

А.Н. Черненко, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехника»

В.В. Вахнина, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Электроснабжение и электротехника»

С.Г. Мартынова, магистрант кафедры «Электроснабжение и электротехника»
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь; гармонические составляющие напряжения; электрическая дуга.

Аннотация: В статье показано, что для создания модели электрической дуги целесообразно использовать методы исследования электрической дуги с изменением ее параметров во времени. Проведено сравнение четырех моделей вольт-амперной характеристики дуги переменного тока в дуговой сталеплавильной печи, которое показало, что три из четырех моделей не позволяют получать достоверный спектр высших гармоник тока и напряжения, генерируемых дуговыми электропечами. Они не отображают инерционность тепловых процессов в период зажигания и погасания дуги, в результате чего кривые тока и напряжения дуги в этих моделях отличаются от осциллограмм реальных печных дуг. Для сравнения результатов моделирования вольт-амперных характеристик дуги между собой и с результатами экспериментальных исследований в Matlab (Simulink) была создана модель одной фазы системы электроснабжения с дуговой сталеплавильной электропечью. При расчетах уровней высших гармоник тока и напряжения использовались параметры схем замещения печного трансформатора и короткой сети для печи ДСП-100НЗА с печным трансформатором мощностью 50 МВА. Получены графики напряжения на дуге, напряжения на шинах низкого напряжения печного трансформатора и тока дуги для каждой модели вольт-амперной характеристики. Показано, что наибольшее совпадение результатов гармонического анализа токов и напряжений с экспериментальными данными наблюдается для модели ВАХ, которая учитывает инерционность тепловых процессов в дуге и на электродах.

ВВЕДЕНИЕ

Электрическая дуга переменного тока является нелинейной изменяющейся во времени электрической нагрузкой, оказывающей сильное негативное влияние на качество электроэнергии в системе электроснабжения (СЭС). Дуговые сталеплавильные печи (ДСП) вызывают в СЭС искажение синусоидальности кривой напряжения, несимметрию напряжений и колебания напряжения.

В работах [1; 2] был разработан метод спектрально-анализа на основе систем нелинейных дифференциальных уравнений. Эти уравнения выражают соотношение между радиусом и током дуги. Из-за необходимости использования параметров, получаемых экспериментальным путем, данный метод не получил широкого распространения. В работе Свенчанского и Цуканова [3] предпринята попытка обобщения характеристик ДСП в период расплавления. Показано, что параметры электрического режима и сама ВАХ дуги изменяются во времени по закону, близкому к нормальному закону распределения плотностей вероятности. Поэтому при анализе моделей электрической дуги были использованы параметры типичной динамической ВАХ математических ожиданий тока и напряжения дуги.

Целью работы является выбор наиболее адекватной математической модели динамической ВАХ дуги для расчетов уровней высших гармоник напряжения, генерируемых в электрическую сеть дуговой электропечью. Критерием адекватности математической модели для расчета высших гармоник будем считать наилучшее совпадение расчетных результатов с экспериментальными, полученными на действующих ДСП.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 1 приведена динамическая вольт-амперная характеристика (ВАХ) дуги переменного тока в ДСП в начале периода расплавления [4; 5].

Как видно из рис. 1, ВАХ электрической дуги можно разделить на три характерных периода. Первому периоду (участки $0A$ и $0A'$) соответствует стадия нарастания тока дуги, второму (AB и $A'B'$) – устойчивого горения, третьему ($B0$ и $B'0$) – снижения тока. Следует отметить, что данная ВАХ соответствует установившемуся режиму горения.

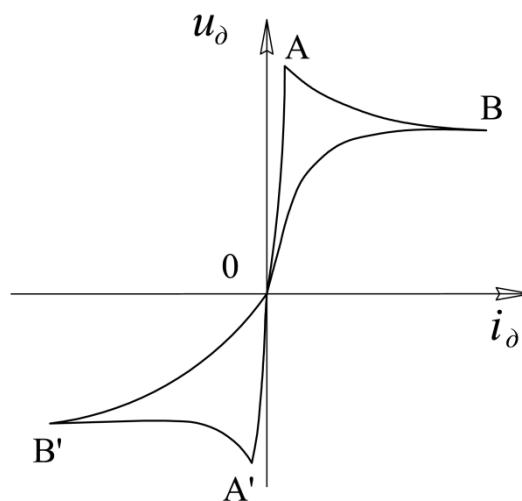


Рис. 1. Динамическая ВАХ дуги переменного тока в дуговой печи в начале периода расплавления

Для расчетов уровней высших гармоник напряжения и тока, генерируемых в электрическую сеть дуговой электропечью, необходима математическая модель динамической ВАХ дуги. Критерием наилучшей пригодности математической модели для расчета высших гармоник будем считать наилучшее совпадение расчетных

результатов с экспериментальными, полученными на действующих ДСП. Для определения пригодности проведем анализ четырех основных используемых в расчетах моделей.

Модель № 1. Наиболее упрощенной является модель дуги, ВАХ которой представляется функцией:

$$u = \text{sign}(i) \cdot \left[u_{\text{гаши}} + \frac{C}{D + |i|} \right],$$

где C и D – коэффициенты, полученные из экспериментальной ВАХ дуги,

$u_{\text{гаши}}$ – напряжение гашения дуги.

Данная функция позволяет аппроксимировать ВАХ дуги без учета характерных особенностей в периодах ее горения [6; 7]. То есть данная модель является сильно упрощенной, не содержит зависимости от состояния среды в дуговом промежутке и не позволяет различать при численном моделировании первый и третий период горения дуги.

Модель № 2. Более реальная ВАХ электрической дуги может быть представлена двумя линейными уравнениями и постоянным сопротивлением при значениях тока в интервале $[-i_1, i_1]$:

$$u = \begin{cases} R_{S1}i & -i_1 \leq i \leq i_1 \\ R_{S2}i + u_{\text{заж}} \left(1 - \frac{R_{S2}}{R_{S1}} \right) & i_1 < i \leq i_2 \\ R_{S2}i - u_{\text{заж}} \left(1 - \frac{R_{S2}}{R_{S1}} \right) & -i_2 \leq i < -i_1 \end{cases},$$

где $i_1 = \frac{u_{\text{заж}}}{R_{S1}}$,

$$i_2 = \frac{u_{\text{гаши}}}{R_{S2}} - u_{\text{заж}} \left(\frac{1}{R_{S2}} - \frac{1}{R_{S1}} \right).$$

Данная модель не содержит зависимости от состояния среды в дуговом промежутке и не позволяет моделировать третий период горения дуги (отрезок ВО динамической ВАХ, рис. 1), но позволяет задать характерные точки ВАХ дуги (точки А, В). Сопротивления R_{S1} и R_{S2} определяют наклон отрезков ОА и АВ. Причем R_{S1} соответствует участку, когда напряжение нарастает в разрядном промежутке после перехода тока через нуль, а сопротивление R_{S2} соответствует падающему участку ВАХ от напряжения зажигания дуги $u_{\text{заж}}$ до напряжения гашения дуги $u_{\text{гаши}}$.

Модель № 3. Следующим приближением к реальной ВАХ дуги является нелинейная модель, которая может быть получена при детальном рассмотрении характерных периодов реальной ВАХ дуги. Как видно из рис. 1, процесс горения дуги может быть разделен на три периода.

Система уравнений [8], описывающая электрическую дугу в данной модели на различных периодах ее горения, имеет вид:

$$u = \begin{cases} R_{S1}i & (-i_3 \leq i < i_1, \frac{di}{dt} > 0) \text{ или} \\ & (-i_1 \leq i < i_3, \frac{di}{dt} < 0) \\ u_{\text{стаб}} + (u_{\text{заж}} - u_{\text{стаб}}) \exp\left(\frac{i_1 - i}{i_T}\right) & i_1 \leq i < i_2, \frac{di}{dt} > 0 \\ u_{\text{стаб}} + (i - i_2)R_{S2} & i \geq i_2, \frac{di}{dt} \geq 0 \\ u_{\text{гаши}} + (i - i_3)R_{S3} & i \geq i_3, \frac{di}{dt} < 0 \\ -u_{\text{стаб}} + (u_{\text{стаб}} - u_{\text{заж}}) \exp\left(\frac{i_1 + i}{i_T}\right) & -i_2 \leq i < i_1, \frac{di}{dt} < 0 \\ -u_{\text{стаб}} + (i + i_2)R_{S2} & i < -i_2, \frac{di}{dt} \leq 0 \\ -u_{\text{гаши}} + (i + i_3)R_{S3} & i < -i_3, \frac{di}{dt} > 0 \end{cases},$$

где R_{S1} , R_{S2} и R_{S3} – сопротивление дуги на каждом периоде горения;

$$i_1 = \frac{u_{\text{заж}}}{R_{S1}},$$

$$i_T = 0,5i_1,$$

$$i_2 = 2i_1,$$

$$i_3 = \frac{u_{\text{гаши}}}{R_{S1}}.$$

В первый период напряжение на дуге в интервале от $-u_{\text{гаши}}$ до $u_{\text{заж}}$ и ток дуги связаны линейно. В этот период дуга ведет себя как резистор, и ее ток линейно изменяется от $-i_3$ до i_1 . Второй период разбит на два этапа. Первый этап – этап зажигания дуги. Во время него наблюдается снижение напряжения по экспоненте от значения $u_{\text{заж}}$ до значения $u_{\text{стаб}}$, а ток незначительно увеличивается от значения i_1 до значения i_2 . Второй этап – этап нормального горения дуги. Во время него напряжение дуги линейно снижается на небольшую величину от $u_{\text{стаб}}$ до напряжения гашения дуги $u_{\text{гаши}}$. Во время третьего периода происходит снижение тока дуги, которое описывается двумя линейными уравнениями. Первое из которых учитывает изменение сечения токового канала дуги. Второе отображает изменение механизма эмиссии заряженных частиц на электродах при снижении напряжения и температуры на электродах. Однако эти уравнения не учитывают инерционность тепловых процессов.

Модель № 4. В этой модели ВАХ электрической дуги также делится на три периода [9–11]. В первый период дуга начинает повторно загораться после погасания. Когда напряжение дуги равняется нулю, ток дуги тоже проходит через ноль. До того как напряжение дуги достигнет напряжения повторного зажигания $u_{\text{заж}}$, эквивалентная схема представляет собой цепь с конечным сопротивлением. Во второй период происходит устойчивое горение дуги при постоянном напряжении. Быстрый переходный процесс наблюдается только в момент, когда напряжение дуги резко снижается от $u_{\text{заж}}$ до постоянной величины u_n . Этот процесс описывается экспоненциальной функцией с постоянной времени T_1 , которая определяется в основном временем

разогрева плазмы током до температуры термической ионизации. Во время третьего периода происходит гашение дуги. Напряжение дуги гладко снижается по экспоненциальной функции с постоянной времени T_2 . Причем T_2 – характерное время охлаждения плазмы, которое минимально в районе катодного пятна, где оно составляет 15–20 мс.

Математическое описание модели № 4 может быть представлено в виде системы:

$$R_d = \begin{cases} R_{S1} & 0 \leq I < i_{заж}, \frac{dI}{dt} \geq 0 \\ \frac{u_n + (u_{заж} - u_n) \exp\left(\frac{i_{заж} - I}{T_1}\right)}{I} & I \geq i_{заж}, \frac{dI}{dt} > 0, \\ \frac{u_m + (u_{заж} - u_m) \exp\left(\frac{-I}{T_2}\right)}{I + i_{заж}} & \frac{dI}{dt} < 0 \end{cases}$$

где $I = |i(t)|$,

$$u_n = \frac{u_{заж}}{1,15},$$

$$u_m = \left[\frac{I_{max} + i_{заж}}{I_{max}} \right] \cdot u_n,$$

$$\frac{u_n + (u_{заж} - u_n) \exp\left(\frac{i_{заж} - I}{T_1}\right)}{I} = R_{S2},$$

I_{max} – максимальное значение тока дуги.

Таким образом, в отличие от моделей № 1–№ 3, в ВАХ дуги модели № 4 используется зависимость сопротивления дуги от тока, протекающего через нее, и учитывается инерционность тепловых процессов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для рассмотренных моделей ВАХ дуги результаты расчетов сравнивались между собой и с результатами экспериментальных исследований. Для этого в Matlab (Simulink) была создана модель одной фазы системы электроснабжения (СЭС) с дуговой электропечью [12].

При расчетах уровней высших гармоник тока и напряжения использовались параметры схем замещения печного трансформатора и короткой сети для печи ДСП-100НЗА с печным трансформатором мощностью 50 МВА, приведенные в [13]. Печь ДСП-100НЗА была выбрана как получившая широкое распространение в отечественной промышленности и подробно исследованная [14–16].

В работах [17; 18] показано, что для расчетов с использованием моделей ВАХ дуги необходимо применять вероятностные параметры. В расчетах вероятностные параметры динамической ВАХ приняты для периода проплавления колодцев, когда ВАХ дуги резко нелинейна, а кривые тока и напряжения дуги максимально искажены. Результаты экспериментальных исследований искажений синусоидальности кривых напряжения и тока печи ДСП-100НЗА, необходимые для сравнения с результатами расчетов, и параметры системы электроснабжения печи были взяты из работы [16].

Simulink-модель для расчета высших гармоник тока и напряжения печной дуги представлена на рис. 2, а параметры системы электроснабжения и параметры моделей приведены в табл. 1.

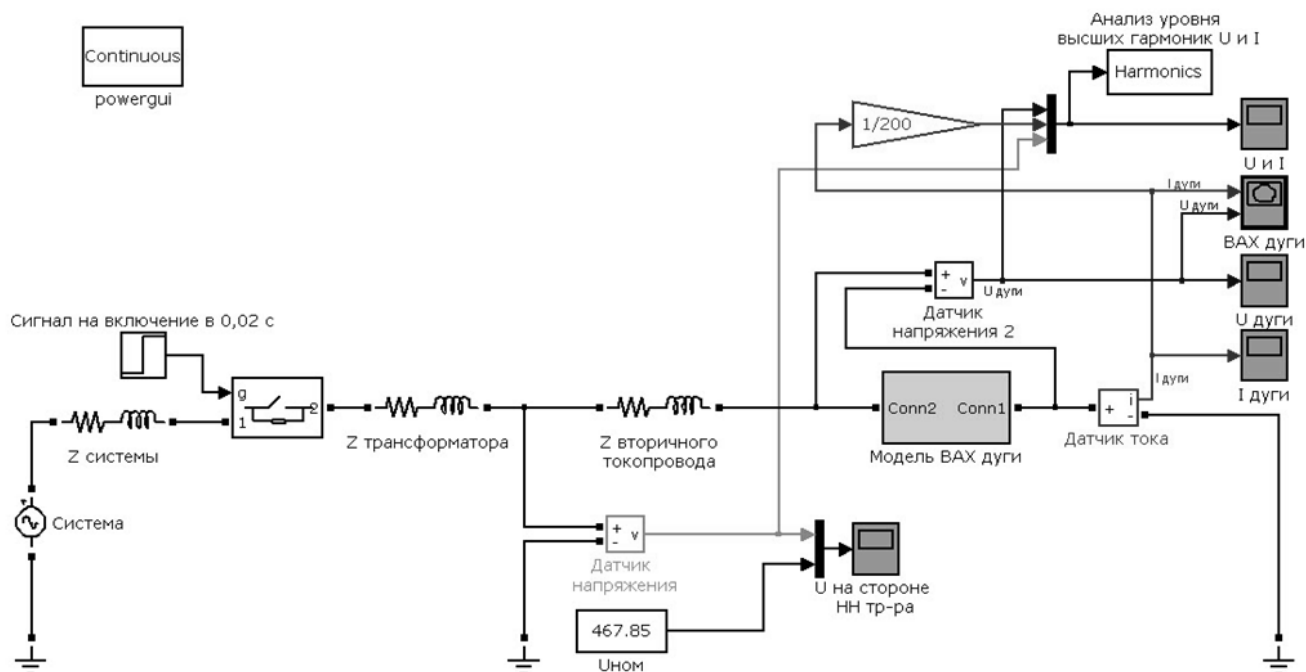


Рис. 2. Simulink-модель дуговой нагрузки

Используя параметры, приведенные в табл. 1, получены напряжение на дуге, напряжение на шинах низкого напряжения печного трансформатора и ток дуги для каждой модели ВАХ. Результаты расчетов для всех четырех моделей представлены на рис. 3. Результаты расчета высших гармоник напряжения на дуге, тока дуги и напряжения на стороне НН трансформатора и экспериментальные результаты приведены в табл. 2. Кроме того, в табл. 2 для каждой гармонической составляющей тока и напряжения приведены значения относительных погрешностей в сравнении с экспериментальными данными, полученными на действующей ДСП-100НЗА.

В полученных кривых тока и напряжения дуги присутствуют только нечетные гармоники, что является следствием симметричности моделируемой ВАХ дуги относительно осей координат. Поскольку уровень четных гармоник в спектре тока относительно невелик и для исследуемой печи не превышает 5 % [16; 19], то использование симметричной относительно осей ВАХ дуги позволяет упростить математические модели и уменьшить объем необходимых исходных данных для моделирования. При проведении расчетов с целью проверки выполнения требований ГОСТ 32144-2013 [20] необходимо вероятностные параметры динамиче-

ской ВАХ дуги задавать отдельно для положительного и отрицательного полупериода.

Как видно из данных, приведенных в табл. 2, относительная погрешность расчетов увеличивается с ростом номера гармоники. Если для 3-й гармоники тока относительная погрешность находится в пределах от 1,2 % (модель № 3) до 29,9 % (модель № 1), то для 11-й гармоники разброс значений составляет от 16,4 % (модель № 4) до 73,3 % (модель № 1). В спектре высших гармонических составляющих напряжения относительные погрешности результатов расчета выше, чем в спектре высших гармонических составляющих тока дуги, особенно для 7, 9 и 11-й гармоник. Наименьшими значениями относительных погрешностей по отдельным гармоническим составляющим тока и напряжения обладает модель № 4: от 3,9 % для 7-й гармоники до 16,4 % для 11-й. В то же время уровень относительных погрешностей для высших гармонических составляющих тока в модели № 4 для 5, 7, 9 и 11-й гармоник более чем в три раза ниже данных показателей у остальных моделей. Наличие расхождений в экспериментальных и расчетных значениях может быть обусловлено принятыми в процессе моделирования допущениями, а также погрешностями эксперимента.

Табл. 1. Параметры системы и моделей

Элемент	Параметры
Система	$U_{ном}=573$ В, $f=50$ Гц, $R_c=0,0528$ мОм, $X_c=0,468$ мОм, $R_m=0,05$ мОм, $X_m=0,35$ мОм, $R_{эм}=0,25$ мОм, $X_{эм}=3,15$ мОм,
Модель № 1	$U_{заж}=259,2$ В, $C=1235$ кВТ, $D=24$ кА
Модель № 2	$U_{заж}=310,5$ В, $R_{S1}=25,87$ мОм, $i_j=12$ кА, $U_{заж}=259,2$ В, $R_{S2}=-0,741$ мОм, $i_2=81,2$ кА
Модель № 3	$U_{заж}=310,5$ В, $U_{заж}=259,2$ В, $U_{смаб}=285,4$ В $R_{S1}=25,87$ мОм, $R_{S2}=-0,741$ мОм, $R_{S3}=-0,39$ мОм
Модель № 4	$U_{заж}=310,5$ В, $I_{max}=100$ кА, $T_1=0,01$ с, $T_2=0,02$ с

Табл. 2. Уровень высших гармоник тока и напряжения для различных моделей

График	Номер гармоники	Модель № 1		Модель № 2		Модель № 3		Модель № 4		Экспериментальные графики
		Расчетное значение	Относительная погрешность	Расчетное значение	Относительная погрешность	Расчетное значение	Относительная погрешность	Расчетное значение	Относительная погрешность	
Ток дуги	1, кА	60,98	-	69,96	-	76,86	-	76,10	-	-
	3, %	10,92	29,9	12,95	16,9	15,39	1,2	17,90	14,9	15,58
	5, %	3,45	43,9	4,48	27,2	4,80	22,0	6,42	4,4	6,15
	7, %	1,45	56,5	1,97	40,8	1,98	40,5	3,20	3,9	3,33
	9, %	0,74	64,4	1,00	51,9	0,91	56,3	1,88	9,6	2,08
	11, %	0,39	73,3	0,54	63,0	0,46	68,5	1,22	16,4	1,46
Напряжение на дуге	1, В	356,4	-	352,9	-	323,1	-	334,8	-	-
	3, %	35,77	12,2	35,87	12,6	35,81	12,4	28,96	9,1	31,87
	5, %	21,41	33,2	20,62	28,3	18,91	17,7	15,23	5,2	16,07
	7, %	14,95	108,2	12,70	76,9	11,12	54,9	8,95	24,7	7,18
	9, %	11,32	176,1	8,29	102,2	6,68	62,9	5,92	44,4	4,10
	11, %	9,02	467,3	5,56	249,7	4,11	158,5	3,84	141,5	1,59

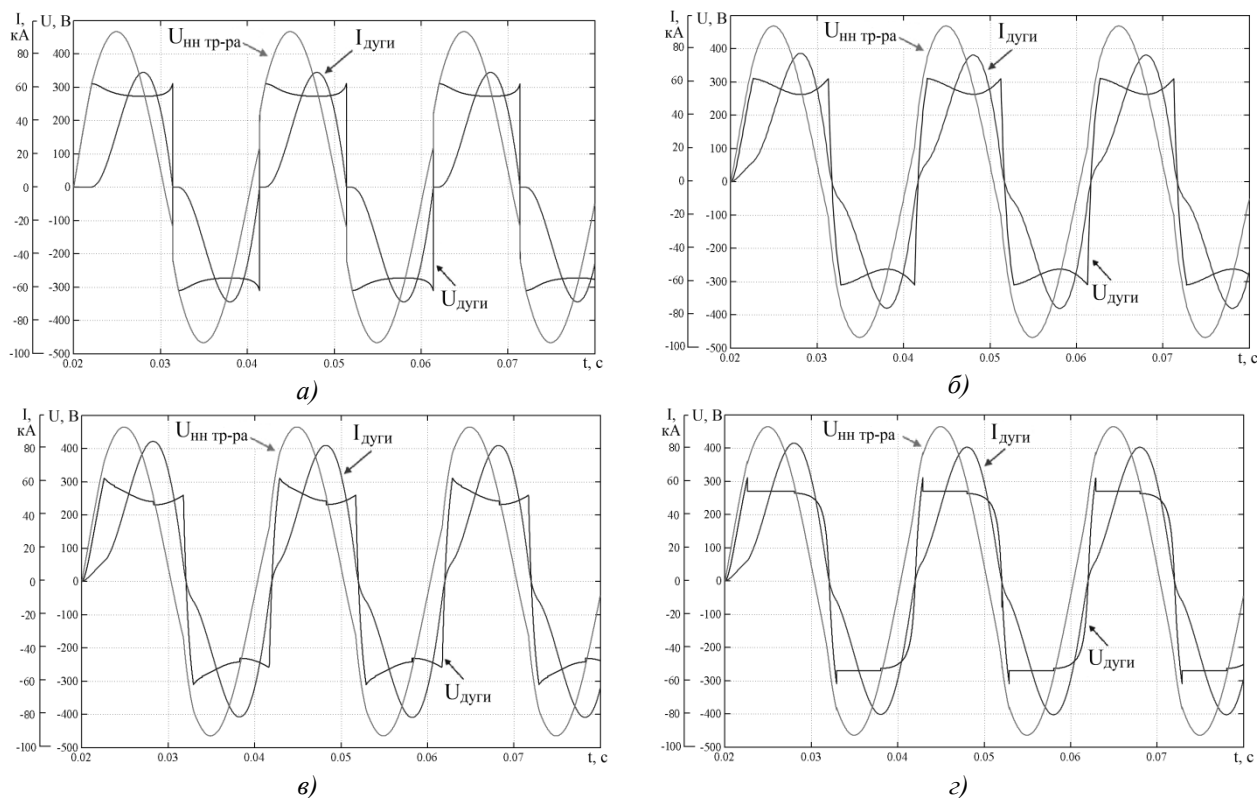


Рис. 3. Графики напряжения на дуге, напряжения на шинах НН трансформатора и тока дуги для: а – модели № 1; б – модели № 2; в – модели № 3; г – модели № 4

ВЫВОДЫ

Согласно проведенным исследованиям, наименьшими значениями относительных погрешностей по отдельным гармоническим составляющим напряжения в сравнении с экспериментальными данными для ДСП-100-НЗА обладает модель № 4, которая позволяет учитывать инерционность тепловых процессов. Модель № 1 ВАХ дуги является сильно упрощенной, не содержит зависимости от состояния среды в дуговом промежутке и не позволяет различать при численном моделировании первый и третий период горения дуги. Модель № 2 также является упрощенной, но позволяет задать характерные точки ВАХ дуги. В модели № 3 третий период горения дуги описывается двумя линейными уравнениями. Первое учитывает изменение сечения токового канала дуги, второе отображает изменение механизма эмиссии заряженных частиц на электродах при снижении напряжения и температуры на электродах, однако эти уравнения не учитывают инерционность тепловых процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ting W., Wennen S., Yao Z. A New Frequency Domain Method for the Harmonic Analysis of power system with Arc Furnace // 4th international conference on advances in power system control. 1997. P. 552–555.
2. Ozgun O., Abur A. Development of an Arc Furnace Model for Power Quality Studies // Power Engineering Society Summer Meeting. 1999. № 1. P. 507–511.
3. Свенчанский А.Д., Цуканов В.В. Модель дуги при расчете динамических процессов в цепях ДСП // Математическое моделирование и расчет дуговых

и плазменных сталеплавильных печей. М.: ВНИИ-ЭТО, 1983. С. 41–44.

4. Черненко А.Н. Разработка методики расчета высших гармоник тока и напряжения дуговых электропечей в точке общего присоединения : дис. ... канд. техн. наук. Тольятти, 2011. 145 с.
5. Миронов Ю.М. Теоретическая электротехника электрических электродных печей. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1997. 232 с.
6. Montanari G., Loggini M., Pitti L., Tironi E. The Effects of Series Inductors for Flicker Reduction in Electric Power System Supplying Arc Furnaces // Industry Applications Society Annual Meeting. 1993. № 2. P. 1496–1503.
7. Blazic B., Papic I. Analysis of flicker mitigation in utility distribution network // EUROCON 2003. 2003. № 2. P. 292–296.
8. Zheng T., Makram E., Girgis A. Effect of Different Arc Furnace Models on Voltage Distortion // Harmonics And Quality of Power. 1998. № 2. P. 1079–1085.
9. Sharmeela C., Uma G., Mohan M.R., Karthikeyan K. Voltage Flicker Analysis and Mitigation Case Study in ac Electric Arc Furnace Using PSCAD/EMTDC // International conference on power system technology. 2004. № 1. P. 707–712.
10. Zheng T., Makram E. An Adaptive Arc Furnace Model // IEEE Transaction on power delivery. 2000. № 15. P. 931–939.
11. Черненко А.Н. Обобщенная модель печной и сварочной дуги // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2011. № 3. С. 68–70.

12. Рубцов В.П., Елизаров В.А. Анализ гармонического состава кривой фазного тока для оценки распределения мощности в тигле рудно-термической печи // *Электрометаллургия*. 2011. № 3. С. 11–19.
 13. Короткие сети и электрические параметры дуговых электропечей : справочник / под ред. Я.Б. Данцисса, Г.М. Жилова. 2-е изд. М.: Metallurgiya, 1987. 320 с.
 14. Минеев Р.В., Михеев А.П., Рыжнев Ю.Л. Повышение эффективности электроснабжения электропечей. М.: Энергоатомиздат, 1986. 208 с.
 15. Влияние дуговых электропечей на системы электроснабжения / под ред. М.Я. Смелянского, Р.В. Минеева. М.: Энергия, 1975. 184 с.
 16. Вахнина В.В. Разработка динамических моделей дуговых сталеплавильных печей и их электромагнитной совместимости с системой электроснабжения по несинусоидальности напряжения : дис. ... канд. техн. наук. Нижний Новгород, 2000. 211 с.
 17. Свенчанский А.Д., Цуканов В.В. Модель дуги при расчете динамических процессов в цепях ДСП // *Математическое моделирование и расчет дуговых и плазменных сталеплавильных печей*. М.: ВНИИ-ЭТО, 1983. С. 41–44.
 18. Цуканов В.В. Исследование динамических режимов в электрических цепях дуговых сталеплавильных печей и их воздействия на качество электрической энергии: дис. ... канд. техн. наук. М., 1979. 239 с.
 19. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 5-е изд. М.: Энергоатомиздат, 2004. 358 с.
 20. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. 19 с.
- REFERENCES**
1. Ting W., Wennen S., Yao Z. A New Frequency Domain Method for the Harmonic Analysis of power system with Arc Furnace. *4th international conference on advances in power system control*, 1997, pp. 552–555.
 2. Ozgun O., Abur A. Development of an Arc Furnace Model for Power Quality Studies. *Power Engineering Society Summer Meeting*, 1999, no. 1, pp. 507–511.
 3. Svenchansky A.D., Tsukanov V.V. Arc model in the calculation of dynamic processes in the EAF circuits. *Matematicheskoe modelirovanie i raschet dugovikh i plazmennikh staleplavilnikh pechey*. Moscow, VNIETO publ., pp. 41–44.
 4. Chernenko A.N. *Razrabotka metodiki rascheta visshikh garmonik toka i napryazheniya dugovikh elektropechey v tochke obshchego prisoedineniya*. Diss. kand. tehn. nauk [Development of methods for calculation of higher current and voltage harmonics of electric arc furnaces at the point of common coupling]. Tolyatty, 2011, 145 p.
 5. Mironov Yu.M. *Teoreticheskaya elektrotehnika elektricheskikh elektrodnikh pechey* [Fundamental electrical engineering of electrical rod ovens]. Chuvashsky universitet publ., 1997, 232 p.
 6. Montanari G., Loggini M., Pitti L., Tironi E. The Effects of Series Inductors for Flicker Reduction in Electric Power System Supplying Arc Furnaces. *Industry Applications Society Annual Meeting*, 1993, no. 2, pp. 1496–1503.
 7. Blazic B., Papic I. Analysis of flicker mitigation in utility distribution network. *EUROCON 2003*, 2003, no. 2, pp. 292–296.
 8. Zheng T., Makram E., Girgis A. Effect of Different Arc Furnace Models on Voltage Distortion. *Harmonics And Quality of Power*, 1998, no. 2, pp. 1079–1085.
 9. Sharmeela C., Uma G., Mohan M.R., Karthikeyan K. Voltage Flicker Analysis and Mitigation Case Study in ac Electric Arc Furnace Using PSCAD/EMTDC. *International conference on power system technology*, 2004, no. 1, pp. 707–712.
 10. Zheng T., Makram E. An Adaptive Arc Furnace Model. *IEEE Transaction on power delivery*, 2000, no. 15, pp. 931–939.
 11. Chernenko A.N. A generalized model furnace and the welding are. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2011, no. 3, pp. 68–70.
 12. Rubtsov V.P., Elizarov V.A. Analysis of harmonic composition of phase current curves for evaluation of power distribution in the crucible of electric ore smelting furnace. *Elektrometallurgiya*, 2011, no. 3, pp. 11–19.
 13. Dantsiss Ya.B., Zhilov G.M., eds. *Korotkie seti i elektricheskije parametric dugovikh elektropechey* [Low-voltage circuits and electrical parameters of electric arc furnaces]. 2nd ed. Moscow, Metallurgiya publ., 1987, 320 p.
 14. Mineev R.V., Mikheev A.P., Ryzhnev Yu.L. *Povishenie effektivnosti elektrosnabzheniya elektropechey* [Improvement of the efficiency of electrical furnaces electric power supply]. Moscow, Energoatomizdat publ., 1986, 208 p.
 15. Smelyansky M.Ya., Mineev R.V., eds. *Vliyanie dugovikh elektropechey na sistemi elektrosnabzheniya* [Electric arc furnaces influence on the power supply systems]. Moscow, Energiya publ., 1975, 184 p c.
 16. Vakhnina V.V. *Razrabotka dinamicheskikh modeley dugovikh staleplavilnikh pechey i ikh elektromagnitnoy sovmestivosti s sistemoy elektrosnabzheniya po nesinusoidalnosti napryazheniya*. Diss. kand. tehn. nauk [Development of dynamic models of the arc steel furnaces and their electromagnetic compatibility with the power supply system according to the voltage nonsinusoidality]. Nizhniy Novgorod, 2000, 211 p.
 17. Svenchansky A.D., Tsukanov V.V. Arc model in the calculation of dynamic processes in the EAF circuits. *Matematicheskoe modelirovanie i raschet dugovikh i plazmennikh staleplavilnikh pechey*. Moscow, VNIETO publ., pp. 41–44.
 18. Tsukanov V.V. *Issledovanie dinamicheskikh rezhimov v elektricheskikh tsepyakh dugovikh staleplavilnikh pechey i ikh vozdeystvie na kachestvo elektricheskoy energii*. Diss. kand. tehn. nauk [Research of the dynamic modes in electric circuits of the arc steel furnaces and their influence on the electric power quality]. Moscow, 1979, 239 p.
 19. Zhezhelenko I.V. *Visshie garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatii* [Higher harmonics in electric power supply systems of production enterprises]. 5th ed. Moscow, Energoatomizdat publ., 2004, 358 p.

20. GOST 32144-2013. Electric power. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Quality standard for electric power in general-purpose electric power supply systems. Moscow, Standartinform publ., 2014. 19 p. (In Russian).

THE DYNAMIC MODEL OF AN ARC FURNACE IN MATLAB (SIMULINK)

© 2015

A.N. Chernenko, candidate of technical sciences,

assistant professor of the Department of power supply and electrical engineering

V.V. Vakhnina, Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of power supply and electrical engineering

S.G. Martynova, undergraduate student of the Department of power supply and electrical engineering
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: arc steel furnace; voltage harmonic components; electric arc.

Abstract: The article shows that for creation of electric arc model it is appropriate to use the methods of investigation of electric arc with changing its parameters through time. The comparison of four different models of volt-ampere characteristic of the AC arc in the arc steel furnace showed that three of these four models did not allow obtaining a consistent range of higher harmonics of current and voltage generated by electric arc furnaces. They do not display the inertia of thermal processes during the arc ignition and extinction as a result of which the curves of current and arc voltage in these models differ from the actual furnace arcs oscillograms. To compare the results of the arc voltage-current characteristics modeling against each other and with the results of experimental studies, the model of one phase of electric power supply system with electric arc steel furnace was created in Matlab (Simulink). While calculating the higher harmonics of current and voltage, the equivalent circuit parameters of a furnace transformer and a low-voltage circuit for a DSP-100NZA furnace with a furnace transformer capacity of 50 MVA were used. The authors obtained the diagrams of arc voltage, the voltage on low voltage buses of furnace transformer and the arc current for each model of volt-ampere characteristic. The research showed that more coincidences of the results of harmonic analysis of currents and voltages with experimental data is observed for the VAC model, which takes into account the inertia of thermal processes in the arc and the electrodes.