

## ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА УКРАИНЫ

*Ю.А. Папаика, А.Г. Лысенко, Национальный горный университет, Украина*

Приведены результаты анализа показателей электромагнитной совместимости систем электроснабжения угольных шахт и металлургических комбинатов. Дана оценка состоянию электрических сетей при наличии мощных нелинейных нагрузок. Предложены способы обеспечения электромагнитной совместимости в условиях отсутствия нормативной базы и стихийного использования преобразователей энергии.

Проведение мониторинга показателей электромагнитной совместимости (ЭМС) в системах электроснабжения угольных шахт и металлургических предприятий показал несоответствие реальных значений показателей качества электроэнергии действующим нормам ГОСТ [1]. В течение последних пяти лет на угольных шахтах были установлены мощные преобразовательные устройства для питания электроприводов основных технологических установок (подъем, вентиляторы главного проветривания, транспорт, водоотлив). В большинстве случаев установка новой техники осуществлялась без согласования с параметрами питающей сети, что привело к резкому снижению показателей качества электроэнергии (несимметрия, несинусоидальность, доза фликера). Это стало возможным благодаря отсутствию нормативной базы во взаимоотношениях предприятий и энергоснабжающей компании, в результате чего невозможно применить систему штрафов за ухудшение показателей качества напряжения.

Целью данной статьи является укрупненный анализ состояния показателей ЭМС в системах электроснабжения угольных шахт и металлургических предприятий, поскольку горно-металлургическая промышленность является основным донором обеспечения ВВП Украины.

Особенностью систем электроснабжения металлургических комбинатов являются короткие сети, мощный источник нелинейных искажений - дуговая сталеплавильная печь (ДСП). Кроме того, для технологических операций разливки и проката металла используется до 90% преобразованной энергии (двигатели постоянного тока, частотные преобразователи). Все это создает систематическую генерацию электромагнитных помех в систему электроснабжения частотой 100-3000 Гц. Кроме того согласно последним исследованиям доля интергармонических составляющих в искаженном спектре составляет до 40 % [2]. Высшие гармоники и интергармоники в электрических сетях нежелательны из-за целого ряда последствий для системы электроснабжения – они негативно влияют на техническое состояние электрооборудования и ухудшают экономические показатели его работы. Все это определяет наличие дополнительных потерь мощности и энергии, которые ухудшают тепловой режим электрооборудования, усложняют компенсацию реактивной мощности с помощью батарей статических конденсаторов, сокращается срок работы электрических машин и аппаратов из-за ускоренного старения изоляции, наблюдаются сбои в работе устройств системной и сетевой автоматики, средств телемеханики.

Действие высших гармоник неявно выражено и имеет кумулятивный эффект, поэтому их последствия, в виде разрушения изоляции электрических машин и кабелей, проявляются через определенный промежуток времени. Искажение формы кривой напряжения влияет на возникновение и протекание ионизационных процессов в изоляции. При наличии газовых включений в изоляции возникает ионизация, физический смысл которой заключается в создании объемных зарядов и последующей их нейтрализации. Нейтрализация зарядов связана с рассеиванием энергии, следствием чего есть электрическое, механическое и химическое влияние на окружающий диэлектрик. Все это вызывает развитие местных дефектов в изоляции, что приводит к сокращению срока службы изоляции. При наличии высших гармоник в кривой напряжения процесс старения изоляции протекает более

интенсивно, особенно в кабелях и конденсаторах. Некоторые авторы утверждают, что при значении высших гармоник в 5% через два года эксплуатации  $\text{tg} \delta$  конденсаторов увеличивается в два раза. При протекании токов высших гармоник по элементам электрических сетей и электрооборудованию потребителей возникают дополнительные потери активной мощности и электрической энергии. Наибольшее значение потерь активной мощности от высших гармоник наблюдается в трансформаторах, двигателях, генераторах, воздушных и кабельных линиях электропередач. Увеличение активных сопротивлений указанных элементов с увеличением частоты пропорциональны номеру гармоники, несмотря на то, что это несколько неточное приближение [2]. В некоторых случаях дополнительные потери могут привести к недопустимому перегреву и выходу из строя электрооборудования. Значение дополнительных потерь активной мощности и энергии определяется режимом работы электрооборудования и уровнем высших гармоник в сети.

Значение дополнительных потерь активной мощности в воздушных и кабельных ЛЭП определяется следующим образом [3]:

$$\Delta P_{\text{донв}} = 3 \sum_{v=3}^n I_v^2 R_v, \quad (1)$$

где  $I_v$  - ток  $v$ -й гармоники;  $R_v$  - сопротивление активное сопротивление КЛ на частоте  $v$ -й гармоники.

В общем виде активное сопротивление кабельных ЛЭП рекомендуется определять по зависимости [3]:

$$R_v = R_2 K_r K_{rv}, \quad (2)$$

где  $R_2 = r_0 l$  - активное сопротивление обратной последовательности ЛЭП;  $K_r = \sqrt{v}$  - коэффициент, который учитывает изменение активного сопротивления от частоты;  $K_{rv}$  - поправочный коэффициент, который учитывает распределенность параметров в схеме замещения (поскольку длины кабелей менее 1 км, то распределенность параметров можно не учитывать, поэтому  $K_{rv} = 1$ ).

Дополнительные потери в трансформаторах на частотах ВГ пропорциональны значению:

$$\sum_{n=2}^n \frac{U_{nx}}{n\sqrt{n}} = \sum_{n=2}^n \Lambda_n U_{nx}, \quad (3)$$

где  $\Lambda_n = \frac{1}{n\sqrt{n}}$  - коэффициент гармонических потерь.

Выражение для оценки потерь на частотах ВГ:

$$\Delta P_n = \Delta P_{\text{ном}} \rho \sum_{n=2}^n \Lambda_n U_{nx}, \quad (4)$$

где  $\rho$  - индекс высших гармоник для трансформаторов:  $\rho_{\text{mp}}^{\text{ВГ}} = \frac{0,6}{u_{\kappa}^2}$ , где  $u_{\kappa}$  - напряжение

короткого замыкания.

Расчет дополнительных потерь для суточного и месячного графика электрических нагрузок предприятия показал, что значения потерь в электрооборудовании составляет 3-5% от номинальных. На первый взгляд потери незначительны, однако разрушительное действие гармоник пролонгировано во времени и должно оцениваться в электромагнитном и технологическом ущербах на определенном промежутке времени.

Несимметрия напряжений в системах электроснабжения металлургических предприятия обусловлена наличием мощной трехфазной нагрузки длительно работающей в несимметричном режиме - дуговая сталеплавильная печь. При несимметрии напряжений в трехфазных сетях

появляются дополнительные потери в элементах электросетей, сокращается срок службы ламп и электрооборудования и снижаются экономические показатели его работы.

В электрических машинах переменного тока возникают магнитные поля, вращающиеся с синхронной скоростью в направлении вращения ротора и с двойной синхронной скоростью в противоположном. В результате возникает тормозной электромагнитный момент, а также дополнительный нагрев активных частей машины, главным образом ротора, за счет токов двойной частоты. В асинхронных двигателях (АД) при коэффициентах обратной последовательности напряжений, встречающихся на практике ( $K_{2U} \leq 0,05 \dots 0,06$ ) снижение вращающего момента АД оказывается пренебрежимо малым. Влияние несимметрии на потери в электродвигателе и, следовательно, нагрев и сокращение срока службы изоляции его проявляются в большей мере. При несимметрии напряжений сети в синхронных двигателях (СД) наряду с возникновением дополнительных потерь и нагревом статора и ротора могут возникнуть опасные вибрации в результате появления знакопеременных вращающих моментов и тангенциальных сил, пульсирующих с двойной частотой сети.

При значительной несимметрии вибрация может оказаться опасной, в особенности при недостаточной прочности или наличии дефектов сварных соединений. При несимметрии токов, не превышающей 30 %, опасные перенапряжения в элементах конструкций, как правило, не возникают [3].

Электромагнитные потери при несимметрии напряжения в сети:

$$\Delta P_{nc} = \Delta P_{ном} \rho_{nc} K_{2U}^2, \quad (5)$$

где  $K_{2U}$  – коэффициент несимметрии, о.е.

Индекс несимметрии для трансформаторов  $\rho_{mp}^{HC} = \frac{1}{u_{\kappa}^2}$ .

Анализируя данные о технологических перекосах фазных первичных токов трансформатора ДСП можно утверждать, что несимметрия напряжений при расплавлении металла составляет до 4%, а при отключении дуги на одном из электродов может достигать 10% (рис. 1, 2). Данные были получены путем статистической обработки результатов измерения режимных параметров печи на предприятии МЗ «Днепросталь» (г. Днепро, Украина). Причем установлено, что неполнофазные режимы горения дуги могут составлять до 10% времени плавки.

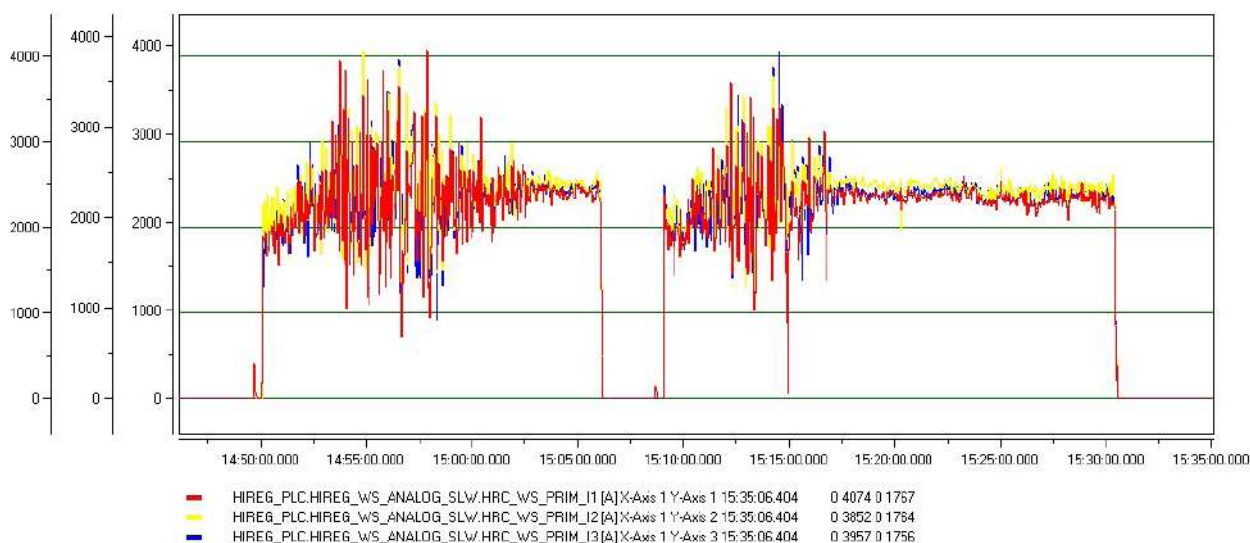


Рис. 1. Изменение фазных первичных токов трансформатора ДСП за время одной плавки

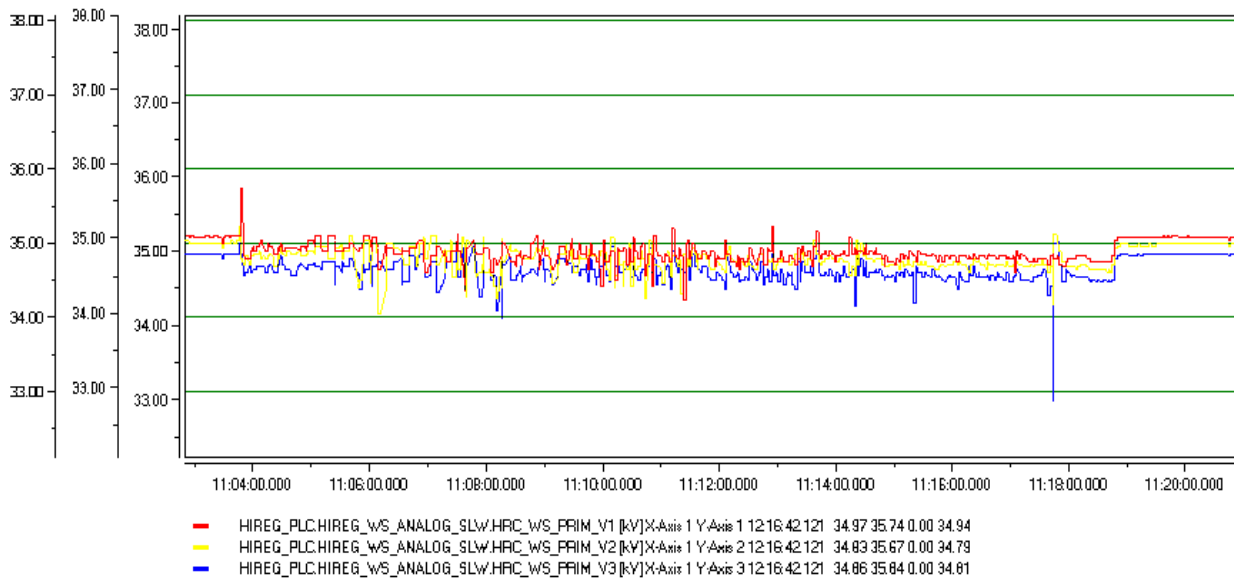


Рис. 2. Изменение фазных первичных напряжений трансформатора ДСП за время одной плавки

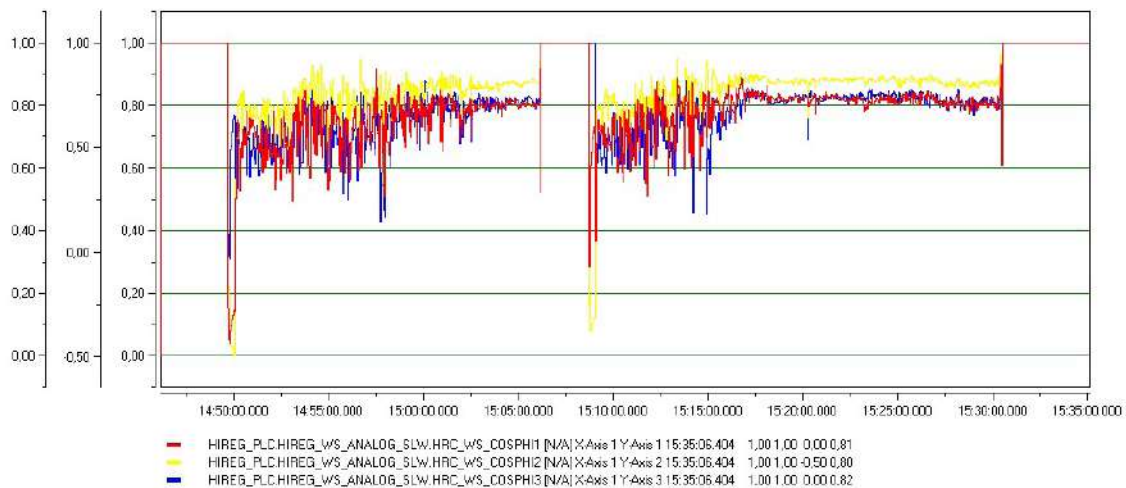


Рис. 3. Изменение фазных  $\cos\varphi$  за время одной плавки

Выполнен оценочный расчет дополнительных потерь мощности в трансформаторах завода от несимметрии в нормальных режимах (плавка на трех фазах) и режимах плавки на двух фазах (анормальный режим). При этом учитывались реальные графики электропотребления, расчет номинальных потерь выполнен методом графического интегрирования. При этом показано процентное содержание дополнительных потерь в общих потерях на частоте 50 Гц при симметричном питании.

Значение потерь при несимметрии в рабочем трансформаторе:

$$\Delta P_{нс1} = \Delta P_{ном} \rho_{нс} K_{2U}^2 = 280,8 \cdot \frac{1}{0,095^2} \cdot 0,04^2 = 44,9 \text{ кВт} .$$

$$\Delta P_{нс2} = \Delta P_{ном} \rho_{нс} K_{2U}^2 = 280,8 \cdot \frac{1}{0,095^2} \cdot 0,1^2 = 280 \text{ кВт} .$$

где  $\Delta P_{ном} = k_3^2 \Delta P_{кз} = 0,81^2 \cdot 428 = 280,8 \text{ кВт}$  - потери мощности при симметричном напряжении.

Кафедрой систем электроснабжения Национального горного университета был проведен аудит показателей ЭМС в системах электроснабжения угольных шахт ДТЕК «Павлоградуголь». Наибольшие превышения допустимых значений выявлены на шахтах, которые провели реконструкцию электрооборудования стационарных установок с применением частотных преобразователей (рис. 4). Также выявлено проявление резонансных явлений при включении статических батарей конденсаторов. Ситуация несколько лучше на шахтах, которые установили регулируемые ФКУ с поддержанием коэффициента мощности.

Резонансы наиболее выражены на шахте «Благodatная» при работе угольного подъема:

4-я гармоника	–	0,8%	→	1,4%	→	1,75 раза;
5-я гармоника	–	2,7%	→	6,2%	→	2,3 раза;
6-я гармоника	–	0,7%	→	4,3%	→	6,1 раза;
7-я гармоника	–	2,4%	→	12,8%	→	5,3 раза.

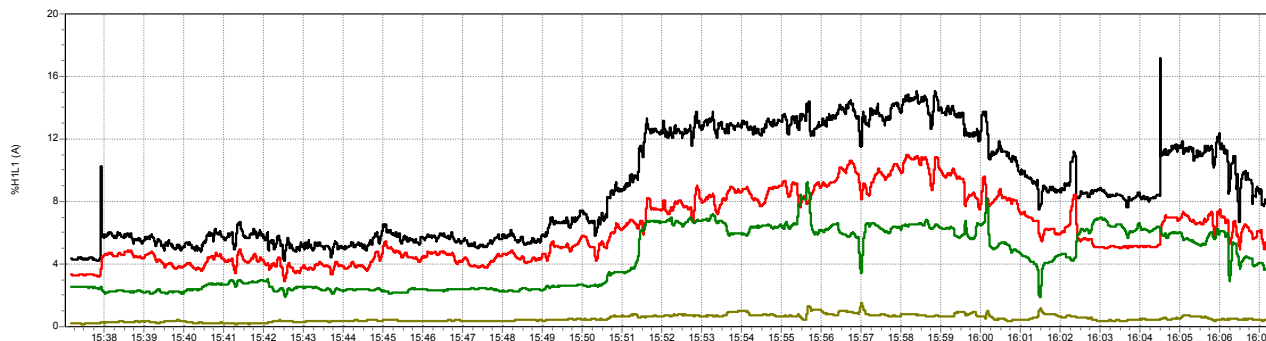


Рис. 4. Зависимость коэффициента искажения синусоидальности (THD) и высших гармоник напряжения и тока от режимов работы шахты

#### Выводы

1. Несинусоидальность напряжения в системах электроснабжения металлургических комбинатах в диапазоне частот 100-250 Гц находится в допустимых нормах из-за обязательного наличия фильтро-компенсирующих устройств. В то же время на более высоких частотах наблюдаются значительные отклонения от допустимых значений. Несимметрия напряжений в нормальных режимах плавки находится в пределах  $K_{2U}=2...4\%$ . Однако в кратковременных режимах, при отключении дуги в одной из фаз, значение коэффициента несимметрии по обратной последовательности повышается  $K_{2U}=4...10\%$ . Дополнительные потери активной мощности в силовых трансформаторах при этом повышаются примерно в 6 раз. Следует всячески исключать режимы несимметрии, что достигается прежде всего правильной технологией плавки.

2. Качество напряжения в системах электроснабжения угольных шахт искажено, прежде всего, мощными преобразователями частоты, которые эксплуатируются без соответствующих фильтров. При этом наблюдаются превышения уровней 5, 7, 11, 13 и 19 гармоник. Оценка интергармонического спектра показала значения 28-34% энергии интергармоник в искаженном спектре. Значения несимметрии напряжения незначительны из-за практически полного отсутствия несимметричных нагрузок.

#### Список литературы

1. Пивняк Г.Г., Жежеленко И.В., Папаика Ю.А. Расчеты показателей электромагнитной совместимости [текст]: Э45. Учебное пособие / — Д.: Национальный горный университет, 2014. — 114 с.
2. Папаика Ю.А. Рациональные режимы электропотребления печей сопротивления: Дис. канд. техн. наук: 05.09.03. — Дніпропетровськ, 2011. — 197 с.
3. Жежеленко И.В., Шидловський А.К., Півняк Г.Г., Саєнко Ю.Л. Електромагнітна сумісність у системах електропостачання: Підручник / — Д.: Нац. гірнич. ун-т, 2009. — 319 с.: іл.