

УКД. 621.365.2.001.24

## СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЖИМА ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ ПРИ ИЗМЕНЕНИЯХ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ СЕТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

РАХМАНОВ Р.Н.

*АзНИИ Энергетики и Энергопроектирования*

Приводятся результаты регрессионного моделирования активной мощности ДСП и оценивается величина воздействия каждого параметра схемы и режима электрической сети на эту мощность методом планирования эксперимента.

### **Введение.**

Современные электродуговые сталеплавильные печи (ДСП) являются самыми мощными потребителями электроэнергии, процессы в которых сопровождаются заметными искажениями параметров режима, как в сети электроснабжения, так и в питающей энергосистеме. Такие искажения в основном проявляются в виде нарушения синусоидальности и симметрии напряжений и токов. С другой стороны, важным является также, чтобы забираемая из сети электроэнергия в самой печи была использована эффективно.

В реальных условиях эксплуатации из-за существующей неопределенности и зависимости энергетических процессов в печи от многих случайных факторов не удается получить достаточно полной корректной модели, описывающей электрические режимы в печи и в системе ее электроснабжения. Поэтому в настоящее время для определения эффективных режимов работы печи, системы ее электроснабжения и условий их ограниченного воздействия на питающую энергосистему проводятся специальные натурные эксперименты—опыты эксплуатационного короткого замыкания и опыты в рабочих режимах печи [1,2]. Необходимость в проведении таких экспериментов всегда возникает при изменениях в схеме—замене печного трансформатора, реактора и реконструкции короткой сети, а также изменениях в технологическом цикле плавки. Однако ограниченность количества экспериментов для всех возможных случаев параметров схемы требует проведения многочисленных расчетов.

Корректность и обоснованность результатов этих расчетов могут быть достигнуты на основе применения математических моделей, описывающих режим печи с учетом всех возможных состояний схемы сети электроснабжения.

В работе приводятся результаты моделирования активной мощности в печи при вариации параметров схемы и режима электрической цепи методом планирования эксперимента. В качестве примера рассматривается схема электроснабжения 50 т печи BSC, параметры которой приведены в [3]. Установлены приоритеты значимости влияния изменения параметров отдельных элементов электрической цепи — сопротивлений трансформатора, реактора, короткой сети на величину изменения активной мощности.

**Моделирование электрической мощности ДСП при фиксированных параметрах схемы и режима сети.** В качестве типовой схемы исследования рассматривается схема электроснабжения ДСП Бакинской сталеплавильной компании (BSC) [3]. Эквивалентная схема электрической цепи ДСП показана на Рис.1.

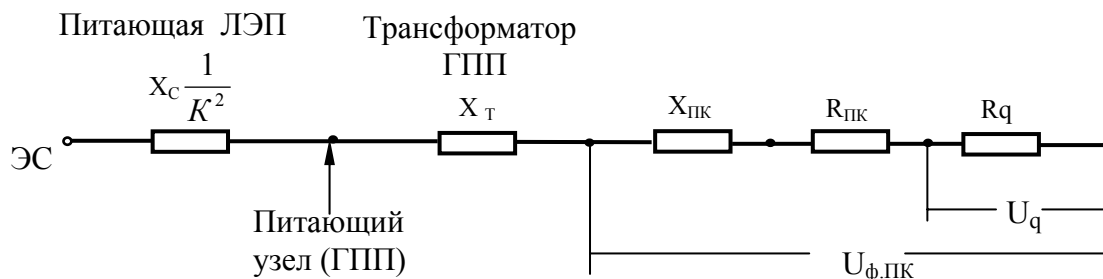


Рис.1 Эквивалентная схема для одной фазы симметричной электрической цепи

В схеме замещения активное  $R_{ПК}$  и реактивное  $X_{ПК}$  сопротивления печного контура включают в себя сопротивление печного трансформатора  $Z_{ПТ} = R_{ПТ} + jZ_{ПТ}$ , сопротивление реактора  $X_R$  (активным сопротивлением пренебрегается), а также сопротивление короткой сети  $Z_{К.С.} = R_{К.С.} + jZ_{К.С.}$ . Параметры трансформатора и реактора на разных ступенях регулирования приводятся в таблицах 1 и 2 соответственно.

Параметры печного трансформатора при изменении положения регулятора напряжения.

Таблица 1.

Тар No.	$U_s$ (V)	$I_p$ (A)	$I_s$ (kA)	$S$ (MVA)	$Z$ (%)
01	195	124.0/148.8	22.2/26.6	7.5/9.0	20.24
02	210	133.0/135.6		8.1/9.7	18.55
03	225	143.0/171.6		8.7/10.4	16.87
04	240	152.0/182.4		9.2/11.1	15.67
05	256	162.5/195.0		9.9/11.8	14.27
06	270	171.0/205.2		10.4/12.4	13.26
07	284	180.5/216.6		10.9/13.1	12.23
08	301	191.0/229.2		11.6/13.9	11.26
09	315	200.0/240.0		12.1/14.6	10.53
10	327	207.5/249.0		12.6/15.1	9.79
11	342	217.0/260.4		13.2/15.8	9.17
12	358	227.0/272.4		13.8/16.5	8.56
13	376	238.5/286.2		14.5/17.4	7.92
14	390	247.5/297.0		15.0/18.0	7.56
15	405	247.5/297.0	21.4/25.7		6.92
16	420	247.5/297.0	20.6/24.8		6.27

## Параметры реактора

Таблица 2.

Tap No.	S (KVAr)	Z (%)	X(Ω)
0			0
1 (36%)	1083	7.22	5.9
2 (60%)	1785	11.90	9.7
3 (80%)	2376	15.84	12.9
4 (100%)	2978	19.85	16.2

Как видно из таблицы 1, максимальное и минимальное значения вторичного напряжения печного трансформатора при первичном напряжении 35 кВ составляет –  $U_{2\phi\min} = 195$  В и  $U_{2\phi\max} = 420$  В, что соответствует первому и шестнадцатому положению переключающего устройства или сопротивлению трансформатора  $Z_{ПТ\min} = 20,24$  % и  $Z_{ПТ\max} = 6,27$  %. Аналогично, из таблицы 2 минимальное сопротивление реактора  $X_{R\min} = 0$  (реактор отключен), максимальное (реактор полностью включен 19,85 % (16,2 Ом)). 1% изменения сопротивления реактора соответствует 0,82 Ом.

Расчетные значения активного и реактивного сопротивлений короткой сети (вторичный токопровод) оцениваются на основе измерений напряжений, токов и мощностей в опытах эксплуатационных коротких замыканий. В таблице 3 приводятся данные этих опытов для различных положений переключающего устройства печного трансформатора.

Таким образом, эквивалентное сопротивление электрической цепи ДСП можно будет определить по значениям  $Z_{ПТ}$ ,  $X_R$ ,  $Z_{К.С.}$

$$Z_{ЭКВ} = R_{ЭКВ} + j X_{ЭКВ} = (R_{ПТ} + R_{К.С.}) + j (X_{ПТ} + X_R + X_{К.С.})$$

Активное сопротивление дуги  $R_q$  для каждого фиксированного положения трансформатора, реактора и положения электродов также определяются замерами тока и напряжения цепи из решения уравнения

$$I_{\phi} = \frac{U}{\sqrt{(R_q + R_{ЭКВ})^2 + X_{ЭКВ}^2}} \quad (1)$$

Активная мощность цепи состоит из мощности дуги и активных потерь в подводящей сети

$$P = I^2 R_q + I^2 R_{ЭКВ} \quad (2)$$

или

$$P = U^2 R'_{ЭКВ} / (R_{ЭКВ}'^2 + X_{ЭКВ}^2) \quad (3)$$

где

$$R'_{ЭКВ} = R_{ЭКВ} + R_q$$

Максимальное значение активной мощности цепи  $P$  достигается при  $R'_{ЭКВ} = X_{ЭКВ}$

$$P_{\max} = \frac{U^2}{2X_{ЭКВ}} \quad (4)$$

Ток в цепи при максимальной мощности

$$I_{P_{\max}} = U / \sqrt{2} X \quad (5)$$

Мощность электрической дуги (полезная мощность сети) на фазу определяется

$$P_q = I^2 R_q = UI \left( \sqrt{1 - (IX_{ЭКВ}/U)^2} - I R_{ЭКВ}/U \right) \quad (6)$$

Максимальное значение полезной мощности будет иметь место при сопротивлении дуги, значение которого можно определить из условия:

$$\frac{dP_q}{dR_q} = \frac{U^2 \left[ (R_{\text{ЭКВ}} + R_q)^2 + X_{\text{ЭКВ}}^2 - 2R_q(R_{\text{ЭКВ}} + R_q) \right]}{\left[ (R_{\text{ЭКВ}} + R_q)^2 + X_{\text{ЭКВ}}^2 \right]} = 0 \quad (7)$$

откуда

$$R_q = \sqrt{R_{\text{ЭКВ}}^2 + X_{\text{ЭКВ}}^2}$$

Следовательно, максимальная мощность дуги будет

$$P_{q \max} = I^2 R_q = \frac{U^2 R_q}{(R_{\text{ЭКВ}} + R_q)^2 + X_{\text{ЭКВ}}^2} = \frac{U^2}{2(R_q + R_{\text{ЭКВ}})} = \frac{U^2}{2R'_{\text{ЭКВ}}} \quad (8)$$

Ток и напряжение, при максимальной полезной мощности дуги будет:

$$U_{q \max} = \frac{U}{\sqrt{2 \left( 1 + \frac{R_{\text{ЭКВ}}}{Z_{\text{ЭКВ}}} \right)}} \quad (9)$$

$$I_{q \max} = U_{q \max} / R_q$$

Реактивная мощность в электрической цепи при максимуме активной мощности, вводимой в печь, можно вычислить как

$$Q = I_{q \max}^2 X_{\text{ЭКВ}} \quad (10)$$

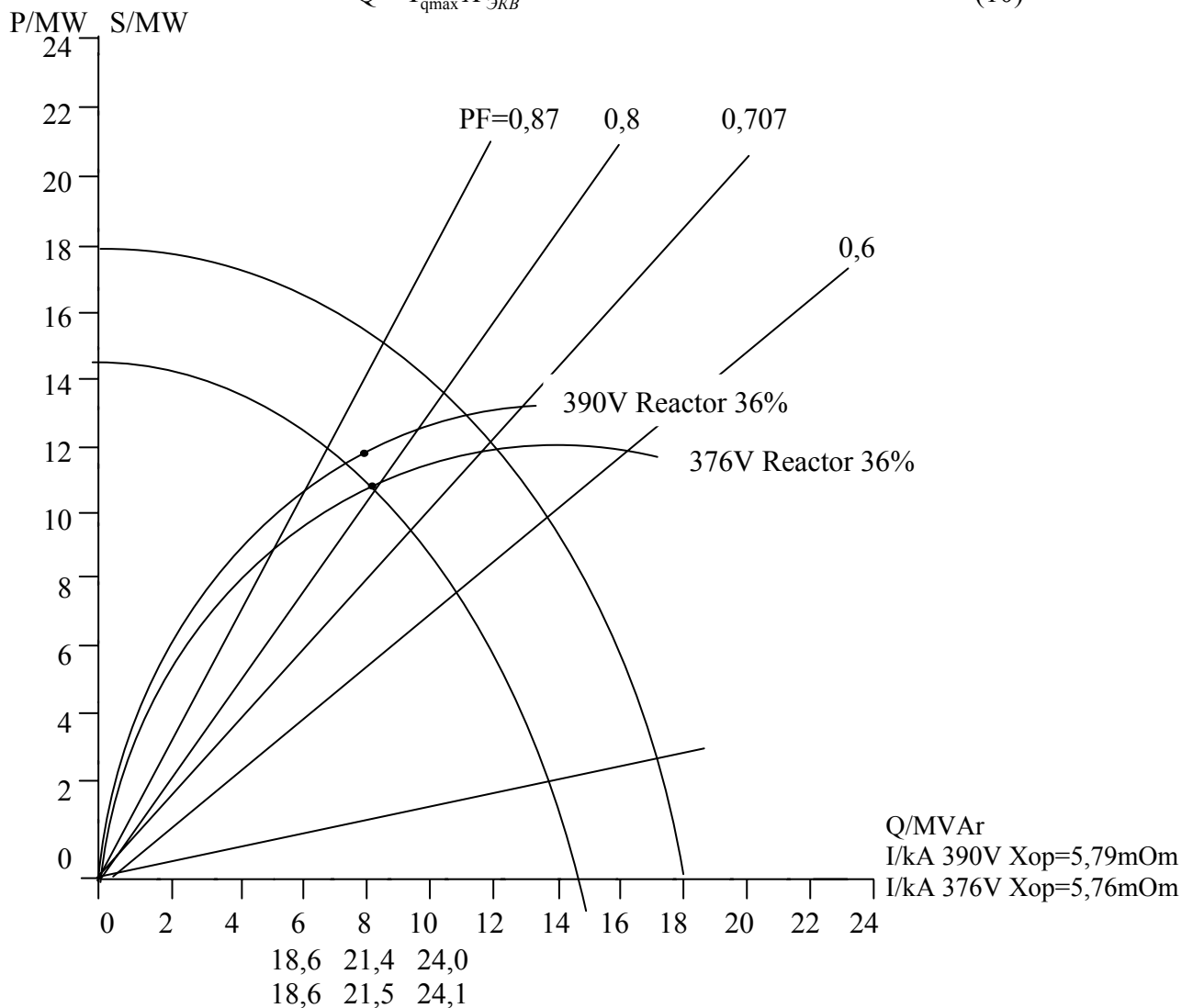


Рис.2. Диаграмма мощностей электрической цепи печи.



План эксперимента приведён в таблице 4, где +1 и -1 соответствуют заданным максимальным и минимальным значениям факторов (параметров схемы и режима сети ДСП). В соответствии с таблицей составлена система линейных уравнений 7-го порядка, аналогичных (6):

$$P_i = U_i I_i \left\{ \sqrt{1 - [I_i (X_{\text{ПТ}} + X_R + X_{\text{К.С.}}) / U_i]^2} - I_i (R_{\text{ПТ}} + R_{\text{К.С.}} + R_q) / U_i \right\} \quad (11)$$

На основе решения системы линейного уравнения (11), соответствующих данным таблицы 4., получена следующая регрессионная зависимость мощности на дуге от всей совокупности параметров схемы и режима электрической цепи ДСП:

$$P_q = 2,889 - 0,862x_1 - 0,205x_2 + 0,943x_3 - 1,068x_4 - 1,166x_5 + 2,824x_6 + 3,267x_7;$$

где  $x_1 = Z_{\text{ТР}}$  - относительное значение полного сопротивления печного трансформатора;

$x_2 = x_R$  - реактанс реактора;

$x_3 = x_{\text{к.с.}}$  - реактанс короткой сети;

$x_4 = I_P$  - относительное значение тока в питающей электрической сети;

$x_5 = Z_P$  - полное сопротивление цепи (реактор, трансформатор, короткая сеть);

$x_6 = U_{\text{к.с.}}$  - относительное значение напряжения во вторичной цепи (короткая сеть);

$x_7 = U_q$  - относительное значение напряжения на дуге.

Ранжировка факторов по степени влияния на величину мощности, вводимой в печь. С целью определения стратегии управления мощностью печи на разных фазах плавки получены оценки коэффициентов чувствительности

$$K_i = \frac{\Delta P_q}{x_{in}} = \frac{2b_i}{x_{in}}$$

где  $\Delta P_q = \frac{\partial P_q}{\partial x_i}$  - изменение мощности на дуге,

$x_{in}$  - значение параметра в номинальном режиме.

При этом получены следующие результаты

$$K_1 = -\frac{1,724}{18,0} = -0,0958; \quad K_3 = \frac{1,886}{9,748} = 0,1935;$$

$$K_2 = -\frac{0,41}{16,2} = -0,0253; \quad K_6 = -\frac{5,648}{242,7} = -0,0233;$$

$$K_5 = -\frac{2,332}{68,037} = -0,0342; \quad K_7 = \frac{6,534}{198,9} = 0,0328;$$

$$K_4 = -\frac{2,136}{297} = -0,0072;$$

В соответствии с полученными коэффициентами устанавливается, что поддержание мощности в печи может быть достигнуто путем изменения электрических параметров системы электроснабжения в следующем приоритетном порядке:

$$x_{\text{к.с.}} - Z_t - Z_P - U_q - x_R - U_S - I_P$$

Как видно, при фиксированных положениях регулирующего устройства печного трансформатора и реактора реактанс короткой сети (с учетом реактанса печи) является существенным фактором, определяющим мощность печи. Следующим важным фактором, влияющим на изменение мощности печи, является мощность печного трансформатора, регулируемого путем переключения положений регулятора напряжения, с помощью которого вторичное напряжение может изменяться в интервале 195 – 420 В.

Другие факторы - положение реактора и режимные параметры (величина тока и напряжения) во вторичной цепи оказывают значительно меньшее влияние на мощность в печи.

### **Заклучение.**

1. Предлагается метод статистического моделирования зависимости активной мощности, вводимой в дуговую сталеплавильную печь от параметров схемы и режима печи электроснабжения, обеспечивающий выбор оптимальности регулирования мощности.
2. Получены оценки коэффициентов чувствительности величины мощности в схеме от вариации изменений параметров печного трансформатора, реактора и короткой сети с учетом активного сопротивления дуги, позволяющие установить приоритеты для управления мощностью на разных фазах плавки.
3. Расчетно-экспериментальным путем для дуговой сталеплавильной печи (ДСП Бакинской сталелитейной компании) средней мощности (50 т на плавку) построены диаграммы мощностей электрической цепи ДСП.

1. *Трайвас В.Г.* Определение электрических параметров дуговой сталеплавильной печи из опыта полного короткого замыкания.// *Электричество*.- 1974, - № 7.
2. *Марков Н.А.* Электрические цепи и режимы дуговых электропечных установок. М.: Энергия, 1976, с.204.
3. *Мамедяров О.С., Рахманов Н.Р.* Особенности схемы и режимов сети электроснабжения сталеплавильного производства в Азербайджане.// *Проблемы энергетики*.- 2001.- № 4.- с.124-128.
4. *Алексеев С.В., Трайвас В.Г.* Статистические характеристики токов дуг дуговых сталеплавильных печей.// *Изв. вузов. Электромеханика*"- 1971.- № 1.

## **QÖVS POLADƏRİTMƏ SOBALARININ ELEKTRİK TƏCHİZATI SXEMİNİN DƏYİŞMİŞ PARAMETRLƏRİNİN ELEKTRİK REJİMİNİN STATİSTİK MODELƏŞDİRİLMƏSİ**

**RƏHMANOV R.N.**

Qövs poladəritmə sobalarının aktiv gücünün regression modelləşdirilməsinin nəticələri verilir, həmçinin eksperimentin planlaşdırılması metodu ilə sxemin hər bir parametrinin qiyməti və elektrik şəbəkəsinin rejiminin həmin gücə təsiri qiymətləndirilir.

## **STATISTICAL MODELLING OF THE ARC FURNACE OPERATION CONDITIONS UNDER SUPPLY ELECTRIC NETWORK PARAMETERS VARIATION**

**RAHMANOV R.N.**

Using Design experience approach arc furnace active power regression modeling and estimation of impact values on arc power of supply electric network and operation conditions parameters are shown.