

Исследование гармонического состава тока в трехфазной электрической цепи с дугой

ЕЛИЗАРОВ В.А., ЕЛИЗАРОВ К.А., РУБЦОВ В.П.

На основе разработанной модели системы трехфазной дуговой печи проводится анализ причин возникновения высших гармонических составляющих токов и влияния на их значение и спектральный состав параметров электрической цепи, несимметрии питающих напряжений, собственных и взаимных индуктивностей. Проводится сравнение результатов исследования с экспериментальными данными исследования, полученными на действующих промышленных печах. Рассмотрены этапы разработки модели, а также результаты вычислительных экспериментов с ее использованием, проведенных для дуговой печи ДСП-100. Приводятся результаты анализа погрешностей расчета высших гармонических составляющих.

Ключевые слова: рудно-термическая печь с закрытой дугой, гармонический состав тока, оценка теплового режима

Электротехнологические установки с электрической дугой получили широчайшее применение в современной технике. К таким установкам можно отнести дуговые и рудно-термические печи, которые используются для широкого спектра технологических процессов – от плавки черных и цветных металлов и их сплавов до восстановления руд и получения ферросплавов. Основным источником нагрева в таких установках является электрическая дуга, которая как элемент электрической цепи характеризуется существенной нелинейностью, вызывающей протекание в цепи несинусоидальных токов.

Вторичные токоподводы трехфазных дуговых печей переменного тока обычно стараются выполнить по схеме «треугольник на электродах», причем концы электродов с помощью дуг «включаются» по схеме «звезда» с общей точкой на шихте либо ванне жидкого металла. При совместном горении трех дуг искажения токов увеличиваются и возникает широкий спектр гармонических токов, которые трансформируются в первичную обмотку трансформатора и передаются в энергосистему. Высшие гармоники токов оказывают негативное влияние на силовое электрооборудование, системы релейной защиты, автоматики и телекоммуникаций. Экономический ущерб, причиняемый воздействием высших гармоник, обусловлен ухудшением энергетических

A model simulating the system supplying power to a three-phase arc furnace is developed and used for analyzing factors causing the occurrence of higher harmonic components of currents and their influence on the value and spectral composition of electric circuit parameters, imbalance of power supply voltages, and self and mutual inductances. The study results are compared with the results obtained from experiments carried out on operating industrial furnaces. Model development stages are considered together with the results of numerical experiments obtained on the model as applied to a DSP-100 arc furnace. The results from analyzing the errors in calculating higher harmonic components are presented.

Key words: ore thermal furnace with closed arc, harmonic composition of current, estimation of thermal operating conditions

показателей и сокращением срока службы электрооборудования, общим снижением надежности функционирования электрических сетей.

Для уменьшения влияния гармоник на питающую сеть на стороне высокого напряжения печного трансформатора устанавливают специальные фильтрокомпенсирующие устройства, которые предназначены для снижения искажений тока и напряжения до допустимых для энергосистемы пределов. Основным недостатком такого рода устройств являются значительная стоимость и большие габариты. Для успешной борьбы с высшими гармониками токов необходимо знать причину их возникновения и спектральный состав, знание которого в дуговых печах оказывается важным и для решения задач управления процессом плавки. В последнее время наметилась тенденция использования гармонического состава тока для определения момента перехода от одной стадии плавления к другой. Использование данных о текущем гармоническом составе фазных токов позволяет определить режим работы рудно-термической печи и достигнуть близкого к желаемому распределения мощностей в реакционной зоне.

Исходя из вышесказанного, исследование гармонического состава тока трехфазной цепи с дугой имеет практическую ценность для подбора параметров фильтрокомпенсирующих устройств и оп-

ределения основных факторов, влияющих на гармонический состав токов, а также и для поиска современных способов управления процессом плавки в дуговой печи, обеспечивающих повышение эффективности ее работы. Такое исследование целесообразно провести на математической модели электрической цепи с дугой.

Построение имитационной модели. Для построения модели трехфазной цепи с дугой воспользуемся схемой замещения силовой цепи трехфазной дуговой сталеплавильной печи, представленной на рис. 1 [1]. Здесь использованы следующие обозначения: e_A, e_B, e_C – переменная ЭДС источника питания (трансформатора) для фаз A, B и C соответственно; $L_{кА}, L_{кВ}, L_{кС}$ – собственные индуктивности фаз, равные сумме индуктивностей участков токоподвода (короткой сети), включая фазные индуктивности рассеяния печного трансформатора, приведенные к вторичным обмоткам; $R_{кА}, R_{кВ}, R_{кС}$ – суммарные активные сопротивления токоподвода (короткой сети) и трансформатора; $R_{эА}, R_{эВ}, R_{эС}$ – активные сопротивления электродов; $R_{дА}, R_{дВ}, R_{дС}$ – нелинейные сопротивления дуг, зависящие от тока; $R_{рА}, R_{рВ}, R_{рС}$ – активные сопротивления расплава; $M_{АВ}, M_{ВС}, M_{АС}$ – взаимные индуктивности между фазами, равные сумме взаимных индуктивностей между одноименными участками разных фаз; i_A, i_B, i_C – токи фаз A, B и C .

На основе первого и второго законов Кирхгофа для схемы рис. 1 запишем систему уравнений электрического равновесия для мгновенных значений во временной плоскости:

$$\begin{aligned}
 & e_A + L_{кА} \frac{di_A}{dt} + R_{кА} i_A + R_{эА} i_A + R_{дА}(i_A) i_A + \\
 & + R_{рА} i_A - R_{рВ} i_B - R_{дВ}(i_B) i_B - R_{эВ} i_B - R_{кВ} i_B - \\
 & - L_{кВ} \frac{di_B}{dt} - e_B + M_{АВ} \frac{di_B}{dt} + M_{АС} \frac{di_C}{dt} - \\
 & - M_{АВ} \frac{di_A}{dt} - M_{ВС} \frac{di_C}{dt} = 0; \\
 & e_B + L_{кВ} \frac{di_B}{dt} + R_{кВ} i_B + R_{эВ} i_B + R_{дВ}(i_B) i_B + \\
 & + R_{рВ} i_B - R_{рС} i_C - R_{дС}(i_C) i_C - R_{эС} i_C - R_{кС} i_C - \\
 & - L_{кС} \frac{di_C}{dt} - e_C + M_{АВ} \frac{di_A}{dt} + M_{ВС} \frac{di_C}{dt} - \\
 & - M_{ВС} \frac{di_B}{dt} - M_{АС} \frac{di_A}{dt} = 0; \\
 & e_A = E_{mA} \sin(\omega t); e_B = E_{mB} \sin(\omega t - 2\pi / 3); \\
 & e_C = E_{mC} \sin(\omega t + 2\pi / 3).
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Для удобства дальнейшего использования системы уравнений (1) заменим ее следующей системой:

$$\begin{aligned}
 R_{кА} + R_{эА} + R_{рА} + R_{дА}(I_A) &= R_{эА} + R_{дА}(I_A) = R_A; \\
 R_{кВ} + R_{эВ} + R_{рВ} + R_{дВ}(I_B) &= R_{эВ} + R_{дВ}(I_B) = R_B; \\
 R_{кС} + R_{эС} + R_{рС} + R_{дС}(I_C) &= R_{эС} + R_{дС}(I_C) = R_C,
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

где R_A, R_B, R_C – нелинейные сопротивления фаз A, B, C , зависящие от фазных токов.

Используя преобразование Лапласа, представим систему уравнений (1) в операторной форме в виде [2]:

$$\begin{aligned}
 I_A(p) &= \frac{E_B(p) - E_A(p) + I_B(p)[(M_{АВ} - L_{кВ})p + \\
 & + R_B] - I_C(p)p(M_{АС} - M_{ВС})}{[(L_{кА} - M_{АВ})p + R_A]}; \\
 I_B(p) &= \frac{E_C(p) - E_B(p) + I_C(p)[(M_{ВС} - L_{кС})p + \\
 & + R_C] - I_A(p)p(M_{АВ} - M_{АС})}{[(L_{кВ} - M_{ВС})p + R_B]}; \\
 I_C(p) &= - I_A(p) - I_B(p).
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Систему нелинейных уравнений (3) целесообразно представить в виде структурной схемы рис. 2, которая является более удобной и наглядной формой записи уравнений системы и позволяет упростить её исследование. Сопротивление дуги $R_{д}$ каждой фазы было представлено в системе рис. 2 нелинейной вольт-амперной характеристикой, графическое изображение которой приведено на рис. 3,а. Для наглядности на рис. 3,б приведена зависимость сопротивления $R_{д}$ от тока.

Уравнения (3) являются нелинейными, и их аналитическое решение затруднено. Поэтому исследование гармонического состава кривой фазных токов проводилось методами структурного моделирования в пакете прикладных программ Matlab Simulink. Схема модели, составленная по структур-

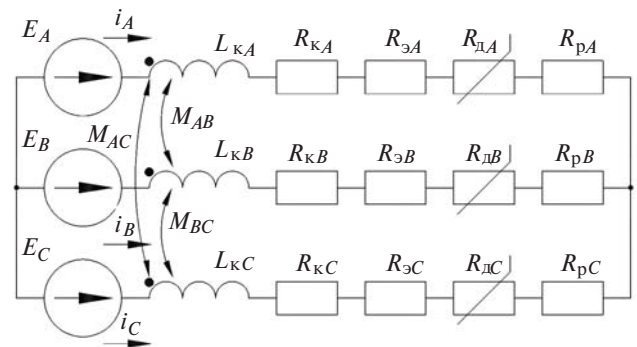


Рис. 1. Схема замещения силовой цепи трехфазной дуговой сталеплавильной печи

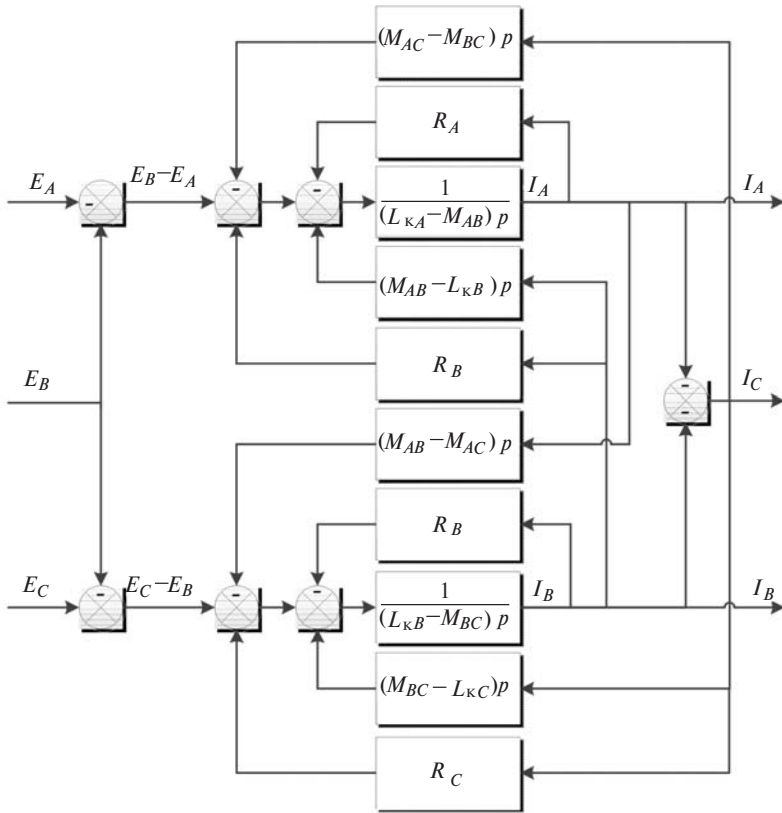
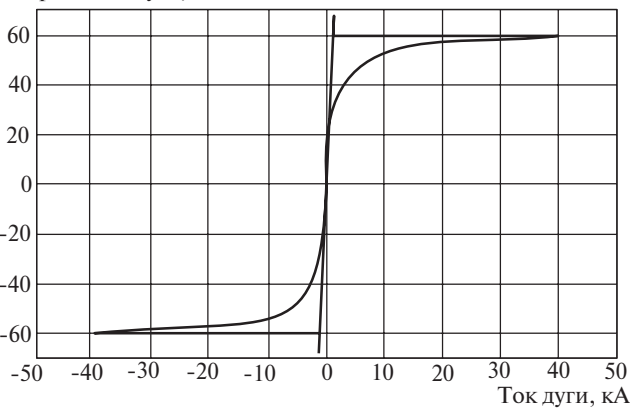


Рис. 2. Структурная схема силовой цепи трехфазной дуговой сталеплавильной печи

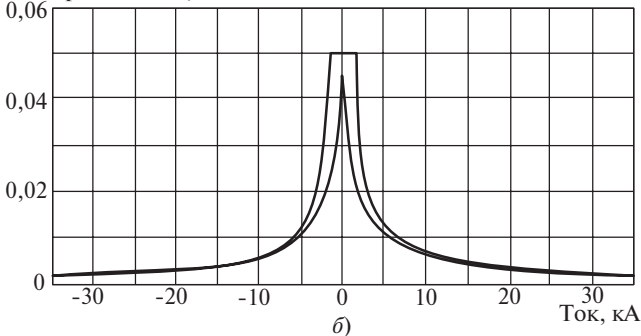
ной схеме рис. 2, представлена на рис. 4. Эта модель является имитационной и позволяет исследовать влияние несимметрии питающего напряжения, индуктивностей и взаимных индуктивностей фаз, а также нагрузки (сопротивления дуги) на гармонический состав кривой фазного тока так же, как и на реальной установке. Модель содержит следующие основные элементы: обмотки трехфазного источника питания (трехфазного электропечного трансформатора) представлены блоками формирования синусоидального периодического сигнала, смещенного на 0 (фаза A), - 120° (фаза B) и + 120° (фаза C) обозначены как 1, 2 и 3 соответственно. Нелинейные сопротивления фаз по выражению (2) определяются как функции протекающего в фазе тока в блоках 4, 5 и 6. Напряжения дуги каждой фазы находятся умножением фазного тока на сопротивление блоками умножения 7, 8 и 9. Через блоки ввода 10, 11, 12 и блоки вывода 13, 14 и 15 напряжение на дуге передается в модель. Собственные индуктивности фаз, взаимные межфазные индуктивности, а также способы их взаимодействия описываются совокупностью блоков 16.

Напряжение дуги, В



а)

Сопротивление, Ом



б)

Рис. 3. Характеристики дуги: а – вольт-амперная характеристика дуги; б – зависимость сопротивления дуги от тока

блоков 16.

Для проведения гармонического анализа тока в модель специально был введен блок быстрого преобразования Фурье, который позволяет выводить соотношение (в процентах) высших гармонических составляющих и основной (первой) гармоники. С помощью этого блока выделяются гармонические составляющие тока вплоть до тринадцатой. В схему включены виртуальные осциллографы для фиксации кривых фазных напряжений источника питания, фазных токов, фазных сопротивлений и напряжений дуги, а также двухканальные виртуальные осциллографы для снятия вольт-амперных характеристик. Данные в виртуальные осциллографы передаются блоками ввода 10–12, 17–25.

Одной из целей исследования гармонического состава токов в системах питания трехфазных дуговых печей было выявление возникновения в кривой фазного тока различных гармонических составляющих, в частности четных гармоник и гармоник, кратных трем. Дуговая печь питается от трехфазной системы с изолированной нейтралью. Согласно законам электротехники [4] при симметричной нагрузке в фазных токах должны отсутствовать постоянные составляющие, четные гармонические составляющие и гармонические составляющие, кратные трем, которые создают токи нулевой

последовательности. В то же время в [5] приводятся сведения о наличии в фазных токах дуговых печей указанных гармонических составляющих, что подтверждается и экспериментальными данными.

В нашем исследовании ставится задача выявления причин и условий возникновения различных гармонических составляющих токов в трехфазных дуговых печах, а также определение зависимостей этих составляющих от параметров нагрузки.

Проведение эксперимента и анализ результатов. В качестве объекта исследования была выбрана дуговая сталеплавильная печь емкостью 100 т (ДСП-100). Основные параметры печи приведены ниже [6]:

Номинальная емкость, т	100
Номинальная мощность трансформатора, кВ·А	25000
Пределы вторичного напряжения трансформатора, В	417–131
Номинальный ток печи, А	34600
Суммарное сопротивление токоподвода, мОм:	
фаза А	0,242
фаза В	0,242
фаза С	0,259
Суммарная индуктивность, мкГн:	
фаза А	7,58
фаза В	6,61
фаза С	7,00
Взаимные индуктивности фаз, мкГн:	
M_{AB}	0,8
M_{BC}	0,8
M_{AC}	0,8
Сопротивление шлака, Ом	0,05
Постоянная времени t_1 , с	0,01
Постоянная времени t_2 , с	0,02
Напряжение при зажигании дуги u_3 , В	70

Исследования применительно к данной печи были проведены для проверки адекватности разработанной модели рис. 4, поскольку в литературе приводятся данные о результатах экспериментальных исследований [5], проведенных на этой печи.

Исследования проводились путем расчета переходных функций фазных напряжений на выходах питающего трансформатора $e_A(t)$, $e_B(t)$, $e_C(t)$ и фазных токов $i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$, а также гармонических составляющих токов для различных режимов работы системы. Кроме того, снимались гистограммы всех гармонических составляющих фазного тока для симметричных и несимметричных нагрузок. На рис. 5 для иллюстрации метода моделирования и исследования трехфазной системы с дугой приведены осциллограммы мгновенных значений фазных напряжений питающей сети $e_A(t)$, $e_B(t)$, $e_C(t)$ и фазных токов $i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ для параметров печи, приведенных выше.

Результаты, полученные на модели рис. 4, хорошо совпадают с экспериментальными данными и отражают основные особенности электрического режима дуговой печи. Так, увеличение тока фазы С по сравнению со всеми другими фазами (рис. 5) при одновременном небольшом снижении тока фазы В происходит из-за «переноса» мощности между фазами дуговой печи, возникающего из-за существующей несимметрии сопротивлений короткой сети в трёхфазных дуговых печах [7]. Такое явление переноса мощности вызывает появление «дикий» и «мертвой» фаз. Полученные зависимости качественно схожи с экспериментальными данны-

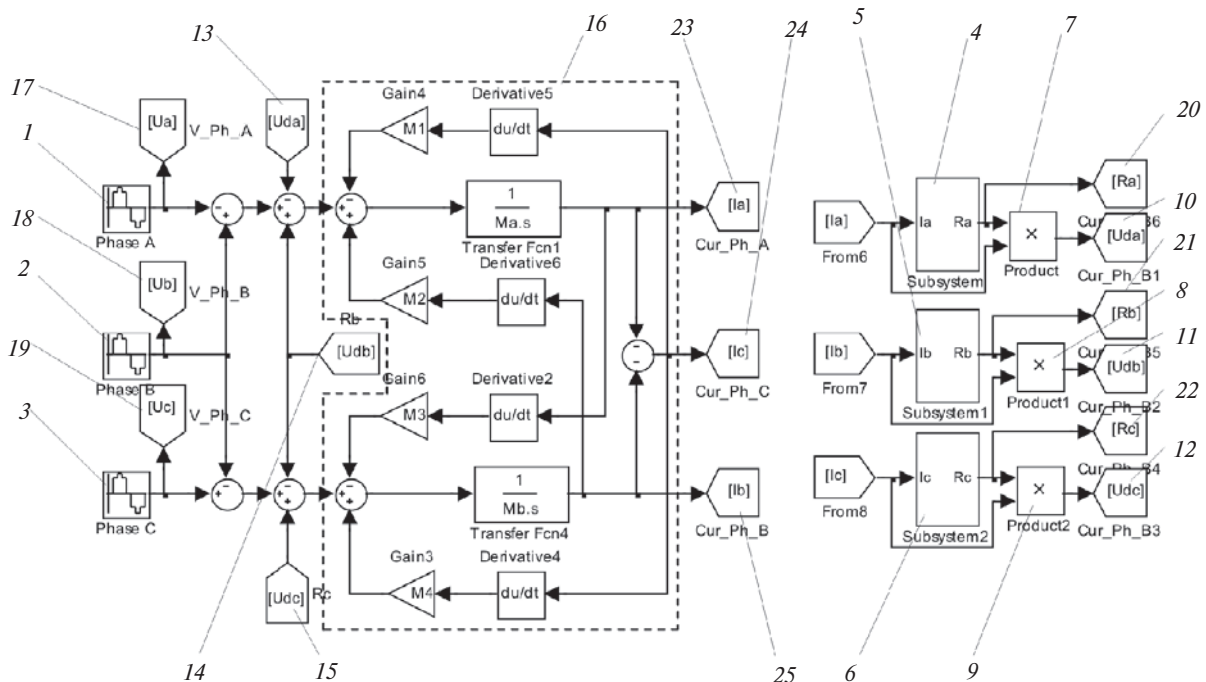


Рис. 4. Схема модели силовой цепи трехфазной дуговой сталеплавильной печи в пакете прикладных программ Matlab Simulink

ми, полученными на действующих дуговых печах различной ёмкости и мощности, что может служить подтверждением адекватности разработанной модели.

В ходе эксперимента на построенной модели были выделены постоянная составляющая (нулевая гармоника) и гармонические составляющие фазного тока вплоть до тринадцатой во всех трех фазах печи при полной симметрии активных и индуктивных сопротивлений цепи (режим 1), при несимметрии питающего напряжения (режим 2), при несимметрии взаимных индуктивностей (режим 3), при несимметрии сопротивлений дуг (длины дуги) (режим 4), при несимметрии собственных индуктивностей (режим 5), а также при номинальном режиме работы (режим 6), т.е. при параметрах, указанных выше. Для удобства анализа все данные, полученные при соответствующих режимах, сведены в табл. 1 и 2 и представлены в виде гистограмм на рис. 6. Значения амплитуд гармонического состава в этих таблицах и на рис. 6 приведены в процентах основной (первой) гармоники. Были рассмотрены 13 первых гармонических составляющих — как это принято в энергетике [1].

Значения параметров модели для соответствующих режимов приведены в табл. 3.

Полученные результаты исследования позволяют провести анализ влияния несимметрии на гармонический состав фазного тока печи.

При питании трехфазной дуговой печи от симметричной системы напряжений в спектре тока присутствуют как четные, так и нечетные гармонические составляющие (рис. 6,а). В спектре фазного тока имеют вес вторая, третья, четвертая, пятая и седьмая гармонические составляющие. Амплитуда пятой гармоники наибольшая — ее значение достигает 5% значения первой гармоники. Значение второй гармоники колеблется в диапазоне 1,6–4,0%, а третьей — в районе 1,5%.

Увеличение напряжения питания на 100 В лишь в фазе *B* приводит к росту гармонических состав-

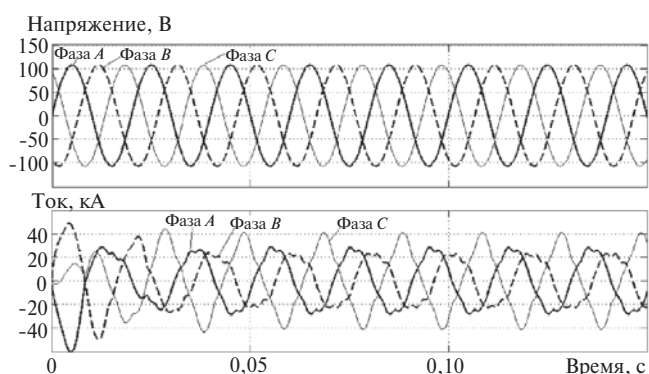


Рис. 5. Осциллограммы мгновенных значений

ляющих тока только той фазы, в которой производится изменение параметров (рис. 6,б). Гармоники в остальных фазах оказываются малы и незначительны. Наибольшее значение в этом случае имеет третья гармоническая составляющая. Она изменяется от 1,5% в симметричном режиме до 16% в несимметричном. Амплитуды второй гармонической составляющей при изменении режима возрастают с 1,6 до 8%, четвертой — с 2,3 до 5,3%. Значения пятой и седьмой гармоник, наоборот, снижаются с 9,7 до 0,7% и с 2,7 до 0,9% соответственно. Таким образом, из результатов исследования следует, что существует связь между симметрией напряжения питания и величинами второй, третьей и четвертой гармонических составляющих.

Рассмотрим режим несимметрии взаимных индуктивностей (рис. 6,в): увеличение взаимной индуктивности между фазами *B* и *C* с 0,8 до 1,2 мкГн сказывается главным образом на изменении третьей и пятой гармонических составляющих. Причем третья гармоника тока фазы, в которой произошло изменение, имеет наименьшее значение (изменяется с 1 до 4%), а третья гармоника тока фазы, которая не испытывает влияния возмущения, возрастает с 1,5 до 10%. Пятая гармоника, напротив, уменьшается в фазах (падает с 5 до 2,6% в фазе *A*), не испытывающих влияния возмущения. Остальные гармонические составляющие изменяются незначительно. Таким образом, существует связь между несимметрией взаимных индуктивностей и третьей и пятой гармонических составляющих.

Изменение сопротивления дуги приводит к росту третьей и пятой гармонических составляющих (рис. 6,г). Четные гармоники становятся незначительными. Третья и пятая гармонические составляющие фазы, в которую вводится возмущение, резко увеличиваются с 1 до 10,5% и с 5,5 до 9,7% соответственно и имеют максимальные значения. Следовательно, изменение сопротивления дуги оказывает существенное влияние на значения третьей и пятой гармонических составляющих. Характерно, что рост третьей гармоники наблюдается во всех случаях проявления несимметрии сопротивлений фаз, в то время как рост пятой — только при изменении характеристик дуги.

Несимметрия собственных индуктивностей фаз в большей степени влияет на третью гармонику (рис. 6,д). Происходит её рост с 1,1 до 8,4%. Все остальные гармоники при этом изменяются незначительно. Амплитуда тока максимальна в той фазе, в которую вводится возмущение, поскольку изменение индуктивности в большей степени влияет на форму кривой тока в этой фазе.

Анализ полученных данных позволяет найти связь несимметричности режимов цепи с дугой с

Таблица 1

Номер гармоник	Значения амплитуд гармоник, полученные моделированием, при следующих режимах по фазам											
	1 (рис. 6,а)				2 (рис. 6,б)				3 (рис. 6,в)			
	A	B	C	Среднее	A	B	C	Среднее	A	B	C	Среднее
0	0,46	1,06	0,73	0,75	3,27	68,61	2,91	24,93	1,30	0,57	0,51	0,79
1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100	100,00	100,00	100,00
2	2,69	1,61	4,05	2,78	4,03	8,1	4,27	5,47	2,43	2,86	0,97	2,09
3	1,50	1,13	1,67	1,43	0,92	16,4	1,11	6,14	9,96	3,96	5,11	6,34
4	2,52	2,31	1,54	2,12	0,52	5,29	0,83	2,21	0,98	1,12	1,36	1,15
5	5,07	5,01	6,57	5,55	0,26	4,85	0,34	1,82	2,61	5,26	5,32	4,40
6	0,97	0,29	1,46	0,91	0,28	4,19	0,13	1,53	1,35	1,44	1,66	1,48
7	2,32	2,71	2,70	2,58	0,05	0,94	0,08	0,36	3,11	2,75	1,2	2,35
8	0,66	0,31	0,42	0,46	0,17	1,30	0,06	0,51	0,56	0,46	0,22	0,41
9	0,30	0,27	0,44	0,34	0,13	0,88	0,19	0,40	1,96	0,75	1,07	1,26
10	0,22	0,09	0,18	0,16	0,00	0,89	0,08	0,32	0,12	0,18	0,29	0,20
11	0,90	0,90	1,34	1,05	0,09	0,82	0,17	0,36	0,17	1,18	1,10	0,82
12	0,18	0,19	0,19	0,19	0,04	0,67	0,06	0,26	0,35	0,28	0,16	0,26
13	0,52	0,64	0,66	0,61	0,01	0,78	0,07	0,29	0,45	0,62	0,28	0,45

Таблица 2

Номер гармоник	Значения амплитуд гармоник, полученные моделированием, при следующих режимах по фазам											
	4 (рис. 6,г)				5 (рис. 6,д)				6 (рис. 6,е)			
	A	B	C	Среднее	A	B	C	Среднее	A	B	C	Среднее
0	0,24	0,38	0,04	0,22	0,71	0,55	1,43	0,90	1,22	0,50	0,68	0,80
1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2	0,94	0,71	1,37	1,01	1,06	0,89	1,56	1,17	2,24	3,96	1,43	2,54
3	8,00	10,48	8,6	9,03	2,13	8,36	4,34	4,94	1,22	13,40	10,88	8,50
4	1,37	1,46	0,81	1,21	0,58	0,46	0,75	0,60	1,22	1,10	1,42	1,25
5	5,57	9,72	6,33	7,21	0,54	0,68	1,14	0,79	7,14	4,37	7,28	6,26
6	0,56	0,30	0,48	0,45	0,23	0,30	0,26	0,26	0,30	0,96	0,79	0,68
7	1,83	2,45	0,14	1,47	0,13	0,62	0,55	0,43	3,46	5,55	1,29	3,43
8	0,20	0,25	0,24	0,23	0,17	0,21	0,21	0,20	0,21	0,16	0,30	0,22
9	0,61	0,26	0,53	0,47	0,29	0,18	0,53	0,33	0,45	2,44	2,24	1,71
10	0,15	0,48	0,29	0,31	0,13	0,16	0,14	0,143	0,15	0,24	0,09	0,16
11	1,50	1,16	1,43	1,36	0,17	0,13	0,27	0,19	1,22	0,52	0,75	0,83
12	0,26	0,10	0,29	0,22	0,11	0,13	0,11	0,12	0,10	0,23	0,16	0,16
13	0,69	0,37	0,41	0,49	0,15	0,14	0,21	0,17	0,84	0,78	0,40	0,67

гармоническим составом кривой фазного тока. Было выявлено, что появление четных гармонических составляющих в кривой тока в основном является следствием погрешности вычислений. Среднее значение погрешности вычисления гармониче-

ских составляющих получено на модели цепи с абсолютной симметрией, когда гармонические составляющие, как это известно из теории электрических цепей, не проявляются. Величина средней погрешности составила 0,6% и отмечена горизон-

Таблица 3

Параметр	Параметры модели для следующих режимов					
	1	2	3	4	5	6
E_{mA} , В	106,96	106,96	106,96	106,96	106,96	106,96
E_{mB} , В	106,96	208,21	106,96	106,96	106,96	106,96
E_{mC} , В	106,96	106,96	106,96	106,96	106,96	106,96
L_{kA} , мкГн	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,58
L_{kB} , мкГн	7,00	7,00	7,00	7,00	6,61	6,61
L_{kC} , мкГн	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00
R_{dA} , мОм	0,242	0,242	0,242	0,242	0,242	0,242
R_{dB} , мОм	0,242	0,242	0,242	0,242	0,242	0,242
R_{dC} , мОм	0,242	0,242	0,242	0,242	0,242	0,259
u_{dA} , В	69	69	69	69	69	69
u_{dB} , В	69	69	69	80	69	69
u_{dC} , В	69	69	69	69	69	69
M_{AB} , мкГн	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
M_{BC} , мкГн	0,8	1,2	0,8	0,8	0,8	0,8
M_{AC} , мкГн	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8

тальными линиями на рис. 6. По-другому обстоит дело с нечетными гармоническими составляющими. Так, значение третьей гармоники связано в большей степени с несимметрией цепи в целом, а значение пятой гармоники обусловлено процессами, происходящими в дуге. В нечетных гармонических составляющих более высоких порядков практически не отражается режим работы цепи.

Данные, полученные для номинального режима работы (рис. 6,е), хорошо соотносятся с данными, полученными на реальной дуговой печи ДСП-100НЗА, приведенными в [5]. Расхождение расчетных и экспериментальных данных по отдельным гармоническим составляющим тока и напряжения не превышает 9,3%.

Точность моделирования проверялась сравнительными расчетами с разными значениями относительной погрешности, значение которой является входным параметром для любых расчетов в Matlab Simulink, наравне с минимальным и максимальным шагами дискретизации, а также методом решения дифференциальных уравнений. Для оценки точности использовалось следующее условие: если результаты расчетов с разными значениями относительной погрешности отличаются незначительно, то можно полагать, что найденное решение является верным. Значение относительной погрешности при моделировании составило не более 10^{-3} , а шаг дискретизации – 10^{-6} с.

В статье рассмотрен случай соединения короткой сети по схеме «звезда». Аналогичные результа-

ты могут быть получены на разработанной модели при соединении короткой сети по схеме «треугольник на электродах». Для этого необходимо привести схему «треугольник на электродах» к эквивалентной схеме «звезда».

Выводы. 1. Разработана модель трехфазной цепи с дугой, позволяющая исследовать режимы работы цепи, а также анализировать гармонический состав фазного тока с гармониками до 13-й.

2. Исследования показали, что существует связь между режимами работы трехфазной сети и гармоническим составом кривой фазного тока, причем по значению третьей гармонической составляющей можно судить о симметрии режимов работы цепи, а по пятой – о процессах, происходящих в дуге. Рост значения третьей гармонической составляющей свидетельствует о наличии в цепи несимметрии, возникающей вследствие искажения кривой питающего напряжения данной фазы или изменения взаимной индуктивности между рассматриваемой фазой и соседними. Увеличение значения пятой гармонической составляющей фазы цепи свидетельствует о росте длины дуги в данной фазе и необходимости оперативного вмешательства для устранения несимметрии мощностей в реакционной зоне печи.

3. Полученные зависимости могут быть использованы в дальнейшем для разработки систем управления и подбора параметров фильтрокомпенсирующих устройств для цепей с дуговой нагрузкой.

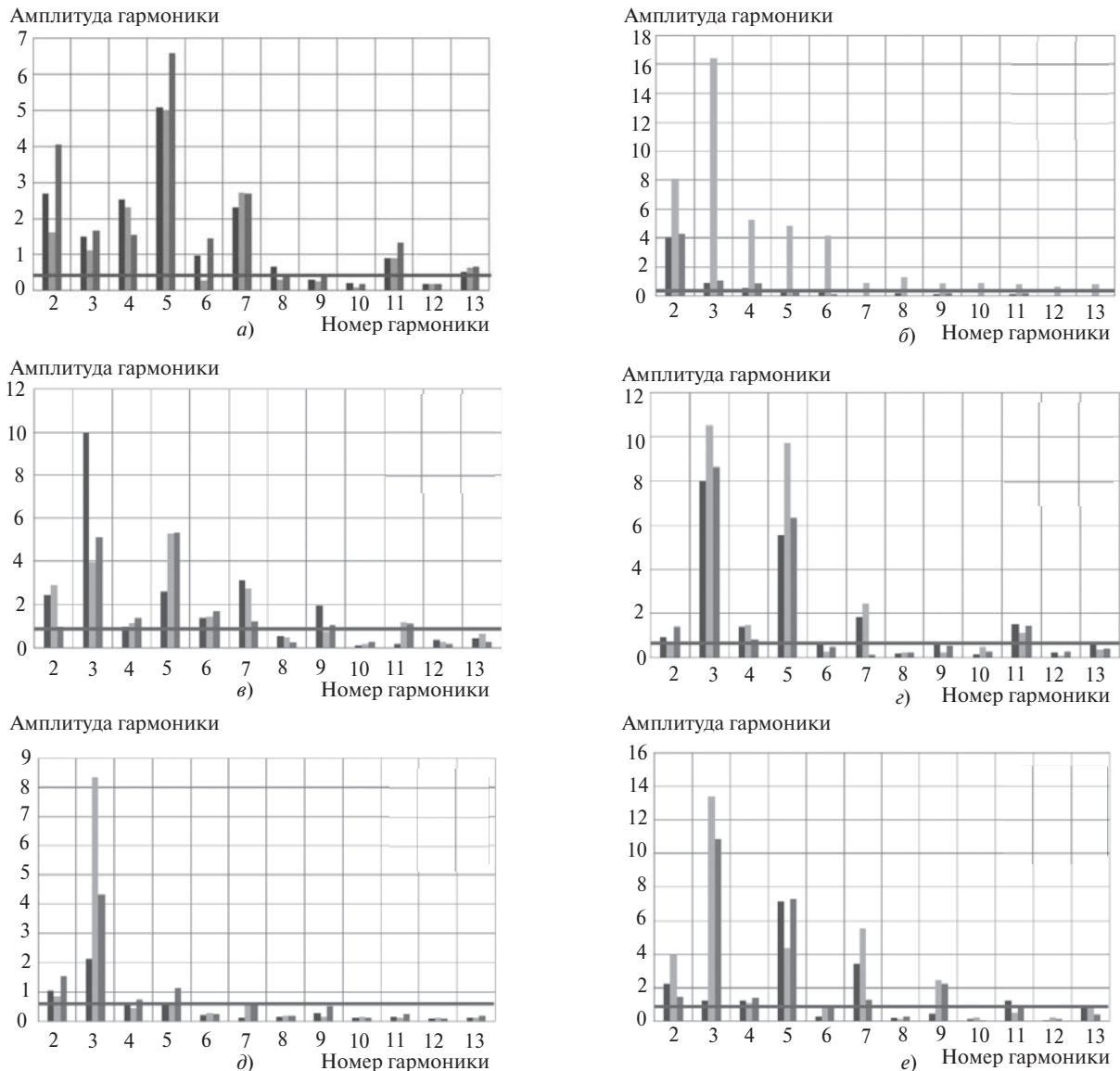


Рис. 6. Гистограммы гармонических составляющих фазного тока: ■ – фаза А; ■ – фаза В; ■ – фаза С

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фарнасов Г.А. Электротехника, электроника, электрооборудование: Учебник для вузов. – М.: ИНТЕРМЕТ ИНЖИНИРИНГ, 2000.
2. Иванушкин В.А., Сарапулов Ф.Н., Шымчак П. Структурное моделирование электромеханических систем и их элементов. – Щецин, 2000.
3. Golkar M.A., Tavakoli Bina M., Meschi S. A novel method of electrical arc furnace modeling for flicker study. – International conf. on renewable energies and power quality 2007 (ICREPQ'07), Sevilla, March 2007.
4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1961.
5. Гордиенко В.А., Дрогин В.И., Попов А.Н., Пирогов Н.А. Расчет и измерение напряжения дуги ДСП. – Сб. научных трудов ВНИИЭТО «Математическое моделирование и расчет дуговых и плазменных сталеплавильных печей». – М.: Энергоатомиздат, 1983.
6. Промышленные установки электродугового нагрева и их параметры/Под ред. Л.Е. Никольского. – М.: Энергия, 1971.
7. Электрические промышленные печи. Дуговые печи и установки специального нагрева: Учебник для вузов/Под ред. А.Д. Свенчанского. – М.: Энергоиздат, 1981.

[27.02.12]

Авторы: **Елизаров Владислав Александрович** окончил в 2010 г. Институт электротехники Московского энергетического института (МЭИ) (ТУ). Защитил в МЭИ кандидатскую диссертацию «Разработка системы управления рудно-термической печью, использующей анализ гармонического состава фазного тока» в 2012 г. Ассистент НИУ «МЭИ».

Елизаров Константин Александрович окончил в 2007 г. Институт электротехники МЭИ (ТУ). Защитил в МЭИ кандидатскую диссертацию «Совершенствование электрогидравлического регулятора мощности дуговой печи постоянного тока» в 2010 г. Ассистент НИУ «МЭИ».

Рубцов Виктор Петрович окончил в 1962 г. факультет электрификации и автоматизации промышленности и транспорта МЭИ. Защитил в МЭИ докторскую диссертацию «Создание дискретных систем управления движением рабочих органов электро-термических установок» в 1987 г. Профессор НИУ «МЭИ».