

**Информация об авторах****Authors**

Бычковский Владимир Сергеевич – аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: bikovskii_vs@mail.ru

Филиппенко Николай Григорьевич - к. т. н., доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: pentagon@mail.ru

Попов Сергей Иванович - к. т. н., доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: popovs@irgups.ru

Каргапольцев Сергей Константинович - д. т. н., профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: kck@irgups.ru

Vladimir Sergeevich Bychkovskii – Ph.D. student of the Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: bikovskii_vs@mail.ru

Nikolay Grigoryevich Filipenko – Ph. D. in Engineering Science, Assoc. Prof., Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: pentagon@mail.ru

Sergey Ivanovich Popov – Ph. D. in Engineering Science, Assoc. Prof. of the Subdepartment of Automation of Industrial Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: popovs@irgups.ru

Sergey Konstantinovich Kargapol'tsev – Doctor of Engineering Science, Prof. of the Subdepartment of Automation of Industrial Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: kck@irgups.ru

Для цитирования

Бычковский В. С. Исследование свойств и обрабатываемости сварных соединений комбинированным ротационным резцом со стружколомом / В. С. Бычковский, Н. Г. Филиппенко, С. И. Попов, С. К. Каргапольцев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2018. - Т. 57, №. 1. - С. 16–23. - DOI: 10.26731/1813-9108.2018.1(57).16-23

For citation

Bychkovskii V. S., Filipenko N. G., Popov S. I., Kargapol'tsev S. K. The study of the properties and machinability of welded joints by a combined rotary cutter with a chip breaker. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*, 2018, Vol. 57, No. 1, pp. 16–23. DOI: 10.26731/1813-9108.2018.1(57).16-23

УДК 669.71:502.3

DOI: 10.26731/1813-9108.2018.1(57).23-30

К. С. Ёлкин¹, М. А. Глушкевич², С. А. Небогин³¹ ООО «Спецстройинвест», г. Иркутск, Российская Федерация² ОАО «СибВАМИ», г. Иркутск, Российская Федерация³ Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

Дата поступления: 24 января 2018 г.

**ПРИМЕНЕНИЕ УСТАНОВОК ПРОДОЛЬНО-ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОЙ МОЩНОСТИ**

Аннотация. Увеличение мощности рудовосстановительных печей сопровождается значительным повышением величин рабочих токов в электродах при сравнительно медленном росте полезных напряжений, что приводит к резкому возрастанию индуктивной составляющей падения напряжения в электрической цепи печной установки, а следовательно, и понижению ее коэффициента мощности, который на сегодняшний день не превосходит величины 0,7. Невозможность снизить реактивное сопротивление печи печного контура приводит к уменьшению естественного коэффициента мощности рудовосстановительных печей по мере увеличения их мощности и вызывает необходимость применения установок продольно-емкостной компенсации. Применение продольной компенсации вызывает повышение напряжения на шинах потребителя, зависящее от тока нагрузки. Появляется падение напряжения в емкости, направленное противоположно падению напряжения в индуктивности. Значение емкостного сопротивления может быть подобрано таким образом, что модуль вектора вторичного напряжения будет равен первичному напряжению или больше его. При применении установок продольной компенсации возможно автоматическое регулирование напряжения во время изменения нагрузки потребителя. В статье описана возможность работы электропечи РКО-33 с коэффициентом мощности 0,92. Для достижения столь высокого мощностного коэффициента печи требуется частичная компенсация её индуктивного сопротивления посредством последовательного включения конденсаторных батарей УПК в фазы электрической цепи. Суммарная расчетная рабочая мощность конденсаторных батарей УПК определяется из баланса реактивной мощности электропечи.

Ключевые слова: производство кремния, электрод, рудовосстановительная электропечь, продольная компенсация реактивной мощности.



K. S. Elkin¹, M. A. Glushkevich², S. A. Nebogin³

¹ OOO Spetsstroinvest, Irkutsk, the Russian Federation

² OAO SibVAMI (Siberian Research and Development Design Institute of the Aluminum and Electrode Industry), Irkutsk, the Russian Federation

³ Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

Received: January 24, 2018

THE APPLICATION OF THE SERIES CAPACITIVE COMPENSATION TO INCREASE THE USEFUL POWER RATIO

Abstract. The increase in the ore-smelting electric furnace is accompanied by a significant increase in the amount of operating currents in the electrodes with a slow growth of useful voltages. It leads to a sharp increase in the inductive voltage drop in the electrical circuit of the furnace and the decrease of its power factor which currently does not exceed 0.7. Since it is impossible to reduce reactance of the furnace circuit, the natural power factor of the ore-smelting electric furnaces drops as their power increases. Consequently, it necessitates using installations with series capacitive compensation. Application of the series capacitive compensation causes an increase in the consumer bus voltage that depends on the load current. Voltage drop occurs in the capacitor, directed in the opposite to the voltage drop in the inductor. The capacitive reactance value can be adjusted so that modulus of the secondary voltage vector is equal to or greater than the primary voltage. When using the installation of series capacitive compensation, one can automatically adjust the voltage on the network during the change of the load of the consumer. The article describes the possibility of operation of the electric furnace RKO-33 with a power factor of 0.92. To achieve such a high power factor of the electric furnace, a partial compensation of its inductive reactance is required by means of a series connection of capacitor banks of the series capacitive compensation into the phases of the electrical circuit. Total estimated operating capacity of the capacitor banks of the series capacitive compensation is determined by the balance of reactive power of the ore-smelting electric furnace.

Keywords: production of silicon, electrode, ore-smelting electric furnace, series compensation of reactive power.

Введение

Рудовосстановительные электропечи являются крупными потребителями реактивной мощности и энергии. На сегодняшний день коэффициенты полезной мощности таких электропечей достигают значения 0,7. Невозможность дальнейшего увеличения коэффициента полезной мощности путем уменьшения реактивного сопротивления электрического контура печи связана, главным образом, с тем, что увеличение числа проводников в фазе короткой сети не приводит к существенно уменьшению реактивного сопротивления печной установки. В то же время значительную часть реактивного сопротивления (40-60 %) составляют сопротивления электрододержателей, электродов и ванны печи. Однако существует другой способ увеличения коэффициента полезной мощности электропечи. Использование установок продольно-емкостной компенсации позволяет уменьшить влияние реактивного сопротивления на полезную мощность установки на 15-25 %.

Расчет электрических характеристик электродов и ванны печи.

Исходные данные:

- электроды самообжигающиеся диаметром 1400 мм;
- диаметр распада электродов 3900 мм;
- длина электродов от середины контактных щек до подины 4,2 м;
- удельное электросопротивление электродов $\rho_{\text{Э}} = 60 \cdot 10^{-4}$ Ом·см;

- длина электродов для расчета потерь энергии 1,3 м.

Индуктивное сопротивление электродов и ванны определялось по методике, приведенной в [1, 2]. Методика основывается на допущении, что пути тока в ванне совпадают с продолжением электродов до подины и далее замыкаются в нулевой точке в центре подины. Результаты расчетов по предложенной методике хорошо согласуются с данными измерений на действующих электропечах.

Индуктивное сопротивление электродов и ванны рассчитывалось по формуле:

$$X_{\text{в}} = 2\pi f L K + X_{\text{н}},$$

где L – значение индуктивности при $d_{\text{р}} / d_{\text{з}} = 2,6$, равное $1,24 \cdot 10^{-6}$ Гн; K – поправочный коэффициент при ином соотношении $d_{\text{р}} / d_{\text{з}}$, а именно при $d_{\text{р}} : d_{\text{з}} = 3900 : 1400 = 2,79$ $K = 1,16$; $X_{\text{н}}$ – индуктивное сопротивление взаимоиндукции токоведущих труб к контактному щекам и электродам, равное 0,081 мОм на фазу:

$$X_{\text{в}} = 2\pi \cdot f \cdot L \cdot K = 2\pi \cdot 50 \cdot 1,24 \cdot 10^{-6} \cdot 1,16 + 0,081 = 0,533 \text{ мОм.}$$

Расчет активного сопротивления электрода и контакта щеки – электрод

Площадь поперечного сечения электрода:

$$S_{\text{Э}} = 0,785 \cdot d_{\text{Э}}^2 = 0,785 \cdot 1400^2 = 15386 \text{ см}^2.$$

Активное сопротивление участка электрода длиной $l = 1,3$ м:

$$R_{\text{пЭ}} = \rho_{\text{Э}} \frac{l}{S_{\text{Э}}} K_{\text{д}} = 60 \cdot 10^4 \frac{130}{15386} = 0,058 \text{ мОм,}$$



где K_d – коэффициент добавочных потерь, равный 1,15.

Активное сопротивление контакта щёки – электрод на фазу определяется по формуле:

$$R_k = 0,25 : n = 0,25 : 10 = 0,025 \text{ мОм},$$

где 0,25 – контактное сопротивление одиночной щетки с электродом; n – количество щек на электрод.

Результаты расчетов индуктивных и активных сопротивлений участков электрической цепи ферросплавной электропечи РКО-33 сведены в табл. 1. Активные сопротивления потерь печи РКО-33 приведены в табл. 2.

Расчетные значения индуктивного и активного сопротивлений электропечи РКО-33 соответствуют данным по рудовосстановительным электропечам близкой мощности со схожей конфигурацией и геометрическими размерами вторичного токопровода и могут применяться при производстве кремния.

Построенная электропечь РКО-33 на Братском заводе ферросплавов имеет отличие сопротивлений от расчетных не более 2 процентов

(практически измеренное сопротивление составило 1,12 мОм).

Но необходимо отметить, что хотя оси камер трансформаторов располагаются вокруг печи под углом 120° , сопротивление фаз различно. У симметричных печей это отличие составляет 2-3 процента, а у печей, трансформаторы которых располагаются в ряд (так же трехфазных трансформаторов), различие сопротивлений может достигать 5-10 процентов. Это вызывает явления «дикий» и «мертвой» фазы.

При соединении выводов низкого напряжения в треугольник на электродах различие сопротивлений приводит к появлению уравнивающих токов, протекающих по обмоткам печного трансформатора, вследствие чего одни трансформаторы перегружаются, другие, наоборот, недогружаются. Все это приводит к ухудшению технико-экономических показателей печи (неравномерное распределение полезной мощности под электродами, увеличенный удельный расход электроэнергии и снижение производительности печи).

Т а б л и ц а 1

Индуктивные сопротивления рудовосстановительной электропечи РКО-33

Расчетный номер участка	Наименование участка	Индуктивное сопротивление фаз, мОм			Среднее значение, X_{cp}	
		X_a	X_b	X_c	мОм	%
1	Трансформаторы электропечные	0,143	0,143	0,143	0,143	13,6
2	Выводы трансформаторов и компенсаторы	0,024	0,024	0,024	0,024	2,3
3	Трубчатый пакет	0,064	0,043	0,043	0,050	4,7
4	Участок расшихтовки	0,041	0,041	0,041	0,041	3,9
5	Гибкие водоохлаждаемые кабели	0,070	0,070	0,070	0,070	6,6
6	Токоведущие трубы к контактными щекам	0,193	0,193	0,193	0,193	18,3
7	Электроды и ванна электропечи	0,533	0,533	0,533	0,533	50,6
	Итого	1,068	1,047	1,047	1,054	100,0

Для расчётов принимается индуктивное сопротивление – 1,1 мОм.

Т а б л и ц а 2

Активные сопротивления потерь печи РКО-33

Расчетный номер участка	Наименование участка	Активное сопротивление фаз, мОм			Среднее значение, R_{cp}	
		R_a	R_b	R_c	мОм	%
1	Трансформаторы электропечные	0,021	0,021	0,021	0,021	17,8
2	Выводы трансформаторов и компенсаторы	0,001	0,001	0,001	0,001	0,9
3	Трубчатый пакет	0,0066	0,0044	0,0044	0,0051	4,4
4	Участок расшихтовки	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,9
5	Гибкие водоохлаждаемые кабели	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030	2,6
6	Токоведущие трубы к контактными щекам	0,0035	0,0035	0,0035	0,0035	3,0
7	Электроды	0,058	0,058	0,058	0,058	49,2
	Контакты щетки - электроды	0,025	0,025	0,025	0,025	21,2
	Итого	0,119	0,117	1,117	0,118	100,0



Однако следует иметь ввиду, что на печах, оборудованных устройствами продольной компенсации, применив специальные схемные решения соединения конденсаторов, можно обеспечить полное или частичное выравнивание мощностей под электродами (устранив тем самым явления «дикой» и «мертвой» фазы и наличие уравнильных токов, приводящих к увеличению удельного расхода электроэнергии) [3, 4].

Основные решения по компенсации реактивной мощности рудовосстановительных печей

Рудовосстановительные электропечи являются крупными потребителями реактивной мощности и энергии.

Технология процесса на этих печах обеспечивает стабильность потребления реактивной мощности и отсутствие резких бросков ее величины. Изменение электрического режима на этих печах может иметь место только периодически, в связи с изменением качества шихтовых материалов, отказом работы некоторых узлов или в связи с необходимостью диспетчерского регулирования мощности.

В соответствии с требованиями технологии увеличение мощности рудовосстановительных печей сопровождается значительным повышением величин рабочих токов в электродах при сравнительно медленном росте полезных напряжений. В этом случае имеет место резкое возрастание индуктивной составляющей падения напряжения в электрической цепи печной установки, а следовательно, и понижение ее коэффициента мощности [5, 6].

Мощность создаваемых в настоящее время печей достигла уже такого предела, что величина индуктивного падения напряжения становится недопустимо большой, а их естественный коэффициент мощности не превосходит величины 0,6 - 0,7 (на печах РКО-25 коэффициент мощности равен 0,76).

Применение наилучших схем и конструкций коротких сетей не позволит получить значения реактивных сопротивлений менее предельных величин. Это объясняется тем, что увеличение числа проводников в фазе короткой сети сверх определенного значения не приводит к существенному уменьшению реактивного сопротивления печной установки. В то же время значительную часть реактивного сопротивления (40 - 60 %) составляют сопротивления электрододержателей, электродов и ванны печи, которые без нарушения ведения технологического процесса изменить нельзя.

Невозможность снизить реактивное сопротивление печи печного контура приводит к

уменьшению естественного коэффициента мощности рудовосстановительных печей по мере увеличения их мощности и вызывает необходимость применения установок продольно-емкостной компенсации. Данные установки обеспечивают автоматическую компенсацию реактивного падения напряжения.

Способ компенсации, при котором емкостное сопротивление конденсаторной батареи включается последовательно с сопротивлением нагрузки, носит название продольной компенсации.

Продольная компенсация может так же как и поперечная компенсация, использоваться для повышения коэффициента мощности крупных энергопотребителей. Особенностью применения продольной компенсации является то, что она вызывает повышение напряжения на шинах потребителя, которое зависит от тока нагрузки. Это объясняется тем, что в линии появляется падение напряжения в емкости, направленное противоположно падению напряжения в индуктивности. Значение емкостного сопротивления может быть подобрано таким образом, что модуль вектора вторичного напряжения будет равен первичному напряжению или больше его. Отсюда вытекает второе направление применения продольной компенсации как средства регулирования напряжения. При этом основное достоинство продольной компенсации состоит в автоматическом регулировании напряжения при изменении нагрузки потребителя.

Конденсаторные батареи продольной компенсации включены в цепь обмотки вольтодобавочного трансформатора (рис. 1).

Достаточная для инженерных расчетов точность схемы продольной компенсации, в которой приведенное значение емкостного сопротивления X_c будет включено последовательно с электрическим контуром электропечной установки (рис. 2).

Приведенное емкостное сопротивление X_c не зависит от коэффициента трансформации электропечного трансформатора и от величины тока и остается постоянным во всех режимах работы печи.

Включение в цепь печной установки УПК требует специального подхода к вопросу выбора величины рабочих токов и напряжений трансформаторов рудовосстановительных печей. При этом оказывается необходимым, зная заданную производительность печи и оптимальное для данного узла энергосистемы значение коэффициента мощности, найти параметры печного трансформатора и конденсаторной батареи УПК.

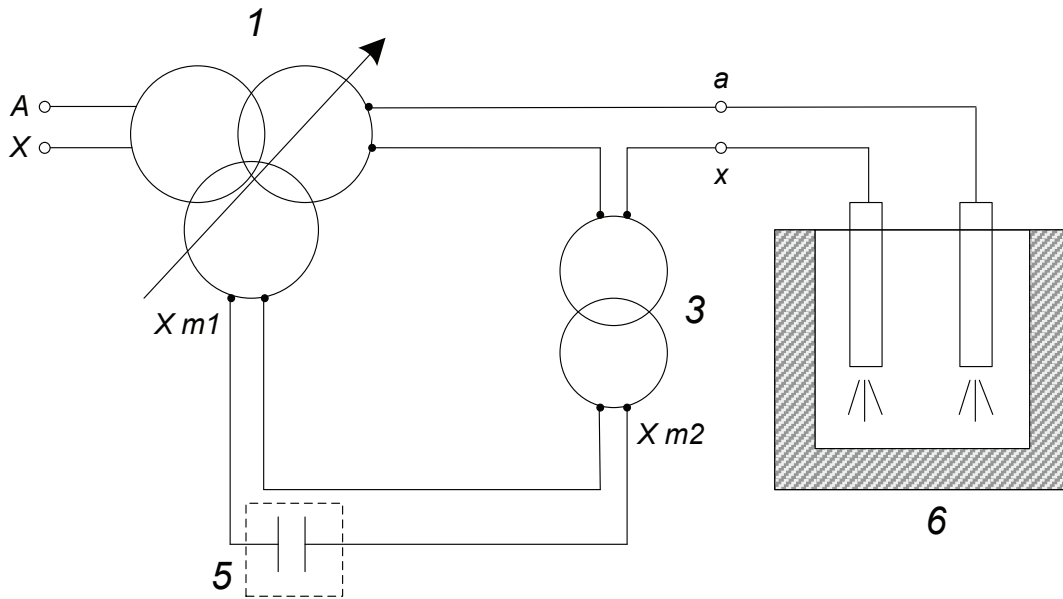


Рис. 1. Схема включения УПК:

1 – печной трансформатор; 3 – вольтодобавочный трансформатор; 5 – конденсаторная батарея; 6 – печь

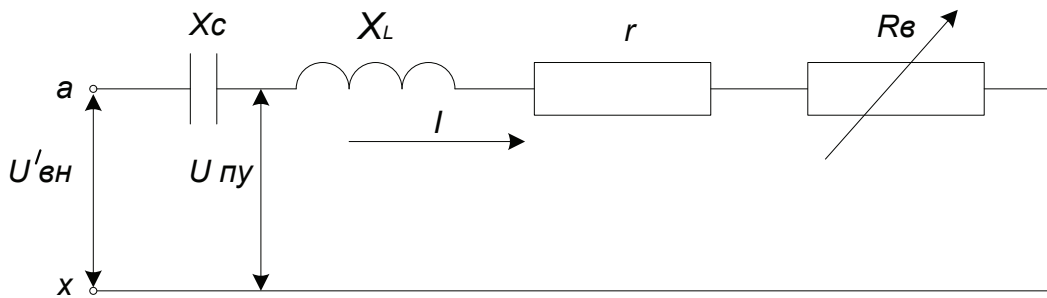


Рис. 2. Схема включения продольной компенсации

Основные решения по продольной компенсации реактивной мощности

Назначение УПК – компенсация реактивной мощности электропечей с обеспечением коэффициента мощности в расчетном рабочем режиме на уровне 0,92, увеличение полезной мощности и производительности электропечей.

Известны несколько различных схем включения конденсаторных батарей продольной компенсации в электрическую цепь электропечей [7-11].

В отечественной практике повсеместное распространение получила схема включения конденсаторных батарей в трансформаторные цепи электропечных трансформаторов – в цепи обмоток высшего напряжения вольтодобавочных трансформаторов. Схема имеет ряд технических преимуществ. Накоплен значительный опыт эксплуатации УПК, выполненных по такой схеме включения. С учетом изложенного, для УПК рудотермических электропечей принята схема (рис. 3).

Для выбранной схемы включения конденсаторных батарей УПК предъявляются особые требования к электропечным трансформаторам в части согласования параметров УПК и трансформаторов [3, 12-15]. В связи с этим разработку электропечных трансформаторов для электропечи необходимо проводить совместно с УПК, прорабатывая несколько вариантов исполнения электропечного трансформатора, различающихся, главным образом, коэффициентом трансформации вольтодобавочного трансформатора. Электрические параметры принятого к производству и эксплуатации трансформатора приведены в табл. 4. Трансформатору присвоен тип ЭОЦНКРМ-24000/10.

Расчетные значения рабочих электрических параметров электропечи РКО-33, предназначенной для выплавки кремния и ферросилиция, приведены в табл. 3.

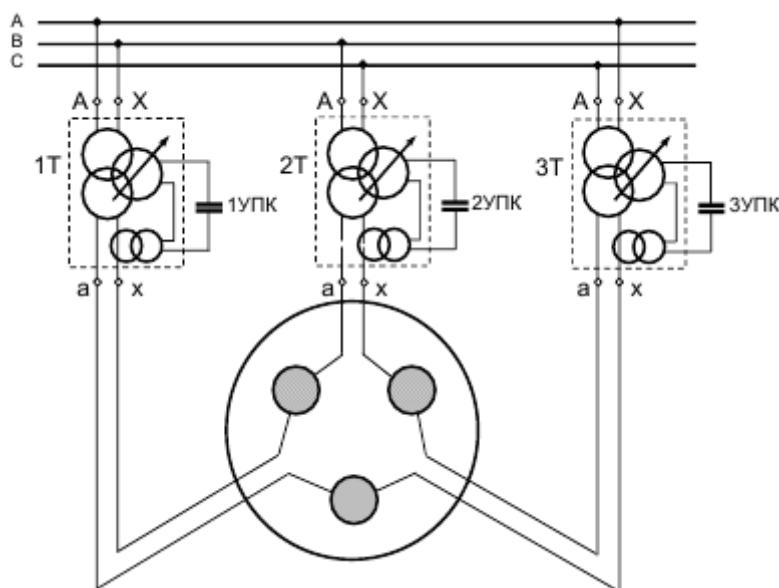


Рис. 3. Схема включения конденсаторных батарей продольной компенсации электропечей

Таблица 3

Электрические параметры электрической печи РКО-33

Коэффициент с, В/Вт ^{0,33}	Полная мощность электропечи, кВА 33000	Ток в электродах, кА	Вторичное напряжение холостого хода трансформатора, В
0,47		96,45	197,5
0,48		94,74	201,1
0,49		93,09	204,7
0,50		91,49	208,2
0,51		89,94	211,8
0,52		88,44	215,4

Таблица 4

Параметры ступеней напряжения трансформаторов ЭОЦНКРМ-24000/10 в диапазоне рабочих режимов

Номер ступени напряжения	Ток в электродах, А	Вторичное напряжение, В	Ток регулировочной обмотки, А
9	88964	214,2	650
15	97678	195,0	714

УПК рассчитывается для работы в комплексе с тремя однофазными электропечными трансформаторными агрегатами типа ЭОЦНКРМ-24000/10 с первичным напряжением 10 кВ. Установка включается в цепи «регулировочная обмотка главного трансформатора – вольтодобавочный трансформатор» [3, 16-21]. Класс напряжения промежуточной трансформаторной цепи ЭОЦНКРМ-24000/10 и оборудования УПК – 10 кВ.

Для обеспечения работы электропечи РКО-33 с коэффициентом мощности 0,92 требуется частичная компенсация её индуктивного сопротивления посредством последовательного включения конденсаторных батарей УПК в фазы электрической цепи.

Суммарная расчетная рабочая мощность конденсаторных батарей УПК определяется из баланса реактивной мощности электропечи по формуле:

$$Q_B = 3I_{\text{р}}^2 X_{\text{п}} - S \cdot \sin \varphi,$$

где $I_{\text{р}}$ – расчетное значение рабочего тока в электродах; $X_{\text{п}}$ – естественное индуктивное сопротивление электропечи.

В расчетах УПК значение рабочего тока в электродах электропечи РКО-33 принимается равным 97,0 кА – наибольшее по данным табл. 3.

Суммарная рабочая мощность конденсаторных батарей:

$$Q_B = 3 \cdot (97 \cdot 10^3)^2 \cdot 1,10 \cdot 10^{-3} - 33 \cdot 10^6 \cdot 0,392 = 18113,7 \text{ кВА}.$$

Заключение

В данной статье была рассчитана возможность использования установок продольной компенсации, включенных в цепи обмоток высшего напряжения вольтодобавочных трансформаторов рудовосстановительных печей. Для обеспечения работы электропечи РКО-33 с коэффициентом мощности 0,92 требуется частичная компенсация



её индуктивного сопротивления посредством последовательного включения конденсаторных батарей УПК в фазы электрической цепи. Расчёты показывают целесообразность использования данной схемы включения УПК для достижения высоких значений полезной мощности рудовосстановительных печей.

Статья подготовлена с использованием результатов работ, выполненных в ходе проекта 02.G25.31.0174 «Разработка комплексной ресур-

собоерегающей технологии и организация высокотехнологического производства наноструктур на основе углерода и диоксида кремния для улучшения свойств строительных и конструкционных материалов» в рамках Программы реализации комплексных проектов по созданию высокотехнологического производства, утвержденной постановлением Правительства РФ № 218 от 9 апреля 2010 г.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей. Л. : Энергоатомиздат. 1986.
2. Кондратьев В.В., Николаев В.Н. Технологические решения по энергосбережению и снижению капиталоемкости систем газоудаления и газоочистки металлургических производств // *Металлург.* No. 5. 2014. С. 96.
3. Балакирев С. В., Ёлкин К. С. Опыт совершенствования технологических режимов печей РКО-25 // *Перспективы развития производства кремния : сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. Шелехов, 2008.* С. 20–21.
4. Шахрай С.Г., Кондратьев В.В., Белянин А.В. Энерго- и ресурсосбережение в производстве алюминия. Иркутск : Издательство ИрГТУ. 2014. 146 с.
5. Берковский А. М., Лысков Ю. И. Мощные конденсаторные батареи. М. : Энергия. 1967.
6. Изучение тепловых и электрических характеристик руднотермических печей для производства кремния / К.С. Ёлкин и др. // *Совершенствование технологии и оборудования в производстве кремния и кремнистых ферросплавов : сб. науч. тр. Красноярск. 2013.* С. 62–69.
7. Данцис Я. Б., Жилов Г. М. Искусственная компенсация реактивной мощности электропечных агрегатов. Л. : Энергия. 1971.
8. Данцис Я. Б., Жилов Г. М. Ёмкостная компенсация реактивных нагрузок мощных токоприемников промышленных предприятий. Л. : Энергия. 1980.
9. Тобис И. И., Рабинович В. Л. Применение установок продольноёмкостной компенсации реактивной мощности в схемах электропитания ферросплавных печей. // *Энергетика черной металлургии : тр. Центроэнергочермета. М., 1970.*
10. Красновская И. Г., Рабинович В. Л. Особенности применения устройств продольной компенсации для электропечных установок // *Труды МЭИ. 1975.* Вып. 218.
11. Правила устройства электроустановок / Минэнерго СССР. М. Энергосервис, 2002.
12. Аппараты для подготовки газов к очистке / Ю.С. Егоров и др. // *Транспортная инфраструктура Сибирского региона : VI Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2015.* С. 232–235.
13. Нарушения технологического режима плавки кремния и их последствия / А.И. Карлина и др. // *Транспортная инфраструктура Сибирского региона : VI Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2015.* С. 236–243.
14. Новые технологические решения по переработке отходов кремниевого и алюминиевого производств / В.В. Кондратьев и др. // *Металлург.* No. 5. 2013. С. 92–95.
15. Экспериментальное изучение зависимости температуры плавления кремнезема от удельной поверхности кристаллической фазы SiO₂ / К.С. Ёлкин и др. // *Наука, техника, инновации. : сб. ст. II Междунар. науч.-техн. конф. Брянск, 2015.* С. 263–269.
16. Перспективы применения нанотехнологий и наноматериалов в горно-металлургической промышленности / В.В. Кондратьев и др. // *Вестник Иркутского государственного технического университета. 2010.* No. 1. С. 168–174.
17. Исследование электрических характеристик руднотермических электрических печей // *Перспективы развития производства кремния : сб. науч. ст. Шелехов, 2011.* С. 33–35.
18. Углеродные нанотрубки в производстве металлического кремния / К.С. Ёлкин и др. // *Цветные металлы и минералы-2015. Красноярск, 2015.* С. 224–225.
19. Электрическая очистка газов производства кремния / К.С. Ёлкин и др. // *Транспортная инфраструктура Сибирского региона VI Междунар. науч.-практ. конф. 2015.* С. 226–231.
20. Ёлкин К. С. Совершенствование восстановительной плавки кремния // *Научно-технический прогресс и повышение качества при производстве кремния : тезисы докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. Иркутск. 1991.* С. 2–3.
21. Производство кремния. Справочник металлурга / К. С. Ёлкин и др. СПб. : Изд-во МАНЭБ. 2013. 364 с.

REFERENCES

1. Kalantarov P. L., Tseitlin L. A. Raschet induktivnosti [Calculation of inductances]. Leningrad : Energoatomizdat Publ, 1986.
2. Kondrat'ev V.V., Nikolaev V.N. Tekhnologicheskie resheniya po energosberezheniyu i snizheniyu kapitaloemkosti sistem gazoudaleniya i gazoostistki metallurgicheskikh proizvodstv [Technological solutions for energy saving and reducing the capital intensity of gas removal and gas cleaning systems of metallurgical industries]. *Metallurg [Metallurgist]*, No. 5, 2014, p. 96.
3. Balakirev S. V., Elkin K. S. Opyt sovershenstvovaniya tekhnologicheskikh rezhimov pechei RKO-25 [Experience of improving the technological regimes of the furnaces RKO-25]. *Perspektivy razvitiya proizvodstva kremniya : sb. dokl. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. [Prospects for the development of silicon production: the collection of reports of the Intern. scientific-techn. conf.]*. Shelekhov, 2008, p. 20–21.
4. Shakhrai S.G., Kondrat'ev V.V., Belyanin A.V. Energo- i resursosberezhenie v proizvodstve alyuminiya [Energy and resource saving in aluminum production]. Irkutsk : IrGTU Publ., 2014, 146 p.
5. Berkovskii A. M., Lyskov Yu. I. Moshchnye kondensatornyye batarei [Powerful capacitor batteries]. Moscow : Energiya Publ., 1967.



6. Elkin K.S. et al. Izuchenie teplovykh i elektricheskikh kharakteristik rudnotermicheskikh pechei dlya proizvodstva kremniya [Study of thermal and electrical characteristics of ore-thermal furnaces for silicon production]. *Sovershenstvovanie tekhnologii i oborudovaniya v proizvodstve kremniya i kremnistykh ferrosplavov : sb. nauch. tr. [Perfection of technology and equipment in the production of silicon and siliceous ferroalloys: a collection of scientific papers]*, Krasnoyarsk, 2013, pp. 62–69.
7. Dantsis Ya. B., Zhilov G. M. Iskusstvennaya kompensatsiya reaktivnoi moshchnosti elektropechnykh agregatov [Artificial compensation of reactive power of electric furnace units]. Leningrad : Energiya Publ., 1971.
8. Dantsis Ya. B., Zhilov G. M. Emkostnaya kompensatsiya reaktivnykh nagruzok moshchnykh tokopriemnikov promyshlennykh predpriyatii [Capacitive compensation of reactive loads of powerful current collectors of industrial enterprises]. Leningrad : Energiya Publ., 1980.
9. Tobis I. I., Rabinovich V. L. Primenenie ustanovok prodol'noemkostnoi kompensatsii reaktivnoi moshchnosti v skhemakh elektropitaniya ferrosplavnykh pechei [Application of series-capacitive compensation of reactive power in power circuits of ferroalloy furnaces]. *Energetika chernoi metallurgii : tr. Tsentroenergochermeta [Energetics of Ferrous Metallurgy. Proceedings of the Tsentroenergochermet]*. Moscow, 1970.
10. Krasnovskaya I. G., Rabinovich V. L. Osobennosti primeneniya ustroystv prodol'noi kompensatsii dlya elektropechnykh ustanovok [Features of the use of longitudinal compensation devices for electric furnace installations]. *Trudy MEI [Proceedings of the Moscow Power Engineering Institute]*, 1975, Issue 218.
11. Pravila ustroystva elektroustanovok. Minenergo SSSR [Rules for the installation of electrical installations. Ministry of Energy of the USSR]. Moscow: Energoservis Publ., 2002.
12. Egorov Yu.S. et al. Apparaty dlya podgotovki gazov k oчитке [Apparatus for preparation of gases for purification]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona : VI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Transport Infrastructure of the Siberian Region: VIth Intern. scientific-practical conf.]*. Irkutsk, 2015, pp. 232–235.
13. Karlina A.I. et al. Narusheniya tekhnologicheskogo rezhima plavki kremniya i ikh posledstviya [Violations of the technological regime of silicon smelting and their consequences]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona : VI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Transport infrastructure of the Siberian region: VIth Intern. scientific-practical conf.]*. Irkutsk, 2015, pp. 236–243.
14. Kondrat'ev V.V. et al. Novye tekhnologicheskie resheniya po pererabotke otkhodov kremnievogo i alyuminievogo proizvodstva [New technological solutions for waste processing of silicon and aluminum industries]. *Metallurg [Metallurgist]*, No. 5, 2013, pp. 92–95.
15. Elkin K.S. et al. Eksperimental'noe izuchenie zavisimosti temperatury plavleniya kremnezema ot udel'noi poverkhnosti kristallicheskoi fazy SiO₂ [Experimental study of the dependence of the melting point of silica on the specific surface of the crystalline phase of SiO₂]. *Nauka, tekhnika, innovatsii. : sb. st. IInd Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf [Science, Technology, Innovation. : Coll. of articles of IInd Intern. scientific-techn. conf.]*. Bryansk, 2015, pp. 263–269.
16. Kondrat'ev V.V. et al. Perspektivy primeneniya nanotekhnologii i nanomaterialov v gorno-metallurgicheskoi promyshlennosti [Prospects for the use of nanotechnologies and nanomaterials in the mining and metallurgical industry]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, 2010, No. 1, pp. 168–174.
17. Issledovanie elektricheskikh kharakteristik rudnotermicheskikh elektricheskikh pechei [Investigation of the electrical characteristics of ore-thermal electric furnaces]. *Perspektivy razvitiya proizvodstva kremniya : sb. nauch. st. [Prospects for the development of silicon production: a collection of scientific articles]*. Shelekhov, 2011, pp. 33–35.
18. Elkin K.S. et al. Uglerodnye nanotrubki v proizvodstve metallicheseskogo kremniya [Carbon nanotubes in the production of metallic silicon]. *Tsvetnye metally i mineraly-2015 [Non-ferrous metals and minerals-2015]*. Krasnoyarsk, 2015, p. 224–225.
19. Elkin K.S. et al. Elektricheskaya oчитка gazov proizvodstva kremniya [Electrical cleaning of silicon production gases]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona VI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Transport Infrastructure of the Siberian Region, VIth Intern. scientific-practical conf.]*, 2015, pp. 226–231.
20. Elkin K. S. Sovershenstvovanie vosstanovitel'noi plavki kremniya [Improvement of Silicon Reductive Melting]. *Nauchno-tekhnicheskii progress i povyshenie kachestva pri proizvodstve kremniya : tezisy dokl. Vsesoyuz. nauch.-tekhn. konf.[Scientific and Technical Progress and Improvement in the Production of Silicon: Abstracts of reports of All-Union scientific-techn. conf.]*. Irkutsk, 1991, pp. 2–3.
21. Elkin K. S. et al. Proizvodstvo kremniya. Spravochnik metallurga [Production of silicon. Reference book for metallurgists]. St. Petersburg : MANEB Publ., 2013, 364 p.

Информация об авторах

Ёлкин Константин Сергеевич – д. т. н., профессор, генеральный директор ООО «Спецстройинвест», г. Иркутск, e-mail: spstinv@gmail.com

Глушкевич Михаил Анатольевич – к. т. н., главный инженер проекта, ОАО СибВАМИ, г. Иркутск, e-mail: mikhaileglushkevich@rusal.com

Небогин Сергей Андреевич – аспирант физико-технического института, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: s.a.nebo@yandex.ru

Для цитирования

Ёлкин К. С. Применение установок продольно-емкостной компенсации для повышения коэффициента полезной мощности / К. С. Ёлкин, М. А. Глушкевич, С. А. Небогин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2018. - Т. 57, № 1. - С. 23–30. - DOI: 10.26731/1813-9108.2018.1(57).23-30

Authors

Elkin Konstantin Sergeevich – Doctor of Engineering Science, Prof., Director General of ООО "Spetsstroinvest", Irkutsk, e-mail: spstinv@gmail.com

Glushkevich Mikhail Anatol'evich – Ph.D. in Engineering Science, Chief Project Engineer, ОАО "Siberian Military District", Irkutsk, e-mail: mikhaileglushkevich@rusal.com

Nebogin Sergei Andreevich – Ph.D. student, Physics and Engineering Institute, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: s.a.nebo@yandex.ru

For citation

Elkin K.S., Glushkevich M.A., Nebogin S.A. The application of the series capacitive compensation to increase the useful power ratio. *Modern technologies. System Analysis. Modeling*, 2018, Vol. 57, No. 1, pp. 23-30. DOI: 10.26731 / 1813-9108.2018.1 (57).23-30