



*Analysis and complex of measures, carried out in ESPTs-1 with the purpose of improvement of the main technical and economic indexes of blast steel furnace operation is given.*

Н. В. АНДРИАНОВ, В. А. МАТОЧКИН, В. И. ДЬЯЧЕНКО, В. В. ПИВЦАЕВ,  
М. В. ГИНЕЙКО, РУП «БМЗ»

УДК 669

## АНАЛИЗ И КОМПЛЕКС МЕРОПРИЯТИЙ, ПРОВЕДЕННЫХ В ЭСПЦ-1, С ЦЕЛЬЮ УЛУЧШЕНИЯ ОСНОВНЫХ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ДСП-2

Особенностью энергетического баланса электро-сталеплавильной печи является сопоставление количеств энергии разного вида, различающихся степенью использования энергии в пределах рабочего пространства печи. Техническая характеристика любой электропечной установки (ДСП) содержит как минимум два основных параметра: номинальную мощность источника полную ( $S_{\text{НОМ}}$ ) или активную ( $P_{\text{НОМ}}$ ) и вместимость печи в виде количества металла, выплавляемого за одну плавку ( $m_0$ ).

Основные параметры в совокупности определяют все технические, производственные и экономические показатели работы ДСП. Технический уровень ДСП оценивают в первую очередь значениями производительности и удельного расхода электроэнергии. Если часовая производительность характеризует скорость технологического процесса, то годовая производительность является важнейшим экономическим показателем работы ДСП, определяющим уровень условно постоянных расходов в себестоимости продукции и удельных капитальных затрат в ЭСПЦ.

В общем случае цикличность работы ДСП ( $\tau_{\text{пл}}$ ) состоит из трех периодов: подготовительного ( $\tau_{\text{п}}$ ); энергетического ( $\tau_3$ ) и технологического ( $\tau_{\text{т}}$ ).

Производительность ДСП периодического действия (в нашем случае) равна вместимости печи ( $m_0$ ), умноженной на число ( $N$ ) циклов (плавки) в течение фактического времени работы ( $T_p$ ) [1]:

$$M = m_0 N = m_0 T_p / \tau_{\text{пл}} = m_0 T_p / (\tau_{\text{п}} + \tau_3 + \tau_{\text{т}}) = T_p / (\tau_{\text{п}} / m_0 + \tau_3 / m_0 + \tau_{\text{т}} / m_0). \quad (1)$$

Поскольку производительность, согласно (1), обратно пропорциональна сумме длительности трех периодов, повышение производительности ДСП

в равной мере может быть достигнуто сокращением любого из них, т. е. за счет организационных мероприятий по обслуживанию печи, увеличения мощности ДСП или совершенствования технологического процесса плавки.

Так, на Белорусском металлургическом заводе в 2003 г. начал реализовываться комплекс мероприятий по улучшению технико-экономических показателей сталеплавильного производства. Объектом модернизации стала дуговая сталеплавильная печь № 2.

**Краткая характеристика объекта до модернизации.** Дуговая сталеплавильная печь с поворотным сводом емкостью 100 т с водоохлаждаемыми стеновыми панелями и сводом. Номинальная мощность печного трансформатора 75 МВт, 33 кВ, 50 Гц, 340-825ВНН. Три стеновые газокислородные горелки установленной мощностью 10,5 МВт.

Как отмечалось ранее, увеличение номинальной мощности печного трансформатора является одним из путей улучшения технико-экономических показателей работы ДСП. Помимо роста производительности и сокращения токового времени плавки, повышение энергонасыщенности печи путем увеличения вводимой активной мощности позволяет снизить удельный расход электроэнергии.

Полезная мощность (мощность дуг), вводимая в ДСП, рассчитывается по формуле [2]:

$$P_d = SK_n \mu_3 \lambda, \quad (2)$$

где  $S$  – номинальная мощность печного трансформатора, МВА;  $K_n$  – средний коэффициент использования мощности в энергетический период плавки;  $\mu_3 = P_d / P_a$  – электрический КПД установки, учитывающий потери мощности во вторичном то-

копроводе;  $\lambda = P_d/S$  – коэффициент мощности ( $\cos \varphi$ ), характеризующий отношение активной мощности цепи низкого напряжения к номинальной мощности трансформатора.

В первом приближении можно принять  $K_n = 0,9$ ,  $\mu_{\Sigma} = 0,97$  и  $\lambda = 0,85$ . Тогда максимальный прирост полезной мощности при замене трансформатора составит

$$\Delta P_d = \Delta S K_n \mu_{\Sigma} \lambda = (95-75) \cdot 0,9 \cdot 0,97 \cdot 0,85 \approx 15 \text{ МВт.}$$

Теоретически ввод 1 МВт дополнительной активной мощности приводит к снижению энергопотребления на 2,2 кВт·ч/т [3]. Тогда максимальное снижение энергопотребления составит

$$\Delta W = 15 \cdot 2,2 = 33 \text{ кВт·ч/т.}$$

Время энергетического периода плавки определяется [4] из частного баланса энергии по формуле:

$$\tau_{\Sigma} = (W_{\text{пол}})/(SK_n \mu_{\Sigma} \lambda - P_{2т.п}), \quad (3)$$

где  $W_{\text{пол}} = W_{2у.т} m_{\text{ш}}$  – полезная энергия, МВт·ч;  $W_{2у.т}$  – теоретическое удельное значение полезной энергии, МВт·ч/т;  $m_{\text{ш}}$  – масса металлошихты, т;  $P_{2т.п} = k \cdot 0,14 m_0^{0,67}$  – мощность тепловых потерь ДСП за энергетический период [4], МВт;  $k_2$  – коэффициент, учитывающий возможное изменение мощности тепловых потерь, для ДСП-100  $k_2 = 5$ ;  $m_0$  – номинальная вместимость печи, т. Согласно данным [4],  $W_{2у.т} = 0,26 \text{ МВт} \cdot \text{ч/т}$ ; для ДСП-2  $m_{\text{ш}} = 120 \text{ т}$ ,  $m_0 = 100 \text{ т}$ . Находим величину полезной энергии:

$$W_{\text{пол}} = W_{2у.т} m_{\text{ш}} = 0,26 \cdot 120 = 31,2 \text{ МВт} \cdot \text{ч.}$$

Рассчитаем мощность тепловых потерь:

$$P_{2т.п} = k_2 \cdot 0,14 m_0^{0,67} = 5 \cdot 0,14 \cdot 100^{0,67} = 15,3 \text{ МВт.}$$

Используя формулы (2) и (3), сокращение времени плавки можно определить как разность между временем энергетического периода плавки на ДСП с трансформатором номинальной мощностью 75 МВА и временем энергетического периода плавки на ДСП с трансформатором номинальной мощностью 95 МВА:

$$\Delta \tau_{\Sigma} = W_{\text{пол}}/(P_d - P_{2т.п}) - W_{\text{пол}}/(P'_d - P_{2т.п}),$$

где  $P_d$  и  $P'_d$  – мощность дуг соответственно до и после замены трансформатора, МВт.

Для ДСП-2 путем снятия характеристик печного трансформатора и построения круговых диаграмм получены следующие значения коэффициентов использования мощности, коэффициента мощности и коэффициента электропотерь:

Трансформатор 75 МВА	Трансформатор 95 МВА
$K_n = 1,$	$K_n = 0,9,$
$\mu_{\Sigma} = 0,97,$	$\mu_{\Sigma} = 0,97,$
$\lambda = 0,84.$	$\lambda = 0,82.$

Мощность дуг, рассчитанная по формуле (1), составляет

$$P_d = SK_n \mu_{\Sigma} \lambda = 75 \cdot 1 \cdot 0,97 \cdot 0,84 \approx 61,11 \text{ МВт,}$$

$$P'_d = S' K_n \mu_{\Sigma} \lambda = 95 \cdot 0,9 \cdot 0,97 \cdot 0,82 \approx 68,01 \text{ МВт.}$$

Откуда сокращение времени плавки:

$$\Delta \tau_{\Sigma} = W_{\text{пол}}/(P_d - P_{2т.п}) - W_{\text{пол}}/(P'_d - P_{2т.п}) = 31,2 / (61,11 - 15,3) - 31,2 / (68,01 - 15,3) = 0,098 \text{ ч, или } 5,9 \text{ мин.}$$

### 1. Установка печного трансформатора мощностью 95 МВА

В ходе проведения капитального ремонта ДСП-2 в ЭСПЦ-1 в 2003 г. были произведены монтаж и подключение нового печного трансформатора фирмы TAMINI номинальной мощностью 95 МВА.

При увеличении вводимой мощности путем перехода на повышенные ступени напряжения (22–24, «высокоимпедансный» режим) в 2004 г. отмечено увеличение количества случаев выхода из строя водоохлаждаемых панелей по причине возросшей тепловой нагрузки. Для снижения тепловой нагрузки на водоохлаждаемые элементы был разработан энерготехнологический режим, предусматривающий работу на 22 ПСН только в режиме закрытых дуг.

Для анализа основных технико-экономических показателей работы ДСП после замены печного трансформатора использованы данные по 2679 плавкам, проведенным в ДСП-2 в период с 01.11.03 г. по 30.04.04 г.

Основные технико-экономические показатели работы ДСП-2 до и после реконструкции приведены в табл. 1.

Из таблицы следует, что токовое время плавки сократилось на 6,73 мин, или 13% и составило 44,97 мин; общее время плавки сократилось на 9 мин, или 13% и составило 69 мин; производительность составила 92,6 т/ч. (прирост 10,26 т/ч, или 12,5%); расход электроэнергии уменьшился на 23,3 кВт·ч/т, или 4,9% и составил 455,122 кВт·ч/т; расход электродов диаметром 610 мм уменьшился на 0,515 кг/т, или 16,8% и составил 2,55 кг/т.

Однако в контрольном периоде отмечено увеличение случаев выхода из строя водоохлаждаемых элементов корпуса ДСП-2 вследствие прогара; отмечено снижение стойкости футеровки свода в декабре и марте 2004 г.; рост горячих простоев по причине увеличения облученности составил 120%.

Таблица 1. Основные технико-экономические показатели работы ДСП-2

Технико-экономические параметры	2003 г.			2004 г.				
	75 МВА		95МВА					
	I-XI	ноябрь	декабрь	январь	февраль	март	апрель	
Производство, т:								
жидкого	518477	34753,3	37326,1	54972,4	48712,898	58413,1	56159,53	
годного	508754	34298	36822	54316,5	48120,088	57735,5	55457,69	
Количество плавков	4753	320	347	508	449	533	522	
Средняя масса плавки, т:								
жидкого	109,09	115,472	112,115	110,421	114,090	112,958	112,040	
годного	107,04	107,150	106,453	106,981	107,049	107,959	106,291	
Время плавки, мин:								
общее	78,0	70,8	75,6	73,8	75,6	69,0	69,0	
токовое	51,70	49,99	49,25	48,19	49,95	46,28	44,97	
горячих простоев, мин/плавку	14,8	10,39	13,39	10,29	12,72	8,67	6,93	
Производительность, т/ч	82,34	90,83	84,37	86,97	84,79	94,48	92,6	
Удельный расход:								
электроэнергии, кВт·ч/т	478,449	477,637	481,259	491,49	492,268	460,01	455,122	
электродов диаметром 610 мм, кг/т*	3,065	3,07	2,89	3,08	3,98	2,42	2,55	
Температура выпуска, °С	1693	1696	1655	1681	1658	1660	1673	

\* Расход электродов технологический (без учета поломок).

## 2. Установка токоограничивающего реактора

Дальнейшее совершенствование энерготехнологического режима плавки связано с вводом в строй серийного (последовательного) токоограничивающего реактора.

При включении перед печным трансформатором реактора за счет собственной индуктивности выбранной ступени реактора будет возрастать индуктивная составляющая подводимой к печи электроэнергии. В упрощенном виде второй закон Кирхгофа для электропечной установки запишем следующим образом:

$$u_{\phi} = rI + Ldi/dt + u_{д} \quad (4)$$

Проанализировав выражение (4) при неизменности величины подводимого питающего напряжения, можно сделать вывод, что наиболее сильно изменение индуктивности  $L$  отразится не на силе протекающего тока, а на величине изменения тока, т. е.  $di/dt$ , которая будет уменьшаться с ростом  $L$ . Это означает, что ДСП как объект управления становится менее чувствительным к резкому изменению нагрузки. Другими словами, в моменты возникновения коротких замыканий, когда ток стремится вырасти, или в моменты поднятия электродов, когда ток стремится уменьшиться, электроэнергия, запасенная в дросселе, будет воспрепятствовать резкому изменению тока, будет пытаться сохранить его на прежнем уровне, стабилизировать его.

В комплексе с печным трансформатором по проекту, разработанному ОАО «ТЯЖПРОМЭЛЕКТРОПРОЕКТ» для БМЗ, в 2004 г. был установлен токоограничивающий реактор, технические характеристики которого приведены в табл. 2.

Таблица 2. Технические параметры силового оборудования ДСП-2

Технический параметр	Характеристика
Трансформатор, МВА	
Номинальная мощность, МВА	95
Напряжение первичной обмотки, В	33000
Напряжение вторичной обмотки, В	420–960
Сила тока первичной обмотки, А	923–1662
Максимальная сила тока вторичной обмотки, А	72500
Частота питающей сети, Гц	50
Серийный реактор	
Количество фаз	3
Проходная мощность, МВА	95
Максимальная реактивная мощность, МВАр	21.5
Номинальное напряжение, В	33000
Номинальный ток, А	1662
Ступени индуктивности	0–0,65–1,274–1,664–2,106–2,6
Частота сети, Гц	50

## 3. Установка системы регулирования мощности типа SIMELT AC&NEC

Если мощность ДСП  $S_{ном}$  определяет в конечном счете энергетику теплогенерации в рабочем пространстве печи, то вместимость  $m_o$ , определяющая геометрические размеры печи, может характеризовать теплообменные процессы в рабочем пространстве. Для решения задач по оптимизации теплообменных процессов в рабочем пространстве печи, минимизации тепловых потерь и создания оптимальных рабочих режимов была призвана установка новой системы регулирования электродов с оптимизацией мощности.

К концу 2004 г. возможности старой аналоговой системы регулирования электродов были практически полностью исчерпаны. Кроме того, после ввода в эксплуатацию на ДСП-2 трансформатора мощностью 95 МВА вместо 75 МВА за счет увеличения уровня напряжения рабочих ступеней произошел рост излучения на стенки печи и возникла проблема перегрева стеновых охлаждающих панелей печи. Регулирование на тот момент представляло собой поиск компромиссных решений между стремлением к экономии электроэнергии и необходимостью обеспечения нормальной стойкости охлаждаемых элементов печи.

Рассмотренные выше проблемы удалось решить при внедрении регулятора от Simens SIMELT AC&NEC – системы на основе нейронной сети, разработанной для оптимального ввода энергии и решения задач оптимизации в отношении более высокой производительности и дополнительной экономии. К особенностям системы SIMELT AC & NEC относятся использование математической модели с нейронными сетями; автоматизация процесса, основанная на металлургической и тепловой модели печи с вычислением температуры и требуемых примесей к сплаву; система мониторинга.

Благодаря перечисленным выше достоинствам SIMELT AC & NEC обеспечивает сокращение времени процесса плавления, главным образом времени нахождения плавки под током; более низкий расход энергии и электродов; сокращение числа поломок электродов; увеличение срока использования печной футеровки; низкие критические пики напряжения на оборудование печи.

Важным фактором в использовании предлагаемой гибридной модели с нейронными сетями является то, что они обладают способностью определять отношения между параметрами процесса в течение плавки и устанавливать рабочие точки для регулирования непрерывно. Тем самым применяемая модель может рассматриваться как отображение электрической ситуации от комплекса трехфазной системы.

Система SIMELT AC & NEC определяет устойчивый оптимальный набор точек для подчиненной системы управления. Оптимизация заботится об ограничении нескольких технологических параметров (ток, мощность, импеданс) и процесса теплового нагрева панелей. Это означает, что нейронные сети чрезвычайно эффективны и осуществляют ввод большей полезной мощности, когда реализуют математическую модель с рассмотрением всех трех фаз. Не измеряемые переменные (например, значения дуг) могут быть легко определены в диа-

логовом режиме, в результате чего информация, полученная от нейронной сети, поступает в адаптивную модель.

### **Оптимизация электроэнергии**

Эффективная мощность, выделяемая каждой фазой, определяется на основе новой математической модели сложной трехфазной системы. Для достижения максимального ввода энергии оптимизация нацелена на определение максимального значения эффективной мощности в любое время на всех уровнях процесса плавки.

Оптимальные условия для использования дуги вычисляются непрерывно. Сначала в течение нескольких минут модель начинает разворачивать первичную функцию, которая определяет параметры электрического цикла. Оптимальные рабочие точки на основе полученных результатов из специальной нейронной сети рассчитываются на втором этапе обработки. Это означает, что даже когда идет динамический процесс выплавки и изменения реактансов влияют на расплав металла, система регулирования корректирует текущую установленную точку для достижения максимального ввода энергии.

### **Регулирование теплового баланса печи**

В случае критической тепловой нагрузки на одной из охлаждаемых панелей или в случае температурного градиента, превышающего допустимый диапазон, алгоритм температурной оптимизации определяет перераспределение мощности в зависимости от типа перегрузки. Перераспределение не только предусматривает сокращение излучаемой мощности, но и держит эффективную мощность на самом высоком уровне в зависимости от фактического значения ступени трансформатора. Поэтому интенсивность дуг, ближайших к месту с критической тепловой нагрузкой, уменьшается регулированием соответствующих наборов точек.

Если общая тепловая нагрузка превышает критическое значение, снижение ступени трансформатора происходит автоматически, согласно predeterminedной процедуре. Как только фактическая температура охлаждаемой панели достигнет не критического значения, модель разрешает увеличивать ступень трансформатора снова. Это дополнительное управление тепловым распределением разрешает определение правильного момента уменьшения или увеличения ступени трансформатора. Следовательно, максимальный ввод мощности может или поддерживаться максимально долго, или может быть возобновлен настолько быстро, насколько это возможно после понижения ступени трансформатора.

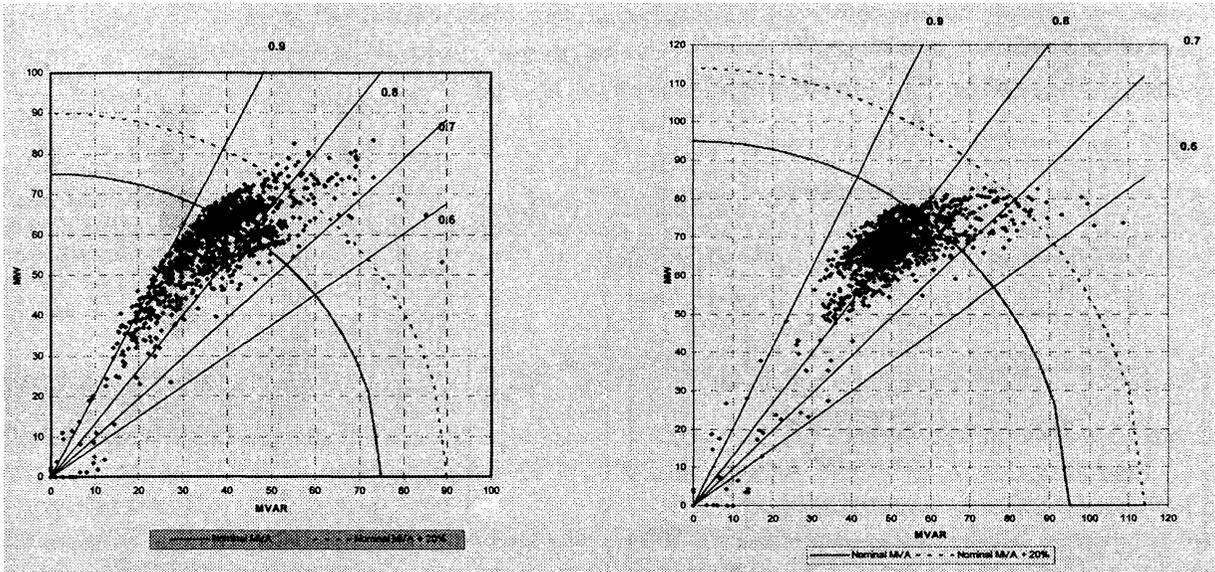


Рис. 1. Круговые диаграммы работы ДСП-2 до и после модернизации: а – 75МВА+Simelt; б – 95МВА + реактор+Simelt AC&NEC

Система регулирования SIMELT AC&NEC выполнена на программируемом контроллере SIMATIK S7/400 и промышленном компьютере Pentium. Самообучающаяся система регулирования SIMELT AC&NEC эффективно управляет процессом благодаря использованию гибридной модели, являющейся комбинацией математической модели электропечного контура и нейронной сети. Использование данной системы позволяет автоматически поддерживать максимально допустимый уровень активной мощности на всем протяжении плавки при рациональном распределении излучения дуг внутри печи.

Ввод в строй реактора и новой системы регулирования позволили уточнить и откорректировать параметры энерготехнологического режима работы ДСП-2.

На рис. 1 показаны круговые диаграммы работы ДСП-2 до и после модернизации. В результате проведения ряда технических мероприятий на сталеплавильной печи область рабочих точек, ограниченная максимальными и минимальными значениями мощности, тока, коэффициента мощности, кривыми рабочих ступеней, имеет более стабильный режим, обусловленный оптимизацией вводимой мощности и работой последовательного реактора дополнительной индуктивности.

#### Упрощенная функциональная блок-схема управления электродами на ДСП-2

ДСП-2 представляет собой сверхмощную дуговую сталеплавильную печь переменного тока, оборудованную трансформатором, серийным реактором (дресселем) и системой управления электродами (рис. 2).

Система регулирования SIMELT AC & NEC с оптимизацией вводимой мощности (рис. 2, поз. 7) состоит из трех устройств-подсистем и имеет ряд функций, определяющих оптимальную работу регулятора с трансформатором, печью, электродом. Предназначена для обеспечения точности регулирования рабочей точки дуги при плавлении металлошихты. Система SIMELT AC & NEC состоит из следующих элементов.

1. Устройство PLC (программно-локальный компьютер) (рис. 2, поз. 9) контроллера S7-400 состоит из корзины «Симатика», в которой размещены ячейки процессора аналоговых и цифровых входов и выходов. В памяти ячейки процессора находится программа регулирования электродами. PLC-контроллер осуществляет регулирование движения электродов.

2. Устройство NEC-компьютер (рис. 2, поз. 10) осуществляет оптимизацию ввода мощности путем корректировки задаваемого PLC-контроллером управляющего напряжения на сервоклапан (рис. 2, поз. 4).

3. Устройство «компьютер WinCC» с сервером (рис. 2, поз. 11) осуществляет отображение настроек и протекающих процессов в PLC-контроллере S7-400 и компьютере NEC. В нем также хранятся архивы прошедших событий.

Система регулирования SIMELT AC & NEC обеспечивает возможность автоматического регулирования вводимой мощности на всех этапах плавки. В зависимости от этапа плавки (проплавление «колодцев», плавление шихты, нагрев жидкой ванны) система подбирает оптимальные режи-

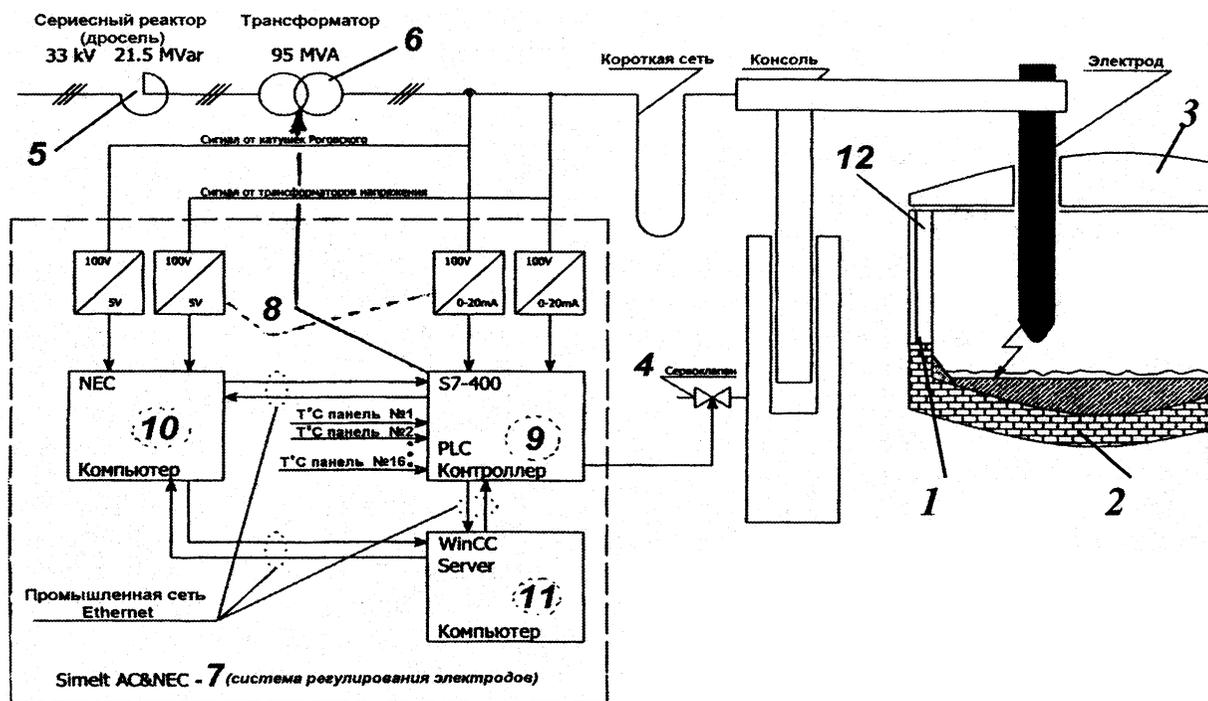


Рис. 2. Схема подключения ДСП-2: 1 – корпус; 2 – подина; 3 – свод; 4 – сервоклапан; 5 – серийный реактор с максимальной реактивной мощностью 21,5 МВАр; 6 – трансформатор 95 МВА; 7 – система регулирования электродов SIMELT AC & NEC; 8 – датчики напряжения (U) и тока (I); 9 – PLC (программно-локальный компьютер); 10 – NEC-компьютер; 11 – компьютер WinCC с сервером; 12 – стенная панель

мы, снижаются расход электродов и электро-энергии.

В системе оптимизации NEC для снижения теплового воздействия на стенную футеровку используется возможность перераспределения излучения фаз; при росте температуры стеновых водоохлаждаемых панелей (рис. 2, поз. 12) до значения + 70 °С происходит автоматическое снижение рабочей ступени трансформатора для предупреждения их перегрева и выхода из строя (прогара).

В результате оборудования новым печным трансформатором мощностью 95+10% МВА с последовательным реактором мощностью 21,5 МВА и современной системой управления с 2004 по 2005 г. снизились простои ДСП-2.

Как видно из табл. 3, после ввода системы SIMELT AC & NEC уровень горячих простоев, связанных с превышением допустимой тепловой нагрузки на ДСП-2, изменился следующим образом:

суммарная длительность простоев сократилась на 1508 мин, или 67,5%. При этом наиболее значительно снизились простои, непосредственно связанные с работой системы управления электродами, – по превышению температуры охлаждающей воды и замене водоохлаждаемых панелей, что свидетельствует о достаточно эффективной работе установленного оборудования.

Таким образом, по состоянию на 2007 г. можно условно разделить развитие ДСП-2 на РУП «БМЗ» на два этапа:

- 1) увеличение мощности электропечной установки путем замены печного трансформатора мощностью 75МВА на трансформатор мощностью 95МВА+10% (2004 г.);
- 2) установка серийного реактора дополнительной индуктивности и замена системы регулирования электродов с оптимизацией ввода мощности (2005 г.).

Таблица 3. Длительность горячих простоев ДСП-2 по причинам, связанным с превышением допустимой тепловой нагрузки

Параметры	Длительность горячих простоев по периодам работы, мин							
	превышение температуры охлаждающей воды		замена водоохлаждаемой панели		течь водоохлаждаемых элементов каркаса		сумма простоев	
	2004 г.	2005 г.	2004 г.	2005 г.	2004 г.	2005 г.	2004 г.	2005 г.
ДСП-2	81	18	1104	152	1050	557	2235	727

Таблица 4. Основные технико-экономические показатели ДСП-2 в 2003–2007 гг.

Период	2003 г.	2004 г.	Отклонение 2004/2003 г., %	2005 г.	Отклонение 2005/2004 г., %	2006 г.	Отклонение 2006/2005 г., %	2007 г.	Отклонение 2007/2006 г., %	Отклонение 2007/2003 г., %
Электроды, кг/т	3,05	2,64	-13	2,32	-12	2,3	-1	2,2	-4,35	-27,88
Электроэнергия, кВт·ч/т	481	464	-3,53	446	-3,88	439	-1,57	440	0,23	-8,52
Масса год, тыс. т	545	636	16,72	641	0,80	749	16,88	709	-5,40	30
Продолжительность без простоев, мин	77,91	72,71	-6,67	66,42	-8,65	62,08	-6,53	62,58	0,80	-19,68
Продолжительность под током, мин	52,67	46,17	-12,34	45,42	-1,62	44,58	-1,85	45	0,94	-14,56
Производительность печи, т/ч	82,6	91,38	10,60	96,39	5,48	102,22	6,05	102,13	0	23,60

Динамика основных технико-экономических показателей работы ДСП за период 2003–2007 гг. приведена в табл. 4.

Детальный анализ каждого мероприятия по модернизации ДСП приведен выше. Итоговые результаты за пять лет показаны на рис. 3–5.

Среднечасовая производительность в 2003 г. составляла 82,6 т при годовом производстве 545 тыс. т. Производство в 2006–2007 гг. уже было достигнуто более 710 тыс. т (30%) при

среднечасовой производительности более 102 т (23,6%).

Рост производительности ДСП-2 в 2004 г. активно связан с увеличением мощности трансформатора. Улучшение технико-экономических показателей работы ДСП-2 в 2005 г. происходило в результате оптимизации энергетических режимов плавки и связано с установкой системы регулирования SIMELT AC & NEC. Из рисунков видно, что все основные показатели, определяющие эко-

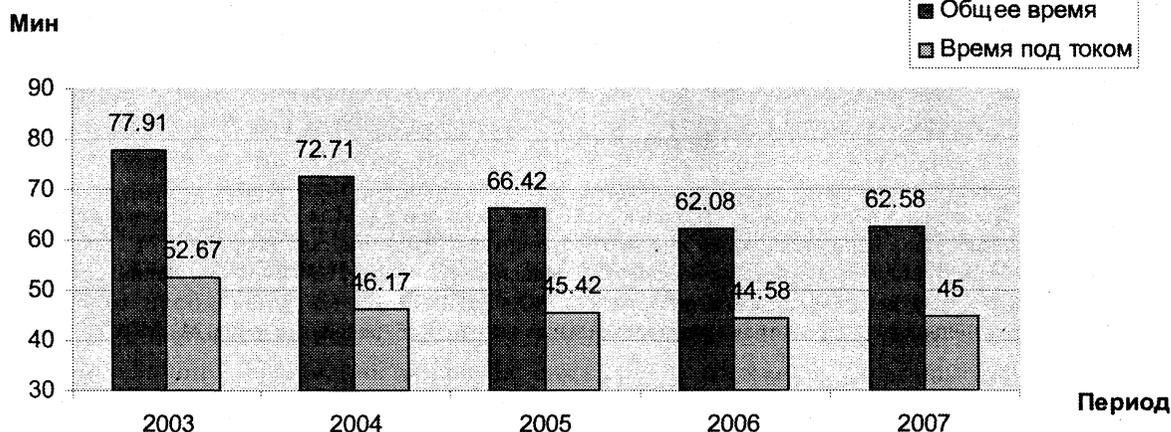


Рис. 3. Динамика цикла плавки

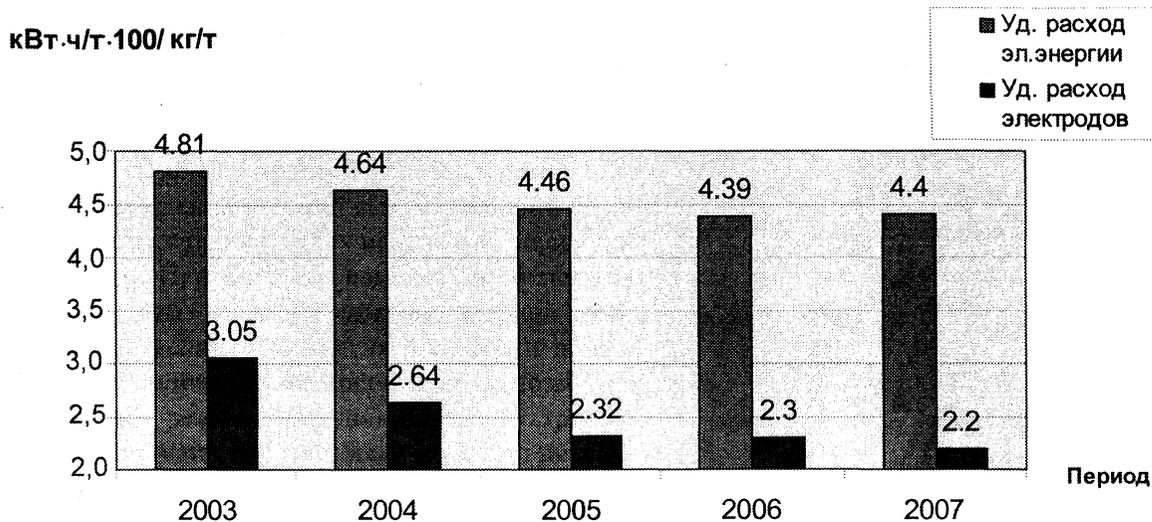


Рис. 4. Динамика удельных показателей

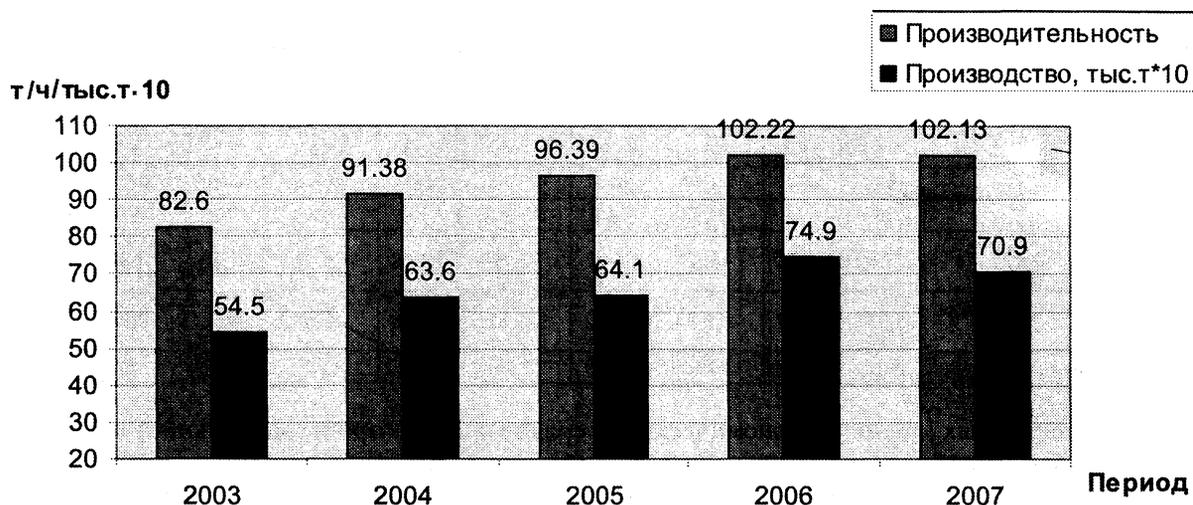


Рис. 5. Динамика производительности печи

номику печи, при достижении в 2006 г. были сохранены и в 2007 г. Это обуславливается в первую очередь тем, что оптимальный энерготехнологический режим плавления в результате оборудования ДСП-2 новым печным трансформатором мощностью 95 + 10 МВА с последовательным реактором мощностью 21,5 МВА и современной системой регулирования SIMELT AC & NEC был достигнут в 2006 г. и сохранен в 2007 г.

В настоящее время установлено, что для эффективной реализации энергосберегающих режимов на длинных дугах необходимо соответствие электрических и технологических параметров работы ДСП. Применение печных трансформаторов с повышенным вторичным напряжением требует оборудования ДСП эффективной инжекционной системой для вспенивания шлака.

### Литература

1. Егоров А. В. Электроплавильные печи черной металлургии: Учеб. для вузов. М.: Металлургия, 1985.
2. Смоляренко В. Д., Девицкий А. Г., Попов А. Н., Бесчаснова М. А. Энерготехнологические особенности процесса электроплавки стали и инновационный характер его развития // Электротехнология. 2003. № 12. С. 12–19.
3. Энергосбережение при электроплавке. Материалы Российско-Германского семинара, 21-30.04.1996 г. Национальный комитет по электротехнологии, семинар по электроплавке и электропечам. АО «ВНИИЭТО».
4. Егоров А. В. Расчет мощности и параметров электроплавильных печей: Учеб. пособ. для вузов. М.: МИСИС, 2000.