

1. Назначение, принцип действия, устройство и режим работы дуговой сталеплавильной печи.

Дуговые сталеплавильные печи (ДСП) предназначены для выплавки специальных и качественных сталей с последующим переделом в прокатных цехах, а также для фасонного литья [1, 2].

Преобразование электрической энергии в тепло в ДСП осуществляется с помощью электрической дуги.

Дуговая сталеплавильная печь (рис. 1) состоит из стального кожуха 1, имеющего цилиндрическую, расширяющуюся или ступенчатую форму. Внутри кожуха располагается огнеупорная футеровка 2. Поверх футерованного кожуха печи расположен свод печи 3, через который пропущены подвижные электроды 4. Для зажигания дуги электроды вначале опускают до соприкосновения с расплавляемым материалом, а затем немного поднимают до возбуждения дуги 6. В процессе плавки электроды перемещают с помощью механизма подъема электродов 5.

Загрузку печи производят через рабочее загрузочное окно 7 или при снятом и отодвинутом своде.

Для выполнения всех технологических операций ДСП снабжена механизмами наклона печи 10, подъема и отвода свода, перемещения электродов 5. Они могут иметь электромеханический или гидравлический привод. Электроды закреплены в специальных электрододержателях 11, связанных с механизмом перемещения электродов. Ток подводят к электрододержателю с помощью пакета медных шин или водоохлаждаемых труб от печного трансформатора. Количество электродов обычно кратно трем, что соответствует числу фаз в питающей сети.

Для выравнивания химического состава и температуры расплавляемого металла в ДСП большой емкости применяют электромагнитное устройство для перемешивания расплава, представляющее собой линейный индуктор с двумя обмотками, питаемый переменным током частотой 0,5...1,5 Гц и создающий бегущее магнитное поле в области расплавленного металла. Возникающие в металле динамические усилия интенсивно перемешивают его.

Сырьем для переработки в ДСП служит металлолом, металлизированные окатыши, железная руда.

Технологический процесс производства стали в ДСП состоит из следующих операций: расплавление скрапа, удаление содержащихся в нем вредных примесей и газов, раскисление металла, введение в него нужных легирующих компонентов, рафинирование, выливание металла в ковш для последующей разливки.

Процесс расплавления скрапа начинается с проплавления электродами колодцев до повышения уровня расплавленного металла в подине. Характерной особенностью периода расплавления является беспокойный режим горения дуги, изменение ее длины при обвалах и перемещениях скрапа от эксплуатационного короткого замыкания (ЭКЗ) до обрыва дуги (ХХ). После расплавления режим горения дуги становится спокойным и стабильным благодаря более высокой температуре и ионизирующим компонентам, образующимся в слое шлака на поверхности расплава.

Длительность процесса расплавления – 1,5...2,5 часа, окисления и рафинирования – 2...4 часа.

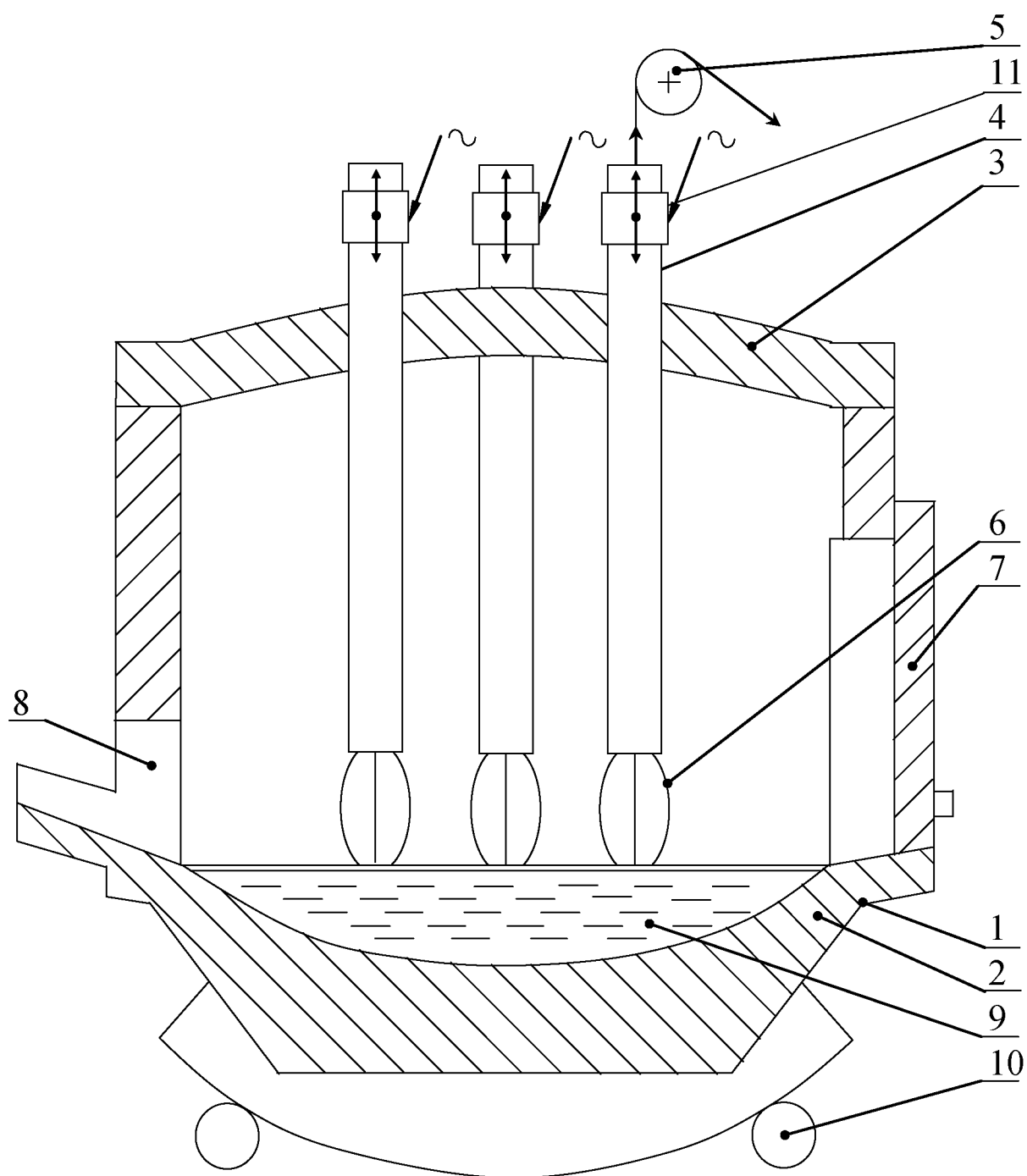


Рис.1 Конструкция дуговой сталеплавильной печи

1-кожух; 2-футеровка; 3-свод; 4-электрод; 5-механизм подъёма электрода; 6-дуга; 7-загрузочное окно; 8-сливное окно; 9-жидкая ванна; 10-механизм наклона; 11-электрододержатель.

2. Электрооборудование и схемы включения ДСП.

Схема электрических соединений ДСП приведена на рис. 2. Напряжение на дугах в ДСП обычно изменяется в пределах от 100 до 500 вольт при токах до нескольких десятков килоампер.

Для передачи электрической энергии при таких параметрах от вторичной обмотки печного трансформатора в рабочее пространство печи служит короткая сеть. Несмотря на небольшую длину короткой сети, ее активное и, особенно, индуктивное сопротивление являются одними из определяющих составных частей общего сопротивления питающей цепи. Они оказывают существенное влияние на энергетические показатели работы печи: мощность, коэффициент мощности, КПД и т. п.

Короткая сеть состоит из следующих участков:

- шинные пакеты (от выводов НН печного трансформатора до неподвижных башмаков);
- гибкая часть (участок гибких кабелей);
- трубошины (от подвижных башмаков до головок электрододержателей);
- электрододержатели и электроды.

Для уменьшения активного сопротивления короткой сети применяется водяное охлаждение. От конструкции короткой сети существенно зависит индуктивное и активное ее сопротивление, симметрия сопротивлений по фазам.

Печной трансформатор (ПТ) 5 (рис. 2) для ДСП небольшой и средней мощности имеет трехфазное исполнение. Для ДСП большой мощности применяется группа однофазных трансформаторов, что позволяет получить более высокий коэффициент мощности и уменьшить несимметрию по фазам за счет более рациональной конструкции короткой сети и регулировать независимо мощности и напряжения каждой фазы. ПТ имеет следующие особенности:

- а) высокое значение номинального тока на стороне низкого напряжения (до десятков и сотен килоампер);
- б) большой коэффициент трансформации (напряжение с 6, 10, 35, 110 кВ трансформируется до нескольких сотен вольт);
- в) число ступеней напряжения и диапазон его регулирования гораздо больше, чем у силовых трансформаторов (напряжение регулируется примерно на 500 процентов при числе ступеней до 40 и более);
- г) трансформаторы имеют высокую стойкость против эксплуатационных коротких замыканий с кратностью тока $(2,5 \dots 3)I_{ном}$, высокую механическую прочность.

Обмотки трехфазных трансформаторов соединяются по схеме “треугольник-треугольник” с возможностью переключения по схеме “треугольник-звезда”, что позволяет регулировать вторичное напряжение.

Регулирование режимов работы печи и ее электрических характеристик осуществляется изменением напряжения за счет изменения числа включенных в сеть витков первичной обмотки трансформатора 6 с помощью переключателя ступеней.

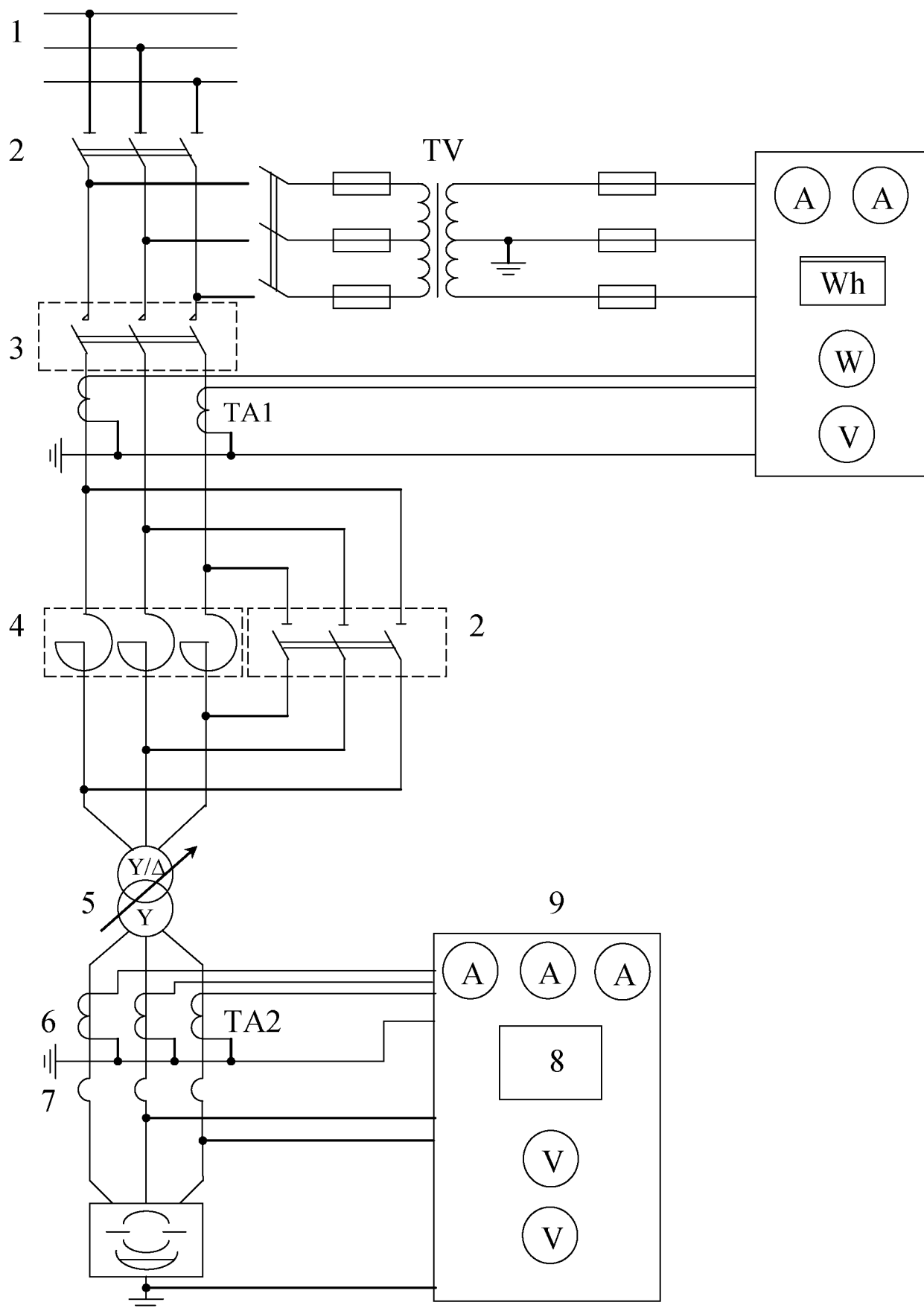


Рис.2 Схема электрических соединений ДСП

1-высоковольтные шины; 2-разъединитель; 3-выключатель; 4-реактор; 5-печной трансформатор; 6-измерительные трансформаторы; 7-короткая сеть; 8-автоматический регулятор мощности; 9-приборы контроля

Для ограничения бросков тока при эксплуатационных коротких замыканиях и стабилизации горения дуг за счет создания падающей вольтамперной характеристики цепи питания служит реактор 4. Режим работы реактора прерывистый, условия его работы тяжелые, поэтому он должен удовлетворять повышенным требованиям термической и механической прочности. Реактор включается между высоковольтным выключателем и линейными зажимами обмотки высокого напряжения ПТ или в "фазу" - последовательно с данной обмоткой. Чаще всего реактор располагают в общем баке с ПТ.

Ограничение тока при ЭКЗ и стабилизация горения дуги нужны только в период расплавления, в процессе восстановления дуга вполне устойчива без дополнительной индуктивности, а толчки тока маловероятны. Поэтому, как правило, параллельно реактору включают разъединитель, с помощью которого шунтируют реактор на период восстановления, что позволяет уменьшить потери мощности в реакторе.

Коммутационная аппаратура дуговой печной установки работает в более тяжелых условиях, чем аппаратура общепромышленных установок. Число отключений печи, в том числе при ЭКЗ доходит до нескольких десятков в сутки. Это ставит в особо тяжелые условия размыкающие контакты и масло выключателей и требует частых ревизий и замен масла.

Для подстанций дуговых печей применяют только многомасляные или воздушные выключатели с воздушным дутьем. Выключатели высокого напряжения обеспечивают включение и отключение ПТ в нормальных режимах, а также автоматическое отключение при длительных эксплуатационных перегрузках и аварийных КЗ (в частности при внутренних повреждениях ПТ).

В цепях питания ДСП применяют выключатели, рассчитанные на частые коммутационные операции: электромагнитные: типов ВЭМ-10К, ВЭМ-10Э, ВЭМ-6КТ, ВЭ-10; вакуумные: ВНВ-10; ВНВП-10; воздушные: ВВ-10П, ВВ-10К, ВВ-10, ВВ-35П, ВВП-35, ВВП-35К, ВВП-110Б и многомасляные выключатели ВМБ-10.

3. Режимы работы ДСП и их регулирование.

Рациональное использование мощности дуг в ДСП во многом определяется правильностью и точностью задания необходимого электрического режима печи, который характеризуется определенными значениями токов, напряжений, сопротивлений и мощностей. Изменение режима печи (регулирование) возможно двумя путями:

- изменением напряжения U_2 во вторичной цепи ПТ путем переключения числа витков первичной обмотки;
- изменением длины дуг за счет перемещения электродов.

Первым способом пользуются лишь несколько раз за плавку, обычно при переходе от одного этапа плавки к другому. Это обусловлено следующими причинами:

- невозможностью обработки динамических возмущений из-за низкой надежности переключателей;
- невозможностью отключения печи при переключении ступеней;

- высокая дискретность ступеней.

Второй способ позволяет регулировать режим ДСП непрерывно и плавно, опуская и поднимая электроды при помощи системы автоматического регулирования, поддерживающей токи дуг печи на заданном уровне. При изменении длин дуг происходит изменение режима работы печи от режима ЭКЗ ($U_d=0$, $I_d=I_k$) до нормального режима ($I_d=I_n$) и далее до режима холостого хода (дуго не горят, $I_d=0$).

Для каждого этапа плавки подбирают величину тока дуги и степень напряжения U_2 (т.е. напряжение на дуге), обеспечивающие наиболее рациональный режим работы (высокая производительность при минимальном расходе электроэнергии).

4. Электрические и рабочие характеристики ДСП.

Наиболее полную картину изменения энергетических параметров ДСП с изменением режима работы можно получить при рассмотрении электрических и рабочих характеристик (рис. 3).

Электрическими характеристиками принято считать зависимости от тока дуги I_2 :

- потребляемой активной мощности $P_{акт}$;
- полезной мощности, выделяемой на дуге, $P_{пол}$;
- мощность электрических потерь $P_{пот}$;
- электрического КПД η ;
- коэффициента мощности печи $\cos\varphi$.

Рабочие характеристики являются зависимостями от тока дуги I_2 :

- производительности печи g , $т/ч$;
- времени расплавления одной тонны стали t , $ч/т$;
- удельного расхода электроэнергии w , $кВт\cdot ч/т$;
- общего КПД печи η .

Как следует из рис. 3, при изменении тока I_2 от нуля при ХХ до $I_2=I_{2к}$ при ЭКЗ величины КПД η и коэффициента мощности ДСП $\cos\varphi$ уменьшаются от значений, близких к единице до $\eta=0$ и $\cos\varphi = \cos\varphi_k$. При этом мощность электрических потерь $P_{пот}$ растет в квадратичной зависимости и при $I_2=I_{2к}$ становится равной активной мощности $P_{акт}$, потребляемой ДСП в целом, поскольку полезная мощность на дуге в режиме ЭКЗ равна нулю. Мощность тепловых потерь $P_{тп}$ обычно принимается постоянной при изменении I_2 .

Кривые $P_{акт}$, $P_{пол}$, g , η имеют максимумы в области регулирования тока дуги. Максимум производительности g соответствует максимуму полезной мощности на дуге $P_{пол}$ при токе I_2'' . Этот режим обеспечивает наибольшую производительность ДСП. Однако максимум КПД η и соответствующий ему минимум удельного расхода электрической энергии w наблюдается при токе $I_2' < I_2''$. Этот режим обеспечивает наиболее экономичную работу ДСП.

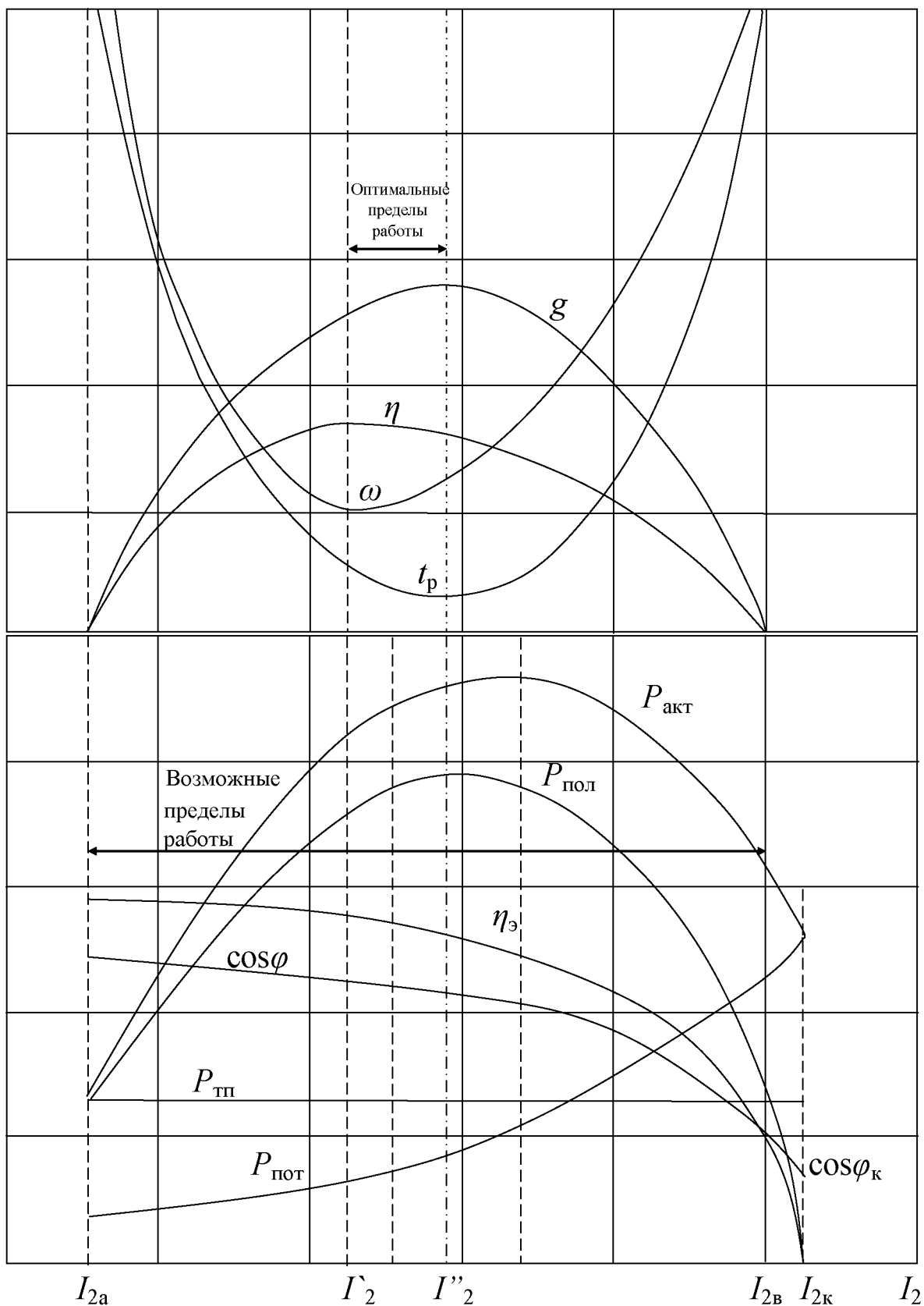


Рис.3 Электрические и рабочие характеристики ДСП.

Величины I'_2 и I''_2 образуют оптимальные пределы работы ДСП. Поскольку мощность тепловых потерь $P_{\text{тп}}$ при работе печи не может превышать мощность на дуге $P_{\text{пол}}$, то возможные пределы работы ДСП ограничиваются токами I_{2a} и I_{2b} , соответствующими пересечению кривой $P_{\text{пол}}$ и прямой $P_{\text{тп}}$. Очевидно, что на границах этого

диапазона величины g и η равны нулю, т.к. вся мощность, выделяемая дугой, расходуется на тепловые потери.

При дефиците электрической энергии целесообразно выбрать режим $I_2 = I_2'$, а при необходимости максимальной выработки - режим $I_2 = I_2''$.

В нормальных условиях работы оптимальным следует признать такой режим, при котором себестоимость производимого металла Z минимальна.

$$Z = A + B/g + Cw,$$

где: A - постоянная составляющая, не зависящая от тока (стоимость шихты, флюсов и т.п.);

B - величина, зависящая от производительности (зарплата и т.д.);

C - величина, зависящая от тока (стоимость электроэнергии).

5. Порядок выполнения расчетно-графической работы.

5. 1. На основании исходных данных (прил. 1) составляют однолинейную схему питания ДСП (рис. 4) и схему замещения (рис. 5), где должны быть учтены:

- активное $R_{кк}$ и реактивное $X_{кк}$ сопротивления короткой сети;
- активное $R_{пт}$ и реактивное $X_{пт}$ сопротивления ПТ;
- индуктивное сопротивление токоограничивающего реактора X_p ;
- индуктивное сопротивление $X_{вл}$ воздушной линии (ВЛ), по которой осуществляется питание от шин районной подстанции или заводской ТЭЦ (A) до шин распределительного пункта (B), к которому подключен печной трансформатор;
- индуктивное сопротивление системы X_c на шинах подстанции A .

Активными сопротивлениями реактора, воздушной линии, системы, влиянием тока намагничивания ПТ для упрощения расчета можно пренебречь.

Сопротивления элементов первичной цепи ПТ (реактор, воздушная линия, система) должны быть представлены в схеме замещения в виде, приведенном ко вторичному напряжению $U_{2ф}$ (X_p' , $X_{вл}'$, X_c'). Сопротивление дуги принимают чисто активным и линейным, величина его зависит от длины дуги при заданных остальных параметрах схемы, поэтому в схеме замещения оно должно быть представлено переменным активным сопротивлением, изменяющимся от $R_d=0$ при ЭКЗ до $R_d=\infty$ при ХХ.

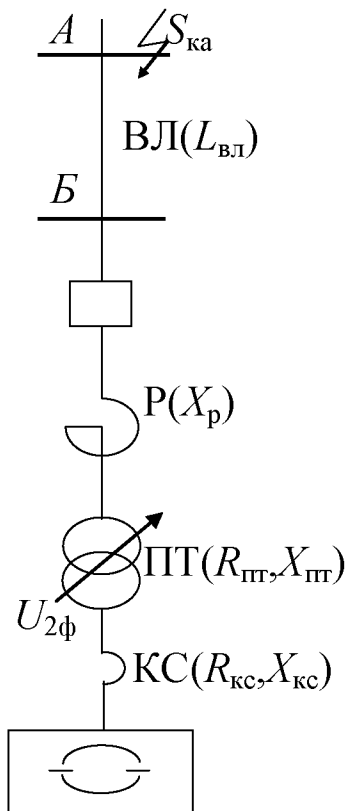


Рис.4

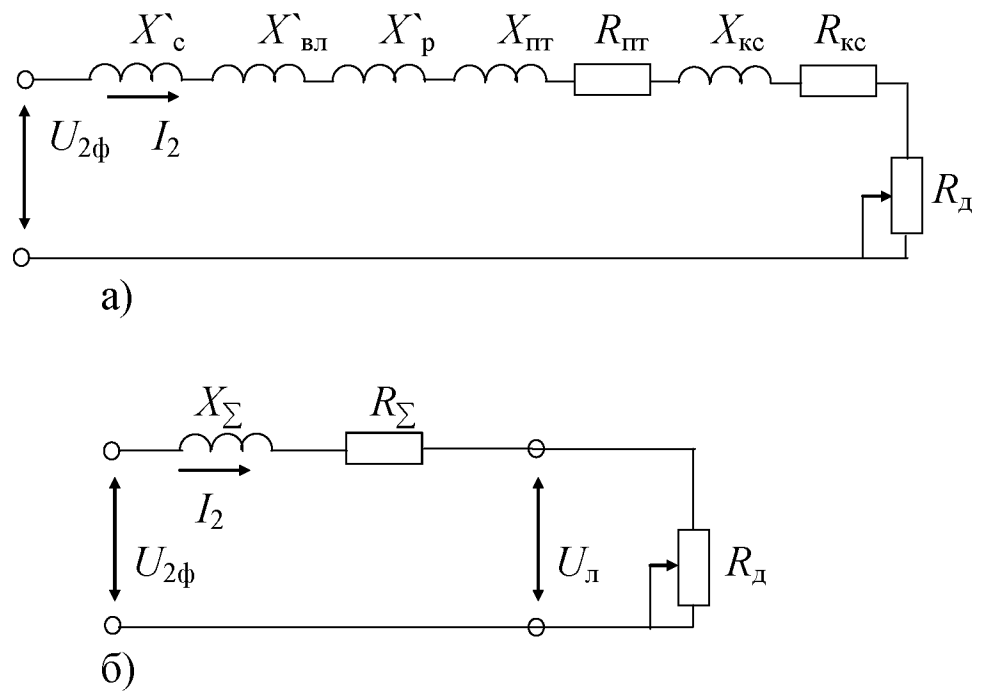


Рис.5

5. 2. Определение параметров схемы замещения.

5. 2. 1. Индуктивные сопротивления системы X_c и ВЛ $X_{ВЛ}$:

$$X_c = \frac{U_c^2}{S_{ка}}, \text{ Ом}; \quad (1)$$

$$X_{ВЛ} = X_{уд} L_{ВЛ}, \text{ Ом}, \quad (2)$$

где $X_{уд}$ - удельное сопротивление ВЛ, Ом/км.

После приведения ко вторичному напряжению $U_{2ф}$:

$$X'_c = X_c / k_{тр}^2; X'_{ВЛ} = X_{ВЛ} / k_{тр}^2, \quad (3)$$

где $k_{тр} = \frac{U_c}{\sqrt{3}U_{2ф}}$ - коэффициент трансформации ПТ.

5. 2. 2. Индуктивное сопротивление реактора определяется из условия необходимости ограничения тока ЭКЗ. Расчет тока ЭКЗ ($I_{2к}$) проводят при $R_д=0$.

$$I_{2к} = \frac{U_{2ф}}{\sqrt{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2}}, \text{ А}, \quad (4)$$

$$\text{где } R_\Sigma = R_{КС} + R_{ПТ}, \text{ Ом}, \quad X_\Sigma = X'_c + X'_{ВЛ} + X'_p + X_{ПТ} + X_{пс}, \text{ Ом}. \quad (5)$$

Первоначально определяют ток $I_{2к}$ без реактора, подставляя в (5) значение сопротивления реактора $X'_p = 0$. Если толчки тока при ЭКЗ не превышают допустимую величину $I_{2кдоп} = 2,5 I_{ном}$, где $I_{ном} = S_{ПТ} / 3U_{2ф}$ - номинальный ток ПТ, то реактор

не ставится, а полученные значения X и $I_{2к}$ используют для дальнейшего расчёта.

Если $I_{2к} > I_{2кдоп}$, то расчетное индуктивное сопротивление реактора, приведенное к $U_{2ф}$, определяют из условия ограничения тока ЭКЗ до величины $I_{2кдоп}$,

$$X'_{p.рас} = \sqrt{\frac{U_{2ф}^2}{I_{2кдоп}^2} - R_{\Sigma}^2} - X_{\Sigma}, \text{ Ом.} \quad (6)$$

Для выбора реактора следует определить его расчетное сопротивление применительно к цепи ВН:

$$X_{p.рас} = X'_p k_{тр}^2, \text{ Ом, или } X_{p.рас\%} = \frac{\sqrt{3} I_{нр}}{U_{нр}} 100, \%, \quad (7)$$

где $I_{нр}$, $U_{нр}$ - номинальные ток и напряжение реактора.

По справочным данным [3] выбирают реактор или несколько реакторов, имеющих в сумме сопротивление X_p $X_{p.рас}$, после чего приводят его ко вторичному напряжению ПТ:

$$X'_p = X_p / k_{пт}^2. \quad (8)$$

Подставляя полученное значение X'_p в (5) уточняют суммарное приведённое индуктивное сопротивление X , после чего окончательно определяют ток ЭКЗ, используя выражение (4). Величина $I_{2к}$ не должна превышать $I_{2кдоп}$. Полученные значения X и $I_{2к}$ используют для дальнейшего расчёта электрических характеристик ДСП.

5. 3. Определение величины колебаний напряжения на шинах, питающих подстанций и распределительных устройств.

Если пренебречь активными сопротивлениями в системе электроснабжения ДСП, то величина колебаний напряжения в i -й точке:

$$\delta U_i \% = \frac{S_{пт}}{S_{ки}} 100, \%, \quad (9)$$

где $S_{ки}$, - мощность короткого замыкания в i -й точке, для которой определяется $\delta U_i\%$.

Для шин подстанции A

$$\delta U_A \% = \frac{S_{пт}}{S_{кА}} 100, \%, \quad (10)$$

Для шин распределительного пункта B

$$\delta U_B \% = \frac{S_{пт}}{S_{кБ}} 100, \%, \quad (11)$$

где $S_{кБ} = \frac{S_{кА}}{1 + X_{вл} / X_c}.$

Согласно ПУЭ, колебания напряжения $\delta U > 4\%$ допускаются при частоте колебаний не более одного в час, $\delta U\% = 1.5 \dots 4\%$ допускаются не более 10 колебаний в час. В остальных случаях $\delta U\%$ должна быть менее 1.5%. Для ДСП частота колебаний достигает нескольких в секунду, поэтому величина $\delta U\%$ не должна превышать 1.5%.

Если $\delta U\% > 1.5\%$, то должны быть перечислены мероприятия, приводящие к сни-

жению колебаний напряжения, к которым относятся:

- подключение синхронного компенсатора к шинам РУ;
- подключение синхронного компенсатора к шинам РУ в сочетании с буферным реактором, включенным в цепь питания РУ;
- применение дополнительного реактирования как сдвоенным, так и одинарным реакторами;
- применение повышенного напряжения питания ПТ;
- разделение шин питания ДСП и остальной нагрузки;
- применение глубокого ввода для индивидуального питания ДСП;
- перенос точки подключения ДСП в центр питания с большим значением мощности короткого замыкания;
- применение продольной емкостной компенсации на ВЛ.

5. 4. Построение электрических и рабочих характеристик ДСП.

Расчет электрических характеристик проводят с помощью выражений:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{пол}} &= 3I_2(\sqrt{U_{2\phi}^2 - (I_2 X_{\Sigma p})^2} - I_2 R_{\Sigma}), \quad Bm; \\
 P_{\text{пол}} &= 3I_2^2 R_{\Sigma}, \quad Bm; \quad P_{\text{акт}} = P_{\text{пол}} + P_{\text{пот}}, \quad Bm; \quad (12) \\
 \eta_3 &= \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{акт}}}; \quad \cos \varphi = \frac{P_{\text{акт}}}{3U_{2\phi} I_2}.
 \end{aligned}$$

Расчет проводят для нескольких значений I_2 в диапазоне от нуля до $I_{2к}$ (обычно 10 значений от $I_2=0.1I_{2к}$ до $I_2=I_{2к}$). После расчета электрических характеристик определяют мощность тепловых потерь ДСП $P_{\text{тп}}=0.03P_{\text{пол.макс}}$, где $P_{\text{пол.макс}}$ - максимальная мощность на дуге в диапазоне $0 < I_2 < I_{2к}$. Мощность тепловых потерь $P_{\text{тп}}$ принимают постоянной во всём диапазоне изменения I_2 .

Рабочие характеристики рассчитывают аналогично с помощью выражений

$$\begin{aligned}
 g &= \frac{P_{\text{пол}} - P_{\text{т.п.}}}{W_{\text{теор}}}, \quad m/\text{ч}; \quad t = \frac{1}{g}, \quad \text{ч}/m; \\
 W_{\phi} &= \frac{P_{\text{акт}}}{g}, \quad \text{кВт} \cdot \text{ч}/m; \quad \eta = \eta_3 \eta_t = \frac{W_{\text{теор}}}{W_{\phi}}. \quad (13)
 \end{aligned}$$

Результаты расчетов электрических и рабочих характеристик представляют в табличном (таблица 1) и графическом виде (аналогично рис. 3).

Таблица 1

I_2 , кА	$P_{\text{пол}}$, кВт	$P_{\text{пот}}$, кВт	$P_{\text{акт}}$, кВт	$\eta_{\text{э}}$	$\cos \varphi$	g , т/ч	t , ч/т	$\omega_{\text{ф}}$, кВт·ч	η
0,1 $I_{2\text{к}}$									
0,2 $I_{2\text{к}}$									
0,3 $I_{2\text{к}}$									
0,4 $I_{2\text{к}}$									
0,5 $I_{2\text{к}}$									
0,6 $I_{2\text{к}}$									
0,7 $I_{2\text{к}}$									
0,8 $I_{2\text{к}}$									
0,9 $I_{2\text{к}}$									
$I_{2\text{к}}$									

Графики должны быть построены в соответствии с ГОСТ в координатной сетке, иметь несколько осей ординат с указанием шкал для всех изображенных зависимостей. Координатная сетка строится через равные, округленные значения величин. На графиках обязательно показывают точки, по которым эти графики построены. По оси абсцисс допустимо указывать относительные величины $I_2/I_{2\text{к}}$ в диапазоне от нуля до 1.

5.5. Определение оптимальных пределов работы.

На основании анализа полученных данных определяют

- наиболее экономичный режим работы ДСП;
- наиболее производительный режим работы ДСП.

Соответствующие этим режимам токи I_2 приводят в выводах по работе и делают заключение об оптимальных пределах работы ДСП.

Литература:

1. Свенчанский А. Д. и др. Электрические промышленные печи. Часть 2. Дуговые печи и установки специального нагрева. М. Энергоиздат, 1981.
2. Электрическое оборудование. Справочник. Под общей ред. А.П. Альтгаузена М. Энергия, 1980.
3. Неклепаев Б. Н., Крючков И. П. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования. М. Энергоатомиздат, 1989.
4. Болотов А. В., Шепель Г. А. Электротехнологические установки. М. Высшая школа, 1988.
5. Свенчанский А. Д. и др. Электроснабжение и автоматизация электро-термических установок: Учебник для техникумов. М. Энергия, 1980.

Приложение 1. Исходные данные для расчета

Цифра шифра	Варианты	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Первая	Мощность короткого замыкания системы $S_{КА}$, МВА	200	2000	300	900	1400	2000	600	600	1800	3000
	Напряжение системы U_C , кВ	6	6	10	10	10	35	35	35	110	110
	Мощность печного трансформатора $S_{ПТ}$, МВА	1,0	1,8	2,8	5,0	9,0	16,0	20,0	25,0	32,0	45,0
	Длина линии электропередачи L , км	1	2	3	4	5	5	6	6	8	8
	Напряжение высшей ступени печного трансформатора $U_{2ф}$, В	225	250	260	280	320	380	430	480	480	590
Вторая	Активное сопротивление трансформатора $R_{ПТ}$, 10^{-4} Ом	6	9	12	7	10	4	8	2	6	8
	Реактивное сопротивление трансформатора $X_{ПТ}$, 10^{-4} Ом	32	43	58	41	62	24	45	14	26	48
	Активное сопротивление короткой сети $R_{КС}$, 10^{-4} Ом	12	18	20	16	22	10	24	8	15	18
	Реактивное сопротивление короткой сети $X_{КС}$, 10^{-4} Ом	44	44	48	48	48	36	48	30	30	36
	Количество электроэнергии, необходимое для расплавления 1 т стали, $W_{теор}$, кВт·ч/т	320	310	290	300	310	320	330	340	350	320