

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК.621.311.6.03

Г.Я. Вагин, А.А. Севостьянов, С.Н. Юртаев

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ДУГОВЫХ ПЕЧЕЙ И СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены электромагнитные помехи, создаваемые дугowymi печами в системах электроснабжения. Показаны два пути снижения электромагнитных помех и обеспечения электромагнитной совместимости дугowych печей с другими электроприемниками: путем схемных решений; применением фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ). Описан опыт эксплуатации различных ФКУ и даны рекомендации по выбору их типов и параметров.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, дуговые печи, системы электроснабжения.

В настоящее время на промышленных предприятиях большое распространение получили дуговые печи (ДП) для плавки различных металлов. Мощности ДП находятся в пределах от 0,5 до 150 МВ·А. Дуговые печи являются источниками мощных электромагнитных помех (ЭМП), которые могут отрицательно влиять на функционирование других электроприемников, систем автоматики, релейной защиты и ПЭВМ, приводя к их сбою или отказу. Основными видами ЭМП, создаваемыми дугowymi печами, являются: отклонения, провалы и колебания напряжения, несинусоидальность и несимметрия токов и напряжений. При наличии ЭМП системы электроснабжения должны строиться с учетом электромагнитной совместимости (ЭМС) источников помех и других электроприемников, которые питаются от этих систем электроснабжения. Под ЭМС понимается способность устройства или системы удовлетворительно функционировать в его электромагнитном окружении, не создавая недопустимых помех другим устройствам, работающим в этом окружении [1].

Электромагнитная совместимость электроприемников имеет важное практическое значение, особенно в связи с массовым внедрением в системы управления электроприемников элементов микроэлектроники и микропроцессорной техники, а также широким применением ПЭВМ и автоматизированных систем управления технологических процессов.

Электромагнитная совместимость достигается, когда уровень помехоустойчивости электроприемника выше уровня ЭМП, действующих на электроприемники в пределах электромагнитной среды, в которой он находится.

Зная назначение электроприемника, его режимы работы и характер ЭМП, которые он генерирует в сеть, выбирают класс электромагнитной среды. Для каждого класса электромагнитной среды в стандарте [2] приведены допустимые уровни ЭМП.

Электромагнитная совместимость дугowych печей и систем электроснабжения может быть обеспечена: 1) схемным путем; 2) применением специальных фильтрокомпенсирующих устройств [1, 4].

Схемные пути обеспечения ЭМС

В соответствии с п. 7.5.44 ПУЭУ допускается подключать ДП к электрическим сетям общего назначения без выполнения специальных расчетов колебаний напряжения и содержания высших гармоник, если соблюдается условие

$$\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n S_{П.Тi}^2}}{S_{кз}} \leq 0,01Д, \tag{1}$$

где $S_{П.Тi}$ – номинальная мощность i -го печного трансформатора, МВ·А; $S_{кз}$ – мощность короткого замыкания в месте подключения ДП к электрическим сетям общего назначения, МВ·А; n – число одновременно работающих печей; $Д$ – коэффициент ($Д = 1$ для ДП переменного и 2 для ДП постоянного тока).

Таким образом, для выбора точки подключения надо знать номинальные мощности печей и мощности короткого замыкания в точках подключения.

Приведем пределы мощностей короткого замыкания на различных напряжениях.

Напряжение, кВ	Мощность короткого замыкания, МВ·А
6 – 10.....	100 – 500
35.....	500 – 1200
110.....	1600 – 6000
220.....	3000 – 10000
500.....	10000 – 20000

Исходя из этих данных, без расчета ЭМС можно подключать на разные напряжения ДП следующих мощностей:

Напряжение, кВ	Подключаемая мощность, МВ·А, не более
6 – 10.....	5
35.....	12
110.....	60
220.....	100
500.....	200

Из этих данных следует, что дуговые печи мощностью выше 60 МВ·А необходимо подключать на напряжение 220-500 кВ, это в десятки раз увеличивает стоимость их систем электроснабжения. Поэтому для печей большей мощности более перспективным методом обеспечения их ЭМС является применение фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ) прямой или косвенной компенсации [4, 5].

При выборе ФКУ необходимо решить три задачи:

- 1) какое должно быть ФКУ: групповое или индивидуальные?
- 2) какое ФКУ наиболее надежное и экономичное (прямой или косвенной компенсации)?
- 3) как выбрать параметры отдельных элементов ФКУ?

Первые ФКУ, внедренные на двух металлургических предприятиях 20 лет назад (рис. 1), были предназначены для снижения электромагнитных помех от группы ДП. Двадцатилетняя практика эксплуатации ФКУ приведенных позволяет сделать следующие выводы:

ФКУ прямой компенсации (рис 1, а):

- имеет меньшую установленную мощность элементов и не генерирует высшие гармоники тока;
- имеет большое запаздывание срабатывания ($T_3 = 20$ мс) и соответственно меньший процент снижения колебаний напряжения (рис. 2);
- наблюдаются частые пробой конденсаторов при их перезарядке и отключение ФКУ для ремонтов.

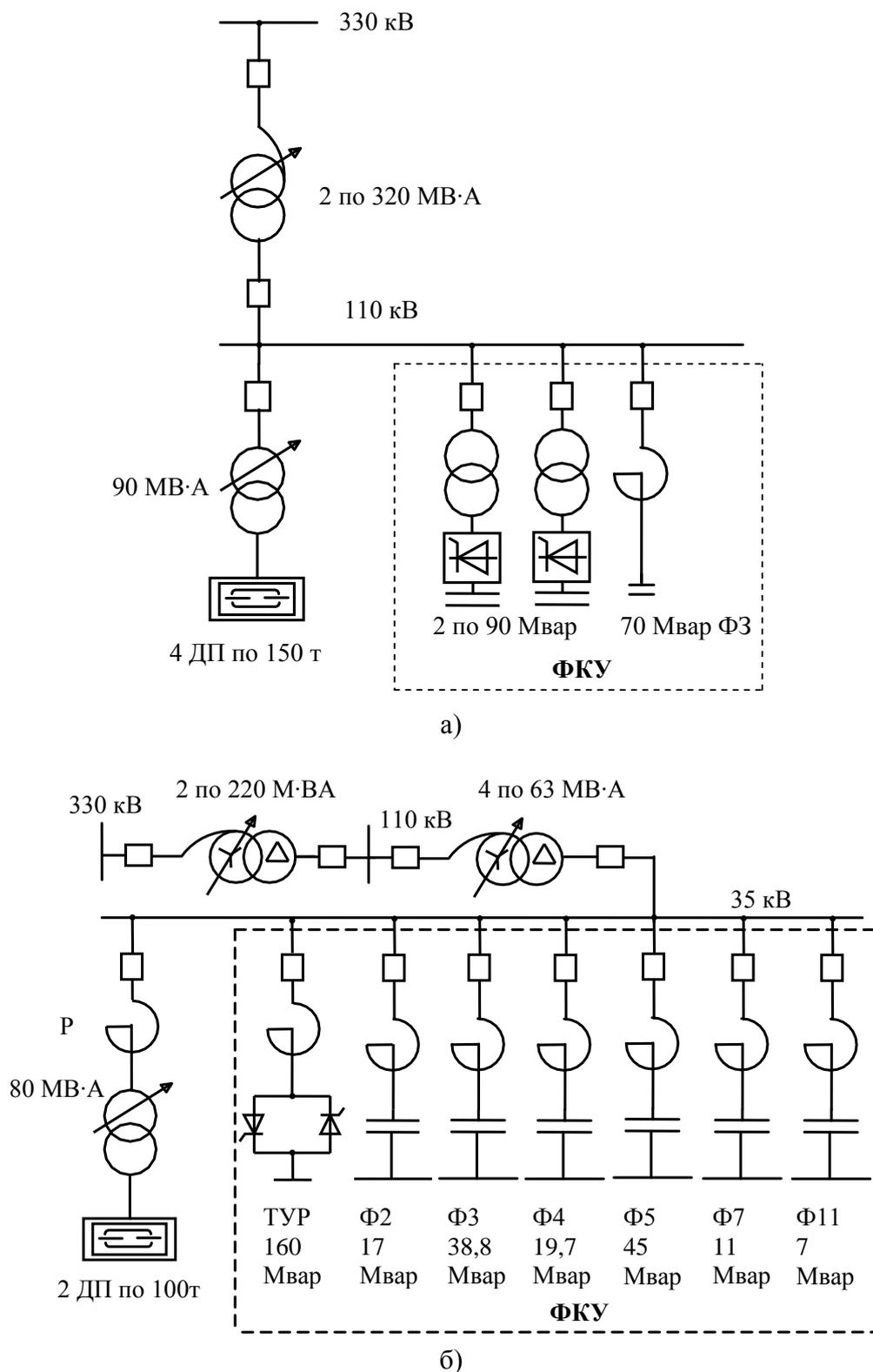


Рис. 1. Схемы ФКУ прямой (а) и косвенной (б) компенсации

ФКУ косвенной компенсации (рис. 1, б):

- имеет меньшее время запаздывания срабатывания ($T_3 = 10$ мс) и соответственно больший процент снижения колебаний напряжения (рис. 2);
- плавное регулирование и отсутствие бросков тока при регулировании;
- более надежен в работе.

На рис. 2 приведены зависимости коэффициента снижения колебаний напряжения $K_{\delta U_t}$ от степени компенсации реактивной мощности K_Q и времени T_3 запаздывания ФКУ, из которых видно, что ФКУ косвенной компенсации при $T_3 = 10$ мс может снижать колебания на 55%, а ФКУ прямой компенсации, имеющий $T_3 = 20$ мс, может снижать колебания только на 20%.

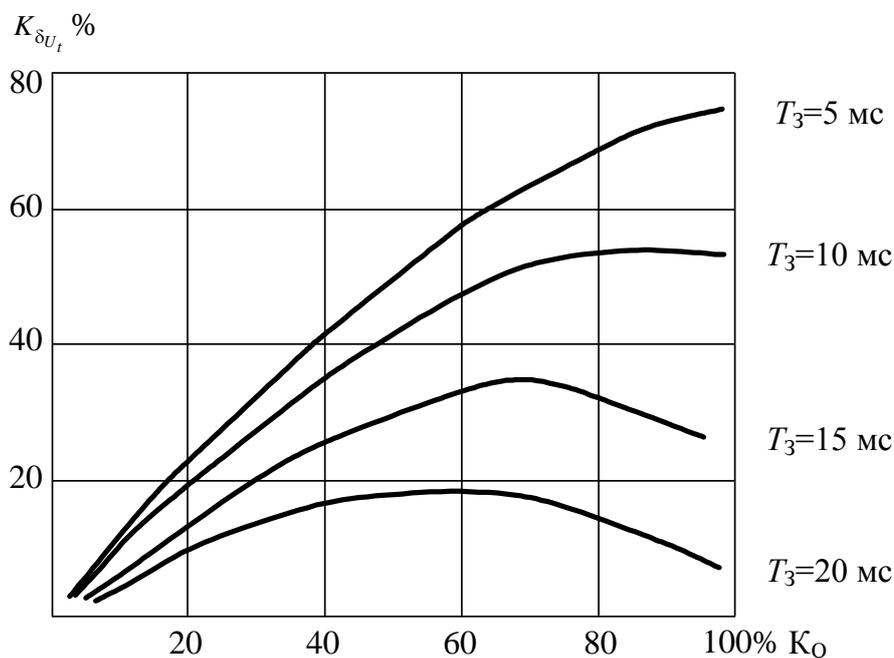


Рис. 2. Зависимости коэффициента снижения колебаний напряжения $K_{\delta U_t}$ от степени компенсации реактивной мощности K_Q и времени T_3 запаздывания ФКУ

Опыт эксплуатации ФКУ, приведенных на рис. 1, также показал, что групповой способ компенсации колебаний напряжения неэффективен, так как частота колебаний возрастает до значения

$$f_k = f_{од} \cdot 2n,$$

где $f_{од}$ – частота колебаний от одной ДП; n – число ДП.

При большой частоте колебаний ФКУ не успевает (из-за запаздывания) реагировать на все колебания, кроме этого, как видно из рис. 1, б, в ФКУ устанавливается большое количество фильтров, которые при групповой стабилизации трудно настраивать и они могут выходить из строя.

На основании опыта эксплуатации ФКУ в настоящее время как в России, так и за рубежом пришли к выводу, что надо применять ФКУ только косвенной компенсации, индивидуально на каждой ДП. На рис. 3 приведена схема ФКУ косвенной компенсации, которая смонтирована на крупной ДП мощностью 140 МВ·А на одном из металлургических предприятия [5]. Данное ФКУ состоит из управляемого тиристорами реактора ТУР мощностью 160 Мвар и трех фильтров: широкополосного С-фильтра Φ_2 мощностью 50 Мвар; настроенных фильтров на 3-ю Φ_3 и 4-ю Φ_4 гармоники мощностью 45 и 55 Мвар. Система регулирования ФКУ настроена на поддержание постоянства реактивной мощности в узле нагрузки

$$Q_{\Sigma} = Q_{ДСП} + Q_{ТУР} - Q_{\Phi_2} - Q_{\Phi_3} - Q_{\Phi_4} \geq 0.$$

В табл. 1 приведены результаты расчета ЭМП для схемы, представленной на рис. 3. Расчет проведен для нормального режима работы схемы, когда включены обе питающие линии 500 кВ ($S_{кз}$ максимальная), а также для следующих двух аварийных режимов:

- функционирует одна линия 500 кВ ($S_{кз}$ минимальная);
- автотрансформатор АТ отключен, и печь питается от шин 110 кВ, имеющих связь с другими источниками.

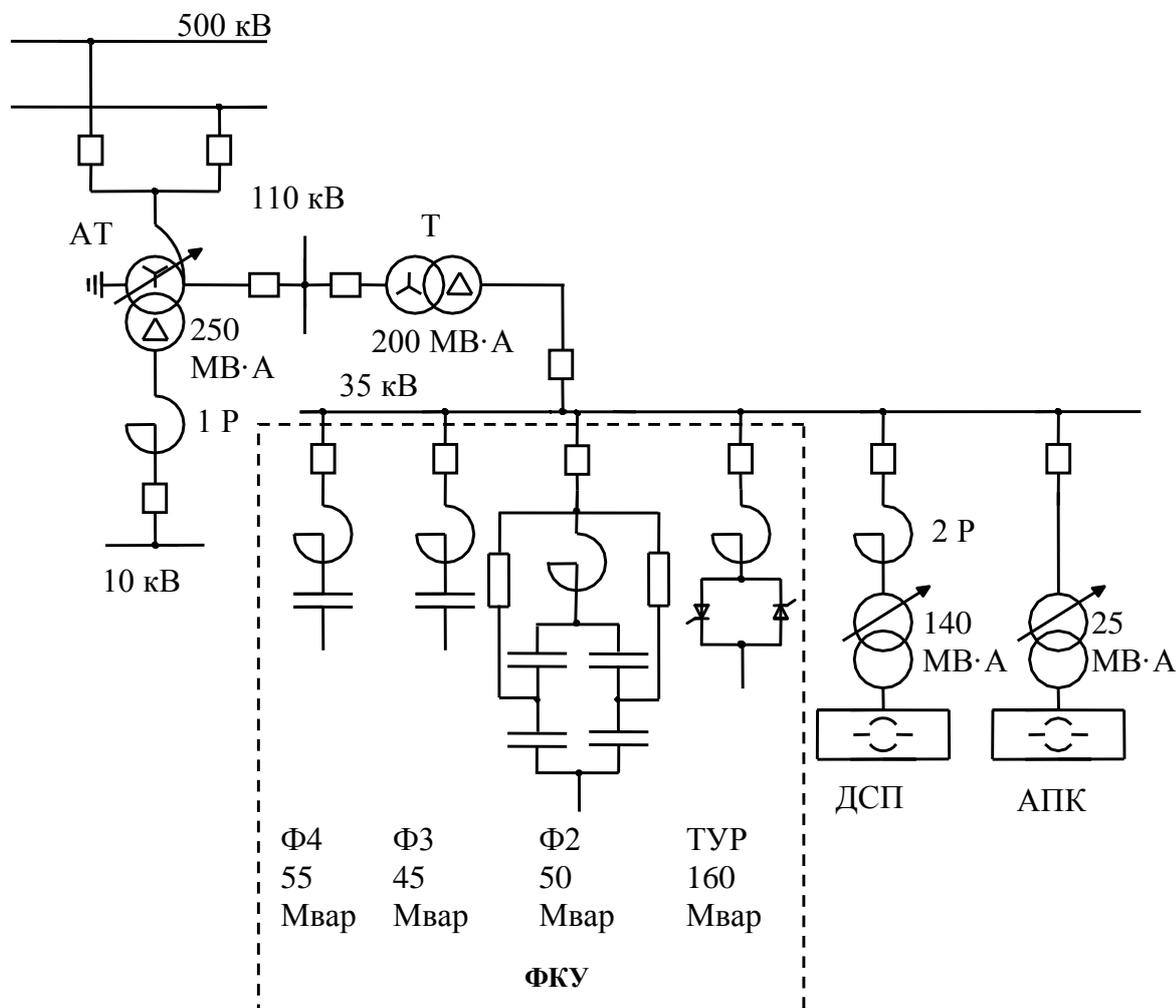


Рис. 3. Схема ФКУ косвенной компенсации, на ДП мощностью 140 МВ·А

Таблица 1

ПКЭ	Величина ЭМП при $S_{кз}$		
	на шинах 500 кВ		на шинах 110 кВ
	максимальной 17000 МВ·А	минимальной 10400 МВ·А	максимальной 4080 МВ·А
Кратковременная доза фликера: с ФКУ, о.е. без ФКУ, о.е.	0,6 0,92	0,96 1,48	2,33 3,59
Коэффициент искажения синусоидальности напряжения, %	0,26	0,41	1,29
Коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности, %	0,28	0,45	1,34

Как видно из табл. 1, в нормальном режиме работы схемы все ЭМП на шинах 500 кВ соответствуют требованиям [2], а в аварийных режимах доза фликера превышает установленную в ГОСТе норму при питании от шин 110 кВ.

Рассмотрим, как выбираются параметры ФКУ косвенной компенсации для ДП.

Принцип работы данных ФКУ, подробно описанный в [1, 4], заключается в том, что ТУР потребляет реактивную мощность в противофазе с ДП. Регулирование реактора должно производиться таким образом, чтобы осуществлялось слежение за фронтом наброса и сброса реактивной мощности ДП.

Мощность регулируемого реактора ТУР определяется в следующем порядке:

- 1) определяется максимальный размах колебания на шинах источника питания, %:

$$\delta U_{t \max} = \frac{S_{\text{ПТ}} \cdot 100}{S_{\text{КЗ}}}, \quad (2)$$

где $S_{\text{ПТ}}$ – номинальная мощность печного трансформатора, МВ·А; $S_{\text{КЗ}}$ – мощность КЗ на шинах источника питания, МВ·А;

- 2) максимальный размах колебаний сравнивается в допустимым $\delta U_{\text{тд}}$ в соответствии с [1]:

$$\delta U_{\text{тд}} \geq \delta U_{t \max}. \quad (3)$$

Если неравенство (3) на шинах источника питания выполняется, то ФКУ устанавливаются без реактора ТУР, если не выполняется, определяется коэффициент уменьшения колебаний

$$K_{\delta U_t} = \frac{(\delta U_{t \max} - \delta U_{\text{тд}})}{\delta U_{t \max}}; \quad (4)$$

- 3) зная время запаздывания ФКУ (по данным завода изготовителя) по рис. 2 определяется коэффициент компенсации K_Q ;

- 4) вычисляется реактивная мощность ТУР, Мвар:

$$Q_{\text{ТУР}} = \frac{K_Q}{100} Q_{\text{МП}}, \quad (5)$$

где $Q_{\text{МП}}$ – максимальная реактивная мощность печи, Мвар (определяется или по графикам нагрузки печей или принимается равной номинальной реактивной мощности печи);

- 5) определяется мощность статического звена ФКУ, состоящего из фильтров высших гармоник, она определяется по $\text{tg } \varphi_{\text{эс}}$, который для таких потребителей задается энергосистемой

$$Q_{\text{Ф}} = P_{\text{П}} (\text{tg } \varphi_{\text{П}} - \text{tg } \varphi_{\text{ЭС}}); \quad (6)$$

где $P_{\text{П}}$ – расчетная активная мощность печи, МВт (определяется из технологических графиков); $\text{tg } \varphi_{\text{П}}$ – коэффициент реактивной мощности ДП;

- б) на основании спектрального состава токов генерируемых ДП и ТУР определяется количество фильтров высших гармоник.

В табл. 2 приведен процентный состав гармоник тока генерируемых ДП и ТУР мощностью от 50 до 150 МВ·А, по данным завода изготовителя.

Таблица 2

Порядок гармоник	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
ДП, %	5,0	6,0	3,0	4,0	1,5	2,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,3	0,2
ТУР, %*	-	-	-	5,1	-	2,6	-	-	-	1,1	-	0,8

* Обмотки ТУР соединены треугольником.

Опыт эксплуатации ФКУ [5] показал, что для снижения уровней высших гармоник до требований [2] достаточна установка трех фильтров (рис. 3). Фильтры на 3 и 4-ю гармоники являются настроенными на частоты 147,5 и 197,5 Гц соответственно. Фильтр на 2-ю гармонику является широкополосным фильтром типа С, он имеет малое сопротивление широкому спектру гармоник, что позволяет сократить количество фильтров в ФКУ и снизить в них потери электроэнергии.

Как показано в [3], требования к точности настройки фильтров зависят от коэффициента K_p , который определяется по выражению

$$K_p = \frac{Q_{\Phi i}}{S_{КЗ}}, \quad (7)$$

где $S_{КЗ}$ – мощность КЗ на шинах, где устанавливаются фильтры, МВ·А.

Если $K_p \geq 1,5 \cdot 10^{-2}$, то можно сократить число фильтров и снизить требования к их точности настройки. Расчеты показывают, что для систем электроснабжения с ДП K_p всегда больше $1,5 \cdot 10^{-2}$.

Суммарная мощность батарей фильтров должна быть равна или больше Q_{Φ} по (6).

Мощность батарей конденсаторов в каждом фильтре определяется по выражению

$$Q_{\Phi i} \geq 1,2 K_{СХ} \cdot I_{n\Sigma} \cdot U_{НОМ.Б}; \quad (8)$$

где $K_{СХ}$ – коэффициент, зависящий от схемы соединения конденсаторов в фильтре ($K_{СХ} = 3$ при звезде и $K_{СХ} = \sqrt{3}$ при треугольнике); $I_{n\Sigma}$ – действующее значение гармоник тока, протекающих через фильтр расчетной гармоники n_p ; $U_{НОМ.Б}$ – номинальное напряжение конденсаторов в фильтре.

Ток $I_{n\Sigma}$ определяется по выражению

$$I_{n\Sigma} = \sqrt{\sum_1^k (I_{n_q} \sigma_{n_q})^2}, \quad (9)$$

где I_{n_q} – ток n_q -й гармоники; σ_{n_q} – доля тока n_q -й гармоники протекающего через фильтр n_p ; k – число гармоник, протекающих через фильтр.

Ток I_{n_q} определяется по табл. 2.

Коэффициент σ_{n_q} определяется по выражениям [3]:

- при одном фильтре

$$\sigma_{n_q} = \frac{1}{\frac{1 - n_{q*}^2}{\kappa_p n_p^2} + 1}; \quad (10)$$

- при двух фильтрах

$$\sigma_{n_{q,1}} = \frac{1}{\frac{1 - n_{q,1*}^2}{\kappa_{p,1} \cdot n_{p,1}^2} + \frac{\kappa_{p,2} \cdot n_{p,2}^2}{\kappa_{p,1} \cdot n_{p,1}^2} \cdot \frac{1 - n_{q,1*}^2}{1 - n_{q,2*}^2} + 1}; \quad (11)$$

$$\sigma_{n_{q,2}} = \frac{1}{\frac{1-n_{q2}^2}{\kappa_{p2} \cdot n_{p2}^2} + \frac{\kappa_{p1} \cdot n_{p1}^2}{\kappa_{p2} \cdot n_{p2}^2} \cdot \frac{1-n_{q2}^2}{1-n_{q1}^2} + 1}; \quad (12)$$

где $n_{q^*} = \frac{n_p}{n_q}$; $n_{q1^*} = \frac{n_{p1}}{n_{q1}}$; $n_{q2^*} = \frac{n_{p2}}{n_{q2}}$; $\kappa_{p1} = \frac{Q_{\phi 1}}{S_{\kappa 3}}$; $\kappa_{p2} = \frac{Q_{\phi 2}}{S_{\kappa 3}}$.

Сопротивление реактора фильтров определяется по выражению

$$x_p = \frac{U_{\text{НОМБ}}^2}{Q_{\phi} n_p^2}; \quad (13)$$

Выбор параметров фильтра типа С подробно изложен в [6]. После выбора параметров всех трех фильтров производится проверка остаточных напряжений всех гармоник.

$$\Delta U_{n_{q^*}} = U_{n_{q^*}} (1 - \sigma_{n_{q^*}}); \quad (14)$$

где $U_{n_{q^*}}$ – напряжение гармоники до установки фильтра.

Остаточные напряжения сравниваются с нормами ГОСТ 13109-97:

$$\Delta U_{n_{q^*}} \leq U_{нд^*}. \quad (15)$$

Если неравенство (15) выполняется для всех гармоник, то расчет заканчивается, если нет, то необходимо установить еще один фильтр на гармонику, где $\Delta U_{n_{q^*}} \geq U_{нд^*}$.

Напряжение гармоник до установки фильтра находится по выражению [1]:

$$U_{n_q} = \frac{I_{n_q}}{|Y_{\Sigma q}|}, \quad (16)$$

где $Y_{\Sigma q}$ – суммарная проводимость схемы замещения от ДП до фильтра [1].

Пофазное регулирование обмоток ТУР позволяет снижать также несимметрию напряжения в сетях с дуговыми печами.

Выводы

1. Для повышения качества электроэнергии в электрических сетях с дуговыми печами рекомендуется применять индивидуальные фильтрокомпенсирующие установки косвенной компенсации.

2. Применение ФКУ позволяет также увеличить вводимую в печь мощность (за счет стабилизации напряжения), снижает время плавки и повышает производительность ДП.

Библиографический список

1. **Вагин, Г.Я.** Электромагнитная совместимость в электроэнергетике / Г.Я. Вагин, А.Б. Лоскутов, А.А. Севостьянов. – Н.Новгород: НГТУ, 2004. – 214 с.
2. ГОСТ Р 51317.2.4-2000. Уровни электромагнитной совместимости для низкочастотных кондуктивных помех в системах электроснабжения. – М.: Изд-во стандартов. 2000.

3. **Жежеленко, И.В.** Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко, М.Л. Рабинович, В.М. Божко. – Киев: Техніка, 1981. – 160 с.
4. **Иванов, В.С.** Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / В.С. Иванов, В.И. Соколов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336 с.
5. **Вагин, Г.Я.** К вопросу об экономической целесообразности применения на промышленных предприятиях сверхмощных дуговых печей // Промышленная энергетика. 2009. № 2. – С 35-37.
6. **Коверникова, Л.И.** Применение фильтров С-типа для нормализации напряжений высших гармоник в сети с распределенной нелинейной нагрузкой // Сб. докладов 10-й НТК по электромагнитной совместимости. – СПб., 2008. – 350 с.

*Дата поступления
в редакцию 12.03.2010*

G. Vagin, A. Sevostianov, S. Yurtaev

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF ARC-TYPE FURNACES AND SYSTEMS OF ELECTRIC ENERGY SUPPLY

The article deals with electromagnetic interferences created by arc-type furnaces in the systems of electric energy supply. Two ways to reduce electromagnetic interference and to provide electromagnetic compatibility of arc-type furnaces with other electrical receivers are demonstrated: schematic solutions; application of filter compensating devices (FCD). Experience of application of various FCD is described and recommendations on the choice of their types and parameters are given.

Key words: Electromagnetic compatibility, arc-type furnaces, systems of electric energy supply.