

Вывод: задача создания бездатчиковой схемы импульсно-векторного регулирования является актуальной, и есть все физические и теоретические основания полагать, что возможно реализовать такую схему, основываясь на значениях напряжений на обмотках двигателя.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Усынин Ю.С. Импульсное управление асинхронным двигателем с фазным ротором / Усынин, Ю.С., Валов А.В. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2007. – №8. – С. 24 – 27.

УДК 621.365.2 : 681.325

Якимов И.А., Николаев А.А.,  
Корнилов Д.А., Корнилов Г.П.,  
Ануфриев А.В., Горбунов В.С.,  
Прудников Е.В.  
(ГОУ ВПО «МГТУ им. Г. И. Носова»,  
г. Магнитогорск, [yakimov\\_ivan@mail.ru](mailto:yakimov_ivan@mail.ru))

### **ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ**

Дуговые сталеплавильные печи (ДСП) в настоящее время являются наиболее производительными сталеплавильными агрегатами. Высокая концентрация тепловой энергии дугового разряда в небольшом объеме позволяет провести полный цикл плавки за 30-40 минут.

Последнее десятилетие характеризуется все большим применением высокоимпедансных печей сверхвысокой мощности, при этом установленная мощность печного трансформатора приближается к предельному значению 1 МВА/т. Печи такого типа характеризуются повышенным вторичным напряжением печного трансформатора (до 1600 В) и последовательно включенным регулируемым индуктивным сопротивлением – реактором, который позволяет регулировать общее сопротивление электропечного контура (импеданса) в широких пределах. Кроме этого реактор обеспечивает возможность работы печи в энергосберегающих режимах - повышенных вторичных напряжениях и пониженных рабочих токах, что является необходимым элементом современной электросталеплавильной технологии [1].

Дуговые печи относятся к мощным потребителям электрической энергии с резкопеременным, несимметричным и нелинейным характером нагрузки. Особенно неблагоприятные значения показателей этих характеристик нагрузки печи (дисперсия, амплитуда колебания и коэффициент несимметрии токов и мощности дуг, реактивной мощности печи) отмечаются в период расплавления твердой шихты. Следствием

этого являются ухудшение технико-экономических показателей работы печи и показателей качества электроэнергии в точке присоединения печи к энергосистеме. В частности, снижается мощность дуг, увеличивается потребление реактивной мощности, мощность потерь и снижается коэффициент полезного действия. Работа печи сопровождается значительными колебаниями и несимметрией напряжения на шинах питания, что во многих случаях приводит к недопустимым значениям показателей качества электрической энергии. Кроме этого, большие значения колебания токов могут приводить к значительным электродинамическим усилиям и вибрациям системы.

Для сохранения производительности и уменьшения неблагоприятных воздействий печи на питающую сеть, напряжение и ток, подводимые к печи, формируют на разных этапах плавки путем изменения вторичного напряжения электропечного трансформатора, а также изменением длины дуги посредством регулятора положения электродов.

Существуют несколько способов обеспечения электромагнитной совместимости ДСП с питающей сетью и увеличения производительности печи. Выделим главные:

1. Компенсация возмущений в точке присоединения печи к сети.

2. Совершенствование динамических характеристик печи за счет плавного регулирования вторичного напряжения печного трансформатора и индуктивного сопротивления реактора.

К первому способу относят устройства статической (конденсаторные батареи) и динамической компенсации (СТК и STATCOM), а также прочее оборудование, подключаемое на высокой стороне и компенсирующее возмущения (рис.1). Ко второму способу относят устройства и алгоритмы управления, обеспечивающие уменьшение причин негативных воздействий, производимых печью.

Применение компенсирующих устройств позволяет стабилизировать электрические координаты в точке подключения, но электрический режим ДСП остается нестабильным. Необходимость сокращения отрицательного влияния ДСП на энергосистему и увеличения производительности приводит к идее разработки «активных» систем. Суть таких систем состоит в том, чтобы автоматически изменять электрические координаты печи: вторичное напряжение печного трансформатора, индуктивное сопротивление, длину дуги с целью формирования электрических характеристик печи заданного вида и поддержания основных показателей качества электроэнергии. Иногда поддержание всех электрических координат на заданном уровне, соответствующему оптимальной работе ДСП противоречит друг другу. В этом случае необходимо выбирать компромиссный вариант.

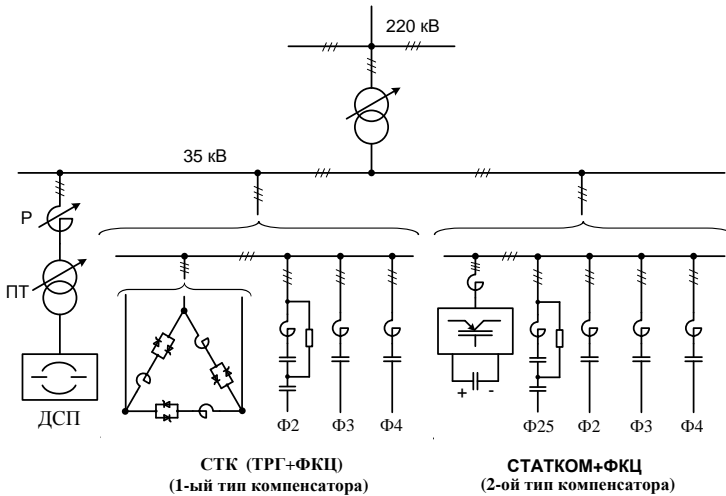


Рис.1. Основные типы компенсаторов реактивной мощности для ДСП

В настоящей статье показаны возможности по реализации второго способа обеспечения электромагнитной совместимости печи с сетью и увеличения производительности за счет регулирования мощности ДСП.

Представим на рис.2 однофазную схему замещения электрического контура ДСП, (рис. 2, а), которая в упрощенном виде состоит из трех элементов – это: дуговой промежуток, в виде переменного активного

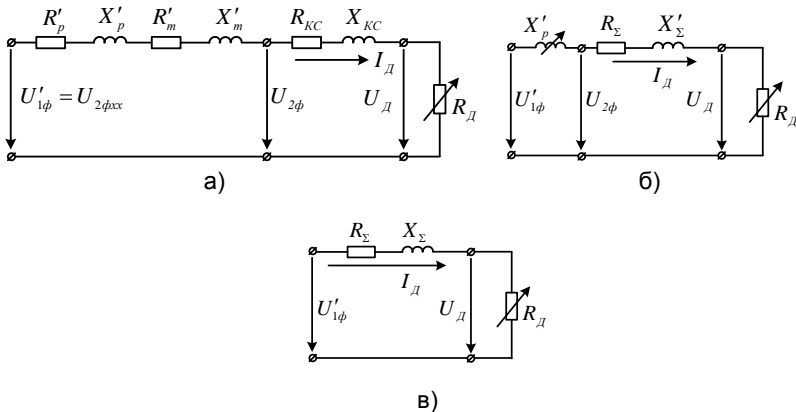


Рис.2. Однофазные схемы замещения электрического контура ДСП: а) исходная; б) упрощенная с индуктивным сопротивлением реактора; в) упрощенная

сопротивления  $R_\delta$ , вся электрическая часть, в составе печного трансформатора с реактором ( $R'_p, R'_m, X'_p, X'_m$ ), короткой сети и электрода (сопротивления  $R_{KC}$  и  $X_{KC}$ ). Эти элементы, кроме индуктивного сопротивления реактора, на схеме замещения учитывают в виде суммарных активного  $R_\Sigma$  и индуктивного  $X_\Sigma$  сопротивлений (рис. 2, б). На рис. 2 (в) учтены все элементы схемы.

В соответствии с векторной диаграммой (рис. 3) для упрощенной схемы замещения выражение напряжения дуги имеет вид:

$$U_D = \sqrt{U_{1\phi}^2 - (I_D X_\Sigma)^2} - I_D R_\Sigma, \quad (1)$$

где  $I_D$  – ток дуги;  $U'_{1\phi}$  – напряжение питающей сети, приведенное к стороне низкого напряжения печного трансформатора.

На основе выражения (1) получают аналитические зависимости активной, реактивной и полной мощностей ( $P, Q, S$ ), потребляемой ДСП, мощности дуги  $P_D$ , активных потерь  $\Delta P$ , электрического КПД  $\eta_{эл}$  и коэффициента мощности  $\cos \varphi$  от действующего значения тока дуги  $I_D$ . Аналитические выражения для перечисленных зависимостей, представлены ниже:

$$P_D = 3U_D I_D; \Delta P = 3I_D^2 R_\Sigma; P = P_D + \Delta P; \quad (2), (4)$$

$$S = U'_1 I_\delta; Q = \sqrt{S^2 - P^2}; \chi = P/S; \eta_{эл} = P_\delta/P. \quad (5), (8)$$

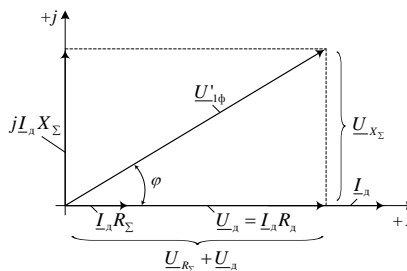


Рис. 3. Векторная диаграмма токов и напряжений ДСП для упрощенной схемы замещения

После несложных математических преобразований получим выражение для активной мощности дуги (с целью упрощения принимаем  $R_{\Sigma} = 0$ )

$$P_{\text{д}} = \frac{U_{\text{д}} \cdot \sqrt{U'_{1\phi}{}^2 - U_{\text{д}}^2}}{X_{\Sigma}} = \frac{U_{\text{д}} \cdot \sqrt{U'_{1\phi}{}^2 - U_{\text{д}}^2}}{X_p + X'_{\Sigma}} \quad (9)$$

где  $X'_{\Sigma} = X'_m + X_{\text{КС}}$ .

Учитывая, что напряжение дуги определяется по следующему выражению

$$U_{\text{д}} = \beta \cdot l_{\text{д}} + \alpha \quad (10)$$

где  $\beta$  - градиент напряжения столба дуги (зависит от условий ионизации электрической дуги  $\beta = 1 \div 8$  В/мм);

$l_{\text{д}}$  - длина столба дуги, мм;

$\alpha$  - падение напряжения в приэлектродных областях (для дуговых печей переменного тока  $\alpha = 20 \div 40$  В), в дальнейших расчетах данной величиной пренебрегаем и считаем равной нулю;

выражение (9) можно записать в следующем виде

$$P_{\text{д}} = \frac{\beta \cdot l_{\text{д}} \cdot \sqrt{U'_{1\phi}{}^2 - (\beta \cdot l_{\text{д}})^2}}{X_{\Sigma}} = \frac{\beta \cdot l_{\text{д}} \cdot \sqrt{U'_{1\phi}{}^2 - (\beta \cdot l_{\text{д}})^2}}{X_p + X'_{\Sigma}} \quad (11)$$

Как видно из формулы (11) регулирование мощности дуги возможно за счет изменения трех параметров:

- а) изменением значения приведенного напряжения  $U'_{1\phi}$ ;
- б) изменением длины дуги  $l_{\text{д}}$ ;
- в) изменением индуктивного сопротивления реактора  $X_p$ .

Графические зависимости мощности дуги для одной фазы от вышеперечисленных параметров приведены на рис.4.

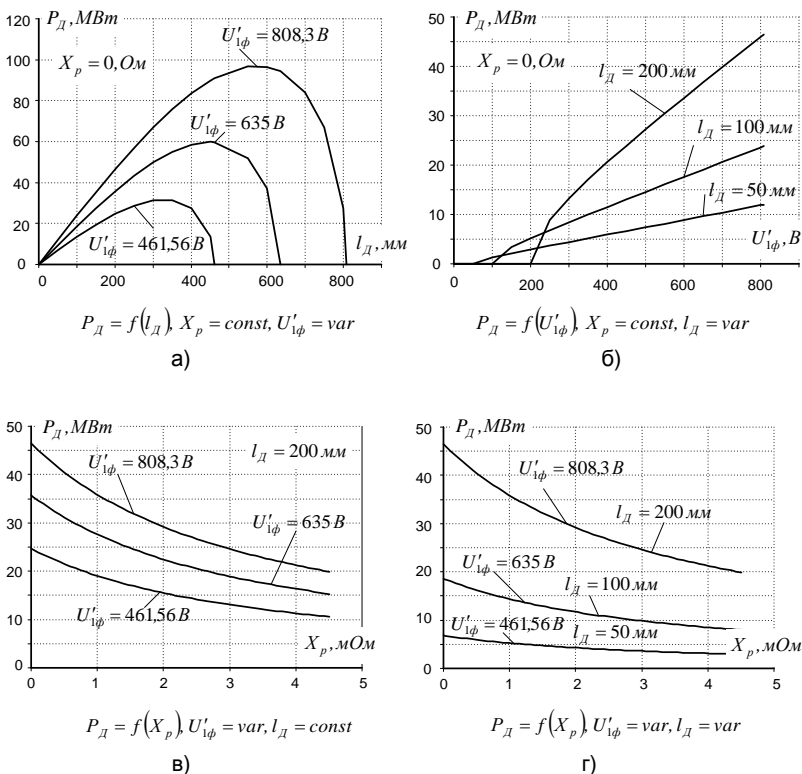


Рис.4. Зависимости мощности дуги

Одним из способов интенсификации процесса плавки и увеличения производительности печи является оптимальное управление, обеспечивающее поддержание максимальной мощности дуги. На рис.5 представлены рабочие характеристики ДСП-180 ОАО «ММК» при различных сочетаниях значений напряжения и индуктивного сопротивления реактора.

В существующих системах применяют ступенчатые переключатели (РПН) напряжения печного трансформатора и индуктивности ректора. Переключение ступеней происходит в течении 3-5 с. В этот промежуток времени система управления находится в разомкнутом состоянии и электрический режим печи не соответствует оптимальному. Увеличить динамику процесса регулирования и реализовать различные алгоритмы управления ДСП возможно в том случае, если использовать два дополнительных быстродействующих каналов управления:

1. По плавному изменению индуктивного сопротивления реактора.

2. По плавному изменению величины вторичного напряжения печного трансформатора.

Третий (основной) канал управления воздействует на длину дуги за счет перемещения электродов относительно расплава. Данный канал управления используется на всех дуговых печах и обладает малым быстродействием, вследствие механической инерции элементов гидропривода (постоянная времени данного канала составляет 0,2-0,4 с).

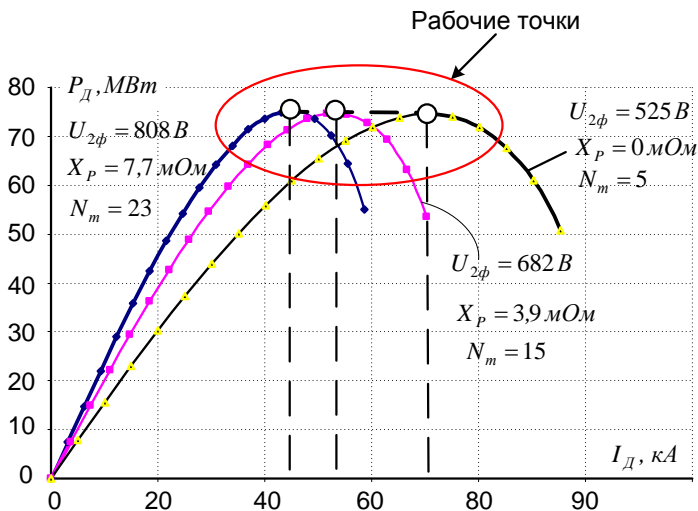


Рис.5. Электрическая характеристика ДСП в случае одновременного изменения индуктивности реактора и вторичного напряжения (мощность приведена для трех фаз)

Следует отметить, что рабочую характеристику печи, которая подобна характеристике показанной на рис.5, можно получить с существующими параметрами реактора и печного трансформатора на действующей печи ДСП-180 ОАО «ММК». В этом случае максимальное значение мощности будет соответствовать 102,33 МВт, а соответствующее ему минимальное значение тока 63,39 кА, максимальное значение тока составит 70 кА.

В табл.1 приведены числовые значения  $U'_{1φ}$  и  $X_p$ , при которых мощность дуги сохраняется на максимальном уровне. Кроме того, мощность сохраняет свое максимальное значение при изменении длины дуги (тока дуги). Возможно получение большей максимальной мощности при меньшем диапазоне изменения тока.

Таблица 1

Наименование параметра	Ед. изм.	Рабочие точки		
Вторичное напряжение, $U_{2\phi}$	В	808	682	525
Сопротивление реактора, $X_p$	МОм	7,7	3,9	0
Вторичный ток, $I_D$	кА	45,75	54,8	74,45
Значение мощности дуги, $P_D$	МВт	75,01	74,63	74,65
Отношение мощность/ток	МВт/кА	1,6	1,36	1,002

#### ВЫВОДЫ:

1. Регулирование активной мощности ДСП возможно за счет плавного изменения: длины дуги, индуктивного сопротивления реактора, вторичного напряжения печного трансформатора.
2. Возможно получение максимальной активной мощности дуги при широком диапазоне изменения тока.
3. Использование трех каналов регулирования обеспечивает различные алгоритмы управления электрическими режимами ДСП по поддержанию одного из параметров (активной мощности, реактивной мощности, тока), что, в конечном счете, создаст предпосылки для работы печи без дополнительных компенсирующих устройств.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Миронова А. М., Миронов Ю. М. Энерготехнологическая эффективность дуговых сталеплавильных печей: Учеб. пособие / Под ред. Ю. М. Миронова. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1999. – 154 с.