77%). Значения остальных гармоник не превышают 0,3%. Для анализа полученных экспериментальных данных на присоединении БК№4 целесообразно использовать схему замещения, приведенную на рисунке 3.



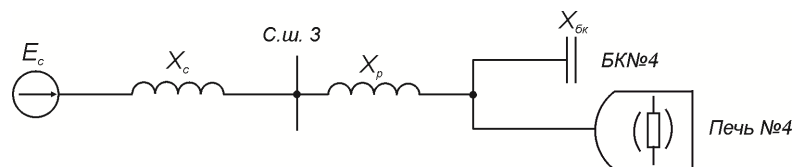
а)



б)

Рисунок 3 — Осциллограмма напряжения на секции шин №3 ГПП:

а) — форма напряжения; б) — спектр гармоник



$E_c=10,5$ кВ, $X_c=0,117$ Ом соответственно ЕДС и эквивалентное индуктивное сопротивление системы внешнего электроснабжения; $X_{ок}=23,9$ Ом — эквивалентное емкостное сопротивление конденсаторной батареи; $X_p=0,23$ Ом — индуктивное сопротивление токоограничивающего реактора РБА-10-2000-8

Рисунок 4 — Схема замещения системы электроснабжения печи № 4

Следует отметить, что доминирование третьей гармоники в спектрах тока и напряжения характерно для систем электропитания ферросплавных печей [1]. Это обстоятельство обусловлено особенностями нелинейностей вольт-амперных характеристик дуг в ферросплавных печах [6]. Присутствие достаточно больших значений 9-й, 11-й, 13-й и 17-й гармоник в спектре тока БК обусловлено, во-первых, наличием их в спектре напряжения системы внешнего электропитания (ГПП) (рис. 3), а во-вторых — настройкой БК совместно с реактором на фильтр 10-й гармоники по отношению к напряжению секции шин № 3, при этом номер резонансной гармоники определялся из выражения [7]:

$$n_p = \sqrt{\frac{X_{бк}}{X_p}}. \quad (2)$$

Таким образом, данное соотношение сопротивлений конденсаторной батареи и реактора способствует усилению гармоник, близких к резонансной (9-й, 11-й) и некоторому уменьшению гармоник боковых частот (3-й, 5-й, 13-й и 17-й и т.д.).

Следует также отметить, что одновременно сама конденсаторная батарея резонирует с сетью в области 8-й гармоники, что также способствует усилению гармоник, близких к 8-й. В этом случае номер резонансной гармоники можно определить по формуле:

$$n_{p1} = \sqrt{\frac{X_{бк}}{X_c + X_p}}. \quad (3)$$

Таким образом, при выборе мощности конденсаторных батарей в системах электропитания ферросплавных печей необходимо руководствоваться не только обес-

печением необходимого коэффициента мощности, но и параметрами несинусоидальности токов и напряжений.

Выводы:

1. В результате проведения экспериментальных исследований показано, что в системе электропитания ферросплавных печей напряжение на питающих секциях шин ГПП содержит в своем спектре высшие гармоники, но имеет незначительные отклонения от синусоидальной формы, при этом коэффициент искажения синусоидальности не превышает допустимых норм, устанавливаемых ГОСТ-13109-97.

2. Показано, что за счет наличия высших гармоник в спектрах токов ферросплавных печей и в спектре питающего напряжения, происходит усиление отдельных гармоник, частота которых близка к резонансной частоте контура, образованного параллельным включением индуктивностей системы и токоограничивающего реактора с емкостью батарей конденсаторов поперечной компенсации реактивной мощности. Данное обстоятельство приводит к перегрузкам батарей конденсаторов токами высших гармоник, при этом коэффициент искажения синусоидальности тока может превышать 10 %, что способствует перегреву конденсаторов и увеличивает их повреждаемость при эксплуатации.

3. Для ослабления резонансных явлений в системах электропитания ферросплавных печей целесообразно смещение резонансных частот контура в область аномальных гармоник путем изменения соотношения между сопротивлениями токоограничивающих реакторов и конденсаторных батарей.

Библиографический список

1. Нехамин С. М. Управление энергетической структурой рабочего пространства дуговых сталеплавильных и руднотермических печей — механизм повышения эффективности их работы [Текст] / С. М. Нехамин // *Электротехнология*. — 2013. — №11. — С. 9-16.
2. Wenpu Zhao. Research on Reactive Power Compensation Mode and Harmonic Wave Control Technique for Submerged Arc Furnace [Текст] / Wenpu Zhao, Shuguang Liu // *International Journal of Automation and Power Engineering (IJAPE)*. — 2013. — V.2, no.4. — pp. 230–233.

3. Вагин Г. Я. Электромагнитная совместимость дуговых печей и систем электроснабжения [Текст] / Г. Я. Вагин, А. А. Севостьянов, С. Н. Юртаев // Труды Нижегородского государственного технического университета им. П. Е. Алексеева. — 2010. — № 2 (81). — С. 202–210.
4. Tsu-Hsun Fu. Load Characteristics Analysis of ac and dc Arc Furnaces Using Various Power Definitions and Statistic Method [Текст] / Tsu-Hsun Fu, Chi-Jui Wu // IEEE transactions on power delivery. — 2002. — V.17. — no. 4. — pp. 1099–1105.
5. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения : ГОСТ 13109-97. — [Введ. 18.06.1999]. — К.: Госстандарт Украины, 1999. — 32 с. — (межгосударственный стандарт).
6. Рубцов В. П. Анализ гармонического состава кривой фазного тока для оценки распределения мощности в тигле рудно-термической печи [Текст] / В. П. Рубцов., В. А. Елизаров // Электротехнология. — 2011. — №3. — С. 11–19.
7. Добрусин Л. А. Фильтрокомпенсирующие устройства для преобразовательной техники [Текст] / Л. А. Добрусин. - М.: НТФ "Энергопрогресс", 2003. — 84 с.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф. ДонГТУ Луциком В. Д.,
к.т.н., проф. СУНИГОТ УИПА Алексеенко С. Ф.**

Статья поступила в редакцию 11.02.14.

к.т.н. Кухарев О. Л. (СНИГОТ УИПА м. Стаханов, Україна)

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ БАТАРЕЙ КОНДЕНСАТОРІВ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ФЕРОСПЛАВНОГО ЗАВОДУ

Наведені результати експериментальних досліджень режимів роботи батарей конденсаторів в системі електропостачання потужного феросплавного заводу. Проведений аналіз причин появи вищих гармонік у спектрах струму й напруги конденсаторних батарей.

Ключові слова: система електропостачання, феросплавна піч, батарея конденсаторів, вищі гармоніки.

Kuharev O. L. Candidate of Engineering Sciences (SSRIMET UEPA Stakhanov, Ukraine, alex.kuharev@mail.ru)

CONDENSATOR BATTERY MODE IN THE SYSTEM OF FERROALLOY PLANT POWER SUPPLY RESEARCH

The results of experimental research of the condensator battery mode in the system of ferroalloy plant power supply are presented. The analysis of the reasons of the highest harmonic existence in current spectrum and condensator battery voltage was conducted.

Key words: power supply, ferroalloy furnace, condensator battery, the highest harmonic.