

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ С ДУГАМИ (Часть 1)

1. Однофазная схема замещения дуговой печи

С электрической точки зрения дуговую установку можно представить как набор активных и индуктивных сопротивлений, подключенных к питающей сети. Считая дуговую печь симметричной трехфазной системой (анализ этого и других допущений приведен в [1]), схему замещения можно считать однофазной, включенной на фазное напряжение вторичной стороны печного трансформатора $U_{2\phi}$ (рис. 1). Представленные на схеме активное и индуктивное сопротивления R и X отражают соответствующие суммарные сопротивления вторичного токоподвода и печного трансформатора. Переменное сопротивление дуги отражено параметром R_d .

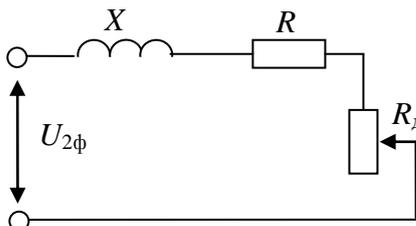


Рис. 1. Однофазная схема замещения дуговой сталеплавильной печи

Для однофазной схемы замещения ДСП легко построить векторную диаграмму напряжения. Согласно второму закону Кирхгофа, сумма векторов падений напряжений на элементах контура равна напряжению, приложенному к контуру:

$$U_{2\phi} = I \cdot R + I \cdot R_d + I \cdot X.$$

Это уравнение иллюстрирует векторная диаграмма на рис. 2.

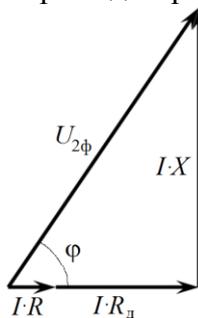


Рис. 2. Векторная диаграмма напряжений однофазной схемы замещения ДСП

Угол между векторами $U_{2\phi}$ и $I \cdot R$ называют φ , он определяет величину коэффициента мощности $\cos \varphi$. При изменении электрического режима от тока короткого замыкания к холостому ходу угол φ уменьшается от величины $\arctg(X/R)$ при коротком замыкании и стремится к нулю при приближении к холостому ходу. При этом вектор $U_{2\phi}$ описывает дугу по часовой стрелке.

Режимы от короткого замыкания до максимума активной мощности называют режимами коротких дуг, соответственно токи менее режима максимума активной мощности соответствуют режимам длинных дуг.

Такая схема замещения дает возможность получить достаточно простые выражения для электрических и рабочих характеристик. Что это такое, и для чего они нужны?

Удельный расход электроэнергии и производительность печи зависят не только от технологических факторов – состава стали, шихты, квалификации персонала и т.п., но и в неменьшей степени от того, насколько правильно выбран электрический режим печи.

2. Способы регулирования электрического режима.

Регулирование электрического режима цепи с дугой возможно тремя способами: регулированием напряжения источника питания, регулированием сопротивления в цепи дуги, регулированием напряжения дуги [1]. На рис. 3, а показано, что путем изменения напряжения источника питания можно в достаточно широком диапазоне изменять ток дуги при постоянном значении активного сопротивления в этой цепи и при постоянной длине дуги. Значения токов дуги $I_{д1}$, $I_{д2}$ и $I_{д3}$ определяется здесь горизонтальными координатами точек пересечения искусственных характеристик источника питания, $U=f(I_d)$ и вольт-амперной характеристики дуги $U_d=f(I_d)$.

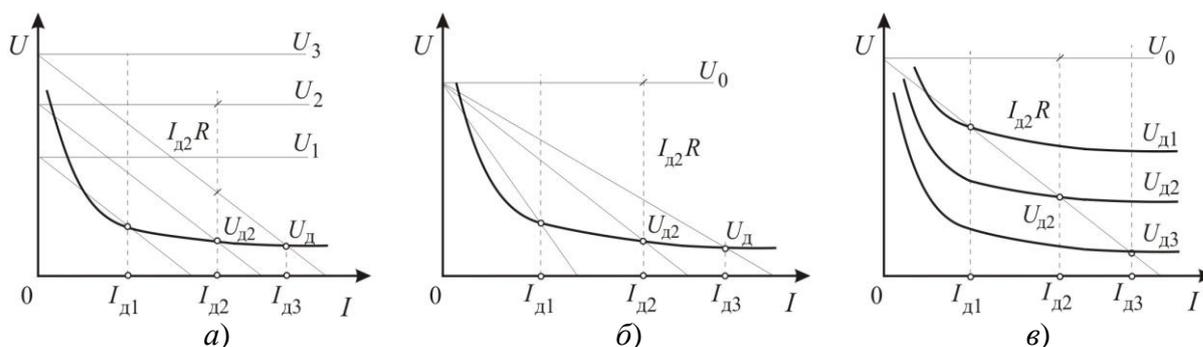


Рис. 3. Способы регулирования электрического режима цепи с дугой.

Различные значения тока ($I_{д1} < I_{д2} < I_{д3}$) установлены в цепи дуги следующими способами: а) изменением напряжения источника питания $U_1 < U_2 < U_3$ при $R = \text{const}$; б) изменением сопротивления $R_1 > R_2 > R_3$ при $U = U_0 = \text{const}$; в) изменением длины дуги и напряжения на ней ($U_{д1} > U_{д2} > U_{д3}$) при $R = \text{const}$ и $U = U_0 = \text{const}$

Теоретически регулирование напряжения в сторону его увеличения не ограничено. Однако следует учитывать, что при таком регулировании резко увеличивается мощность источника, так как при прочих равных условиях одновременно с увеличением напряжения источника питания увеличивается и ток дуги.

Еще одна особенность этого способа заключается в том, что повышение напряжения источника питания вызывает снижение электрического КПД установки. Это вытекает из соотношения

$$\eta = P_n / (P_n + P_{эп}) = P_d / P = U_d I_d / U I_d = U_d / U, \quad (1)$$

где: $P_n = P_d = U_d I_d$ – полезная электрическая мощность (мощность дуги); $P_{эп} = I_d^2 R$ – мощность электрических потерь; $P = P_d + P_{эп} = U I_d$ – активная мощность источника питания.

Второй способ регулирования электрического режима осуществляется регулированием сопротивления балластного резистора, включенного последовательно с дугой. Как показано на рис. 3, б, уменьшение этого сопротивления вызывает уменьшение угла наклона искусственной внешней характеристики источника питания и, как следствие, увеличение тока дуги. Наибольший ток дуги обусловлен допустимым для источника питания током. Электрический КПД цепи при этом способе регулирования изменяется незначительно в соответствии с изменением напряжения дуги.

В процессе регулирования тока дуги по третьему способу (рис. 3, в) изменяется длина дуги, а значит и ее напряжение. Каждой новой длине дуги соответствует своя вольт-амперная характеристика и новая точка пересечения выбранной характеристики дуги с той же внешней характеристикой источника питания. Электрический КПД цепи, как показывает уравнение (1), будет тем выше, чем больше напряжение дуги.

При работе ДСП используются первый и третий способы. Первый способ, осуществляемый переключением обмотки высокого напряжения печного трансформатора, исполь-

зуются обычно лишь несколько раз за плавку. Третий способ позволяет регулировать режим печи непрерывно и плавно вертикальным перемещением электродов по команде системы автоматического управления, поддерживающей на заданном уровне ток и мощность печи. Зависимость электрического режима от длины дуги называется *регулирующей* характеристикой.

3. Электрические и рабочие характеристики дуговых печей.

Так как непрерывное регулирование ведется по току, важно знать зависимость основных электрических показателей печи, в первую очередь ее мощности, КПД, коэффициента мощности, от рабочего тока, т.е. электрические характеристики печи.

Однофазная схема замещения (рис. 1) дает следующие зависимости для электрических характеристик фазы печи [2]:

1. $P_{\text{эл}} = I_2^2 R$ - мощность электрических потерь, Вт;
2. $P_{\text{д}} = I_2^2 R_{\text{д}} = I_2 \sqrt{U_{2\text{ф}}^2 - (I_2 X)^2} - I_2^2 R$ - мощность дуги, Вт;
3. $P_{\text{а}} = P_{\text{д}} + P_{\text{эл}} = I_2^2 (R_{\text{д}} + R) = I_2 \sqrt{U_{2\text{ф}}^2 - (I_2 X)^2}$ - полная активная мощность фазы печи, Вт;
4. $\eta_{\text{э}} = P_{\text{д}} / P_{\text{а}}$ - электрический КПД печи;
5. $S = I_2 U_{2\text{ф}}$ - кажущаяся мощность печи, В·А;
6. $\cos \varphi = P_{\text{а}} / S = \sqrt{1 - (I_2 X)^2 / U_{2\text{ф}}^2}$ - коэффициент мощности установки.

На рис. 4 показаны электрические характеристики дуговой печи емкостью 100 тонн с трансформатором мощностью 85 МВА. Из рисунка видно, что с увеличением тока электрический КПД печи и ее коэффициент мощности уменьшаются, электрические потери растут пропорционально квадрату тока, полная активная мощность печи и мощность дуги сначала растут, а затем, пройдя максимум, уменьшаются. Поэтому увеличивать ток печи имеет смысл лишь до предела, соответствующего максимуму мощности дуг. При дальнейшем повышении тока будут увеличиваться только электрические потери, а КПД, $\cos \varphi$ и полезная мощность дуги будут уменьшаться.

Для того чтобы определить токи, при которых достигаются максимумы мощности дуги и полной активной мощности, необходимо продифференцировать математические выражения для соответствующих электрических характеристик и приравнять нулю первую производную.

Максимум полной активной мощности достигается при равенстве активной и реактивной мощности, когда $\cos \varphi = 0,707$, при этом

$$P_{\text{а}}^{\text{max}} = U_{2\text{ф}}^2 / (2X), \quad I_2' = U / (\sqrt{2}X).$$

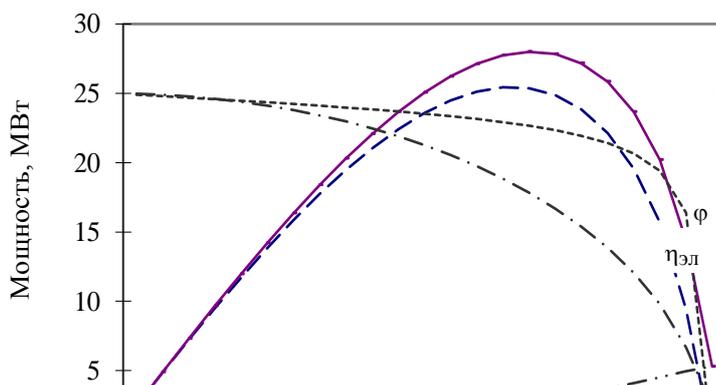


Рис. 4. Электрические характеристики дуговой установки

Максимум мощности дуги достигается при $R_d=Z$, где $Z = \sqrt{X^2 + R^2}$, при этом

$$P_d^{\max} = \frac{U_{2\phi}^2}{2(R+Z)}, \quad I_2'' = \frac{U_{2\phi}}{\sqrt{2Z \cdot (R+Z)}}.$$

К электрическим характеристикам относят также зависимость мощности тепловых потерь от тока $P_{тп}(I_2)$. Принимается, что они не зависят от тока, а их величина определяется из теплового баланса печи.

Электрических характеристик не достаточно для определения оптимального электрического режима печи. Дуговая сталеплавильная печь – это технологический агрегат, характеризующийся удельным расходом электроэнергии и производительностью. Для выявления связи между электрическим режимом и технико-экономическими показателями печи строят рабочие характеристики: производительность фазы печи и удельный расход электроэнергии.

Производительность фазы печи определяем по формуле

$$g = P_n' / 380 = (P_d - P_{тп}) / 380, \text{ т/час},$$

где P_n' – полезная мощность печи; 380 кВт·ч/т – теоретическое количество энергии, необходимое для расплавления 1 т стали с учетом тепла, аккумулированного футеровкой и переданного частично шихте.

Удельный расход электроэнергии

$$W = P_a / g, \text{ кВт·ч/т}.$$

На рис. 5 представлены рабочие характеристики, соответствующие рис. 4. Видно, что область допустимых рабочих режимов уже области допустимых электрических режимов. Если допустимыми считаются электрические режимы от холостого хода до тока короткого замыкания $I_{кз} = U_{2\phi} / \sqrt{X^2 + R^2}$, то допустимые рабочие режимы ограничены областью, для которой мощность дуги превышает мощность тепловых потерь. Ведь очевидно, что если вносимая в печь энергия меньше отводимой, то шихта нагреваться не будет.

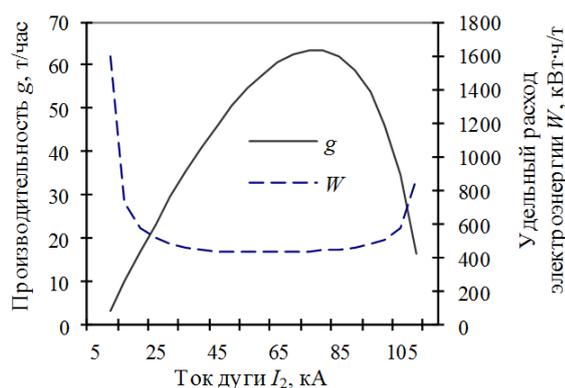


Рис. 5. Рабочие характеристики дуговой установки

Со временем развивались и менялись принципы построения энерготехнологических режимов, которые, в свою очередь, влияли на выбор параметров печных трансформаторов – номинальных токов и высших ступеней вторичного напряжения.

Изначально считалось, что оптимальными являются режимы в диапазоне от минимума удельного расхода электроэнергии до максимума производительности [1].

В начале 1970-х годов произошли кардинальные перемены в энергетике, конструкции печей и технологии электроплавки с появлением высокомошных ДСП. Стимулом для

разработки таких печей, или, как их еще называют, печей сверхвысокой мощности, стало создание фирмой «Юнион Карбайд» высококачественных графитовых электродов, допускающих плотность тока до 35 против 15-18 А/см² для обычных электродов [3].

Такой режим ввода удельной мощности 600 кВт/т впервые реализовал В. Швабе на двух 360-т ЭДП завода «Нортвестерн стил энд уайер» (США), используя электроды диаметром 610 мм при токовой нагрузке до 100 кА. В условиях высокой концентрации мощности в объеме рабочего пространства печи, когда необходимо быстро расплавить металл и не допустить чрезмерных тепловых нагрузок на футеровку, максимумы облученности ее дугами (рациональное воздействие дуг на футеровку) и интенсивности нагрева металла не совпадают с максимумом вводимой в печь мощности. Это объясняется тем, что длинная дуга в большей степени облучает футеровку, чем короткая, а также тем, что сильноточная мощная дуга под воздействием электромагнитных сил заглубляется в расплав и экранируется металлом и шлаком, при этом с ростом тока тепловой КПД дуги повышается и увеличивается передача мощности от дуги к металлу. Таким образом, в этом случае используется способ экранирования дуг погружением в металл.

Для оценки воздействия дуг на облученность футеровки и нагрева металла были предположены дополнительные энергетические характеристики: коэффициент износа футеровки КИФ и коэффициент интенсивности нагрева КИН [3]:

$$\text{КИФ} = \frac{P_d U_d}{a^2}, \text{ Вт} \cdot \text{В/см}^2,$$

где U_d – напряжение на дуге, определяющее ее длину, В;

P_d – мощность дуг, Вт;

a – расстояние от дуги до футеровки.

Например, наибольшее значение КИФ, достигнутое на печах с огнеупорной футеровкой, составляет 90 кВт/см² [3].

$$\text{КИН} = P_d I_d, \text{ МВт} \cdot \text{кА},$$

где P_d – мощность дуг, МВт;

I_d – ток дуги, определяющий ее заглубление в расплав под действием электромагнитных сил.

Например, на печи типа ДСП-40 завода «Днепросталь» с ростом КИН от 100 до 200 МВт·кА скорость нагрева металла увеличилась с 2 до 4 °С/мин.

КИФ и КИН – удобные эмпирические характеристики, позволяющие сопоставить энергетические условия в печи при разных режимах ввода электрической мощности и содержащие все параметры дуг, от которых зависят облученность футеровки и нагрев металла: мощность, длину, заглубление в расплав. Кривые КИФ и КИН в функции рабочего тока, как и кривые активной и полезной мощностей, проходят через максимумы, при которых рациональное воздействие дуг на футеровку (максимум КИФ) и интенсивность нагрева металла (максимум КИН) наибольшие. При совмещении кривых КИФ и КИН с электрическими характеристиками видно, что максимум P_d , который примерно соответствует коэффициентам мощности $\cos\varphi = 0,7-0,71$, не совпадает ни с максимумом КИФ, смещенным в сторону меньших токов ($\cos\varphi = 0,78-0,81$), ни с максимумом КИН, смещенным в сторону больших токов ($\cos\varphi = 0,63-0,68$) относительно тока I_2'' .

С учетом этого для высокомошных печей первых поколений был сформулирован принцип «трех максимумов» построения энерготехнологических режимов:

- проплавление «колодцев» в шихте вести длинными дугами в режиме максимума КИФ, когда боковые стенки колодца должны подвергаться наибольшей облученности;

- расплавление основной массы шихты, когда стены печи еще закрыты нерасплавившейся шихтой, вести в режиме максимума мощности дуг;

- доплавление и нагрев металла при открытом зеркале ванны вести в режиме максимума КИН, когда дуги заглублены в расплав и их тепловой КПД наибольший.

Ранее представлялось, что основные принципы такого электрического режима не подлежат пересмотру. Примером режима, построенного на принципе «трех максимумов», может служить энерготехнологический режим плавки в высокоомощной печи с трансформатором 125 МВ·А, высшая ступень напряжения $U_{2л} = 825$ В, $x = 4,2$ мОм: проплавление колодцев проводить при рабочем токе $I_2 = 62$ кА, мощности дуг $P_d = 63,5$ МВт, $\cos\varphi = 0,78$; расплавление основной массы шихты – при $I_2 = 70$ кА, $P_d = 72,9$ МВт, $\cos\varphi = 0,72$; заключительный этап расплавления и нагрев металла – при $I_2 = 80$ кА, $P_d = 65,6$ МВт, $\cos\varphi = 0,64$ [3].

Следующим этапом развития стал пересмотр принципов построения энерготехнологических режимов, который связан с возрастающей ролью электроплавки в производстве стали массового назначения, в том числе высококачественной стали с использованием первородной шихты – чугуна и металлизированного сырья. Именно на электроплавках шихты из лома и металлизированных окатышей было обнаружено образование пенистого шлака, экранирующего дугу и предохраняющего футеровку от избыточного теплового воздействия. Металлизированные окатыши, содержащие FeO, непрореагировавшие углерод и кислород, а также пустая порода, при расплавлении образуют шлако-металлическую эмульсию пенистого шлака с пузырьками CO.

Под влиянием повсеместного внедрения технологии пенистого шлака принципы выбора электрического режима претерпели коренные изменения. Вместо того чтобы с целью погружения дуг в расплав уменьшать их длину, увеличивая ток и силу давления дуг на поверхность жидкой ванны, повышают уровень расплава и закрывают им длинные дуги, вспенивая шлак. Это позволило по новому подойти к выбору оптимального электрического режима плавки.

Увеличивать электрическую мощность можно как за счёт увеличения тока, так и за счёт повышения напряжения, поскольку мощность пропорциональна произведению этих величин. Оба эти направления тесно связаны с проблемой графитированных электродов, которые являются одним из узких мест, ограничивающих дальнейшее увеличение электрической мощности печей. С увеличением тока возрастает плотность тока в электродах, которая жёстко ограничена во избежание резкого падения их стойкости. Напротив, увеличение электрической мощности печей за счёт повышения максимального вторичного напряжения трансформатора имеет ещё резервы. Ранее это напряжение не превышало 1000 В. В настоящее время успешно работают печи с напряжением 1350 – 1600 В [4].

Повышение напряжения по сравнению с увеличением тока имеет ещё одно важное преимущество. Оно не сопровождается увеличением расхода электродов, который примерно наполовину определяется плотностью тока и повышается пропорционально росту этой величины. Возможности дальнейшего повышения напряжения также ограничены рядом факторов, в том числе, опасностью электрического пробоя запыленного газового пространства между электрододержателями над сводом, а также между электродами и сводом печи.

Технология работы с пенистым шлаком позволяет представить оптимальный электрический режим современной дуговой печи как работу с постоянными электрическими параметрами на протяжении всей плавки. Рабочий режим выбирается в области длинных дуг (слева от максимума мощности дуги), в конце почти прямолинейного участка графика мощности дуги. Этот режим характеризуется большим значением электрического КПД, значениями коэффициента мощности в районе 0,85 – 0,90, минимальными значениями удельного расхода электроэнергии. Такой режим позволяет достичь наибольшей производительности печи при минимальных затратах на выплавку стали. Только в самые первые минуты плавки, пока дуги горят над массой кусков лома, во избежание повреждения свода печи может потребоваться некоторое уменьшение длины дуг за счёт небольшого снижения напряжения и увеличения тока.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Электрические промышленные печи: Дуговые печи и установки специального нагрева: Учебник для вузов / А.Д. Свенчанский, И.Т. Жердев, А.М. Кручинин и др.; Под ред. А.Д. Свенчанского. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 296 с.
2. Марков Н.А. Электрические цепи и режимы дуговых электропечных установок. – М.: Энергия, 1975. – 204 с.
3. Современное состояние и перспективы развития электродуговых печей для выплавки стали / В. Д. Смоляренко, С. Г. Овчинников, Б. П. Черняховский. Сталь, №2, 2005. - С. 47-52.
4. Тулуевский И.Ю. Инновации для дуговых сталеплавильных печей. Научные основы выбора: монография / И.Ю. Тулуевский Ю.Н. Зинуров. - Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2010, Т. 12, - 347 с. Серия монографий «Современные электротехнологии».