

засвідчив про необхідність уведення залежного обмеження ЕРС в контурі регулювання для виключення коливань напруги.

3. Запропонована система АРЗ у випадках, близьких до коротких замикань (КЗ2, рис.8), не забезпечує потрібної швидкості гасіння струму збудження, що потребує введення в силову частину додаткових елементів, наприклад, форсуючого перетворювача, це виконано в системі СТС з переводом його для гасіння в інверторний режим.

Список літератури

1. Дьяков А.Ф. Актуальность производства средств малой энергетики и мотивы его осуществления. // Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы». – 2004. – № 8. – С. 32.
2. Буров В.Д. Газотурбинные и газопоршневые энергетические установки малой мощности / В.Д. Буров // Горн. журн. – 2004. – № 9. С. 87–89.
3. Вагин Г. Я. Технические и экономические критерии выбора мощности мини-ТЭЦ на промышленных предприятиях / Г. Я. Вагин, А. Б. Лоскутов // Промышленная энергетика. – 2006. – № 5. – С. 145.
4. Паньків В.В. Когенерація: як це працює. Обзор рынка // Сети и бизнес. – 2010. – №4. – С.96-101.
5. Бублиенко А.А. Технология когенерации и тригенерации [Электронный ресурс] / А.А. Бублиенко // Технология когенерации и тригенерации. – Режим доступа: <http://www.ekvent.com.ua/>
6. Матюнина Ю.В., Харитонов Д.А. Использование газопоршневых установок при регулировании нагрузки предприятия / Ю.В. Матюнина, Д.А. Харитонов // Вестник МЭИ. – 2007. – № 2. – С. 111-113.
7. Басок Б.И. Анализ когенерационных установок / Б.И. Басок, Е.Т. Базеев, В.М. Диденко // Промышленная теплотехника. – 2006. – № 3. – С. 83–89.
8. Овчаренко Н.И. Автоматика электрических станций и электроэнергетических систем : Учеб. для вузов / Под редакцией А.Ф. Дьякова – М. : НЦ ЭНАС, 2000. – 504 с.
9. Голдинер А.Я. Газопоршневые электроагрегаты / А.Я. Голдинер, М.И. Цыркин, В.В. Бондаренко. – М. : Галея Принт, 2006. – 240 с.
10. Юрганов А.А. Регулирование возбуждения синхронных генераторов / А.А. Юрганов, В.А. Кожевников. – С.Пб.: Наука, 1996. – 138 с.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Синчуком О.М.

УДК 537.53

М.В. Рогоза, канд. техн. наук, Ю.А. Папаика, канд. техн. наук, А.Г. Лысенко

(Украина, г. Днепрпетровск, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет»)

ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ТЯГОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ РУДНИЧНОГО ТРАНСПОРТА

При пуске транспортного комплекса с индуктивной передачей энергии в условиях угольных шахт опасных по газу и пыли в реальных условиях основным проблемным вопросом обеспечения электромагнитной совместимости тяговых преобразователя частоты (ТПЧ) с сетью стали высшие гармоники (ВГ) и несимметрия (НС) напряжений [1, 2]. Поскольку подземные шахтные сети обладают ограниченными значениями мощности КЗ из-за специфических норм и требований к системам электроснабжения угольных шахт (искробезопасность, обособленное питание подземных электроприемников, большая протяженность кабельных линий), то высшие гармоники и несимметрия в подземных сетях являются проблемным вопросом. Практически отсутствует возможность снижения уровней указанных электромагнитных помех стандартными сетевыми методами, которые распространены в общепромышленных системах электроснабжения. Также следует отметить, что уже на протяжении более 10 лет в специальной литературе активно обсуждаются проблемы, связанные с интергармониками, которые генерируются преобразователями в сеть [3-5]. Таким образом, вопрос электромагнитной совместимости ТПЧ с учетом новых обстоятельств и состояния современных систем электроснабжения не утратил своей актуальности и требует решения.

В схеме ТПЧ (рис. 1) использована 6-пульсная мостовая схема, где преобладающими являются 5, 7, 11, 13-я гармоники, называемые каноническими, уровни которых (по отношению к 1-й гармонике) обратно пропорциональны номеру, т.е. $1/5, 1/7, 1/11, 1/13$ и т.д.

В практике расчета ВГ вентильных преобразователей различных типов выпрямитель учитывается как источник канонических ВГ тока, уровень которых обратно пропорционален номеру гармоник. Это соответствует случаю, когда индуктивность цепи постоянного тока $L_d = \infty$, а индуктивность контура коммутации $L_k = 0$ [3]. Кривые линейных токов имеют прямоугольно-ступенчатую форму длительностью

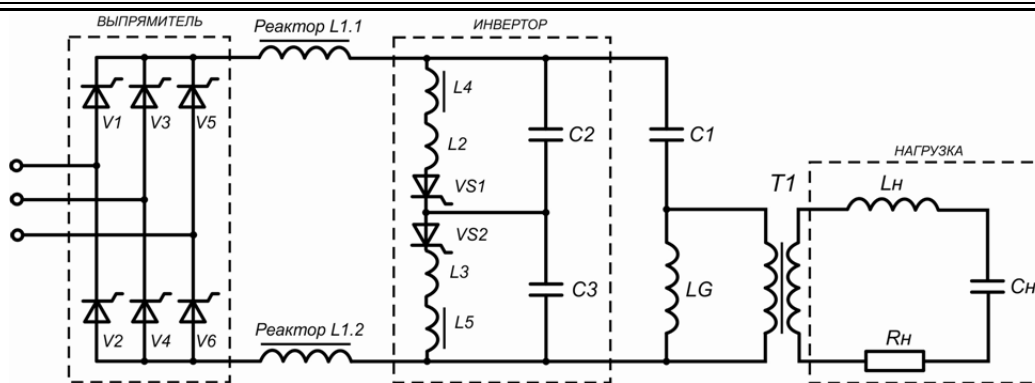


Рис. 1. Электрическая схема тягового преобразователя частоты

120 электрических градусов. В реальных условиях, в зависимости от соотношения L_d и L_k , эти кривые деформированы вследствие наличия пульсирующей составляющей цепи постоянного тока (рис. 2).

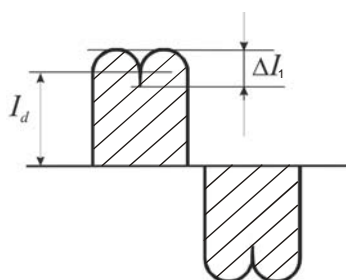


Рис. 2. Форма кривой сетевого тока ВП при $L_d \neq \infty$

Наличие пульсаций сказывается на значении канонических гармоник в той мере, чем больше глубина пульсации, характеризуемая коэффициентом пульсации:

$$\lambda_I = \frac{I_{6m}}{I_d}$$

Для основной гармоники $I_1 = I_d (1,10 + 0,14 \lambda_I)$.

Для амплитуды канонических гармоник:

$$I_n = 100 \left(\frac{1}{n} + \frac{6,46 \lambda_I}{n-1} - \frac{7,13 \lambda_I}{n} \right) (-1)^k \text{ для } n = k_p - 1;$$

$$I_n = 100 \left(\frac{1}{n} + \frac{6,46 \lambda_I}{n+1} - \frac{7,13 \lambda_I}{n} \right) (-1)^k \text{ для } n = k_p + 1.$$

При определенных значениях λ_I относительные величины канонических ВГ могут быть рассчитаны по выражениям [2-3]:

n	5	7	11	13
$I_n^{(\lambda)}$	$0,2 + 0,9 \lambda_I$	$0,14 + 0,21 \lambda_I$	0,091	$0,076 - 0,0087 \lambda_I$

Выражение для λ_I можно представить в виде:

$$\lambda_1 = \frac{U_{d0} K_{d6} \cos \alpha}{6 \omega_1 L_d I_d}$$

где U_{d0} – амплитуда выпрямленного напряжения; K_{d6} – коэффициент, учитывающий напряжение 6-й гармоники.

На рис. 3 представлены кривые зависимости четырех канонических гармоник в сети и двух гармоник постоянного тока.

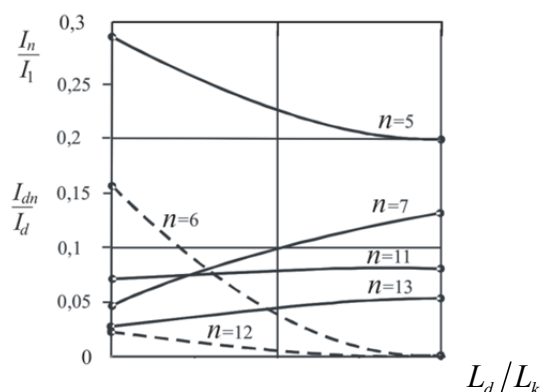


Рис. 3. Зависимость гармоник сетевого тока и тока нагрузки от отношения L_d/L_k

Из рассмотрения кривых рис. 3 можно заключить, что при снижении индуктивности L_d (или увеличении индуктивности контура коммутации L_k , что возможно при уменьшении мощности питающего ТПЧ трансформатора или мощности короткого замыкания в узле подключения РПП-6 кВ) существенно возрастает уровень 5-й гармоники сетевого тока и снижается уровень 7-й; уровни 11-й и 13-й гармоник изменяются незначительно. При тех же условиях возрастание уровня 6-й гармоники в сети пульсирующего тока приводит к аналогичному увеличению уровня ВГ в кривых сетевого тока.

Полученные зависимости позволяют оценить глубину пульсаций первичного тока ТПЧ при изменении параметров нагрузки тягового преобразователя и состояния системы электроснабжения шахты. Это позволит оценить и прогнозировать режимы совместной работы ТПЧ и электрической сети, при которых критически нарушается электромагнитная совместимость и возможна нестабильная работа преобразователя.

Высшие гармоники в электрических сетях нежелательны из-за целого ряда последствий для системы электроснабжения шахты – 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.

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 величине \sqrt{v} , 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.

Оценочный расчет дополнительных потерь электроэнергии в распределительной электрической сети шахты выполнен на основе расчета уровня токов высших гармоник на зажимах тягового преобразователя.

Значение дополнительных потерь активной мощности в кабельных ЛЭП определяется следующим образом:

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

где I_v ток v -й гармоники; R_v – сопротивление активное сопротивление ЛЭП на частоте v -й гармоники.

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

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

Энергобережения та энергоефективність

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 в пределах лавы менее 1 км, то распределенность параметров можно не учитывать, поэтому $K_{rv} = 1$).

Результаты расчетов дополнительных потерь в кабельных ЛЭП и трансформаторах представлены в виде таблиц 1 и 2. Анализировался гармонический спектр токов, в расчетах учитываются 5, 7, 11, 13.

Таблица 1

Оценочный расчет уровней дополнительных потерь в трансформаторах

Тип трансформатора	$\Delta P_{кз}$, кВт	Потери в нормальном режиме ΔP_T , кВт	Дополнительные потери от ВГ, $\Delta P_{доп}$, кВт
ТСВП-160	1,9	1,216	0,057
ТСВП-250	2,8	1,792	0,084
ТСВП-400	3,6	2,304	0,108
ТСВП-630	4,7	3,008	0,141

Таблица 2

Оценочный расчет уровней дополнительных потерь в КЛ

Марка кабелей, применяемая в подземных выработках	Наиболее распространенные сечения токопроводящих жил	r_0 , Ом/км	Дополнительные потери от ВГ, на 100 метров кабеля $\delta P_{доп}$, кВт
КШВЭБШв ВЭВБШв СБН	50	0,363	0,65
	70	0,26	0,5
	95	0,191	0,45
	120	0,151	0,3

При принятии допущения, что все участки подземной кабельной сети выполнены кабелем одного сечения, возможно вывести коэффициент, учитывающий электрическую удаленность источника электромагнитной помехи в сети. При оценочном расчете уровней электромагнитной совместимости этот коэффициент приводится к длине кабельной линии и указывает зоны надежной и неустойчивой работы ТПЧ от качества напряжения. В таблице 2 определены оценочные уровни дополнительных потерь активной мощности в силовых кабелях, приведенные к 100 м длины кабельной линии.

Для количественной оценки электромагнитного ущерба в системе электроснабжения угольной шахты от несинусоидальности напряжения необходимо определить значения показателей несинусоидальности на различных ступенях распределения электроэнергии шахты (рис. 4). Предлагается установить следующие характерные узлы нагрузки для оценки показателей качества:

- сторона НН подземной передвижной подстанции – точка К1;
- сторона ВН подземной передвижной подстанции – точка К2;
- сборные шины РПП-6 кВ – точка К3;
- сборные шины ЦПП-6 кВ – точка К4;
- сборные шины 6 кВ ГПП – точка К5.

Система электроснабжения угольной шахты является большой динамической системой, постоянные времени основных элементов которой достаточно высоки; поэтому они могут рассматриваться как широкополосные элементы, параметры которых в частотном спектре огибающей напряжения (0,1 – 15 Гц) практически неизменны и их можно считать линейными. При составлении схем замещения силовых элементов (трансформаторов, реакторов, большинства нагрузок) модуль передаточной функции может быть представлен коэффициентом передач с общим выражением

$$K = \frac{x_c}{x_c + x_s}, \quad (3)$$

где x_c – индуктивное сопротивление СЭС до элемента; x_s – индуктивное сопротивление силового элемента.

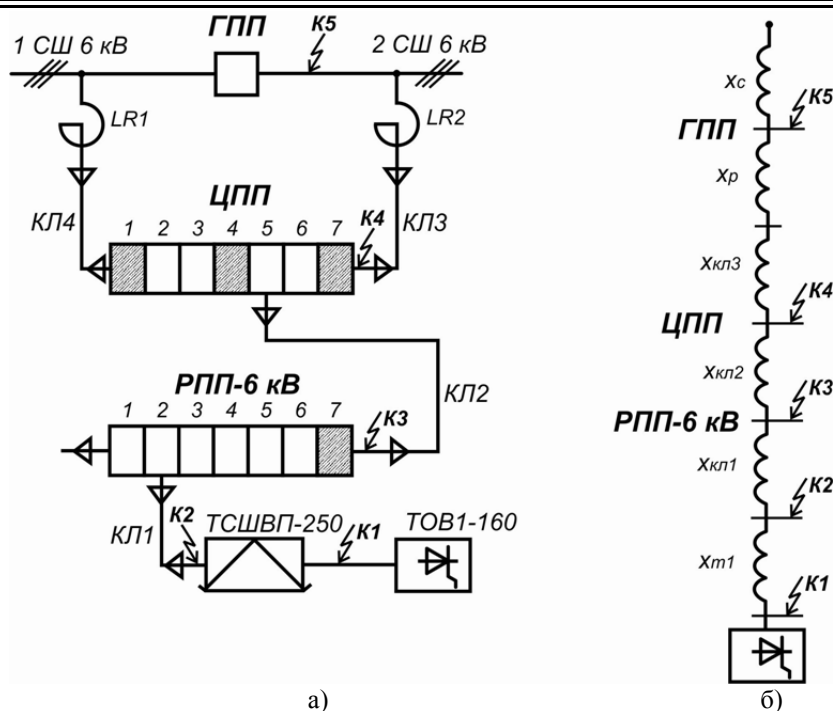


Рис. 4. Электрическая схема подземной сети угольной шахты (а) и ее схема замещения (б)

Сопроотивления рассчитываются по схеме замещения СЭС, выполненной для расчета токов КЗ. В зависимости от расчетных величин может быть различное значение коэффициента искажения кривых напряжения K_U при расчетах несинусоидальных режимов.

В таблице 3 представлены значения коэффициентов передачи K для типовых трансформаторов подземных подстанций с $U_{ном} = 6$ кВ и различными значениями мощности КЗ. Во всех случаях исходной точкой (узлом) расчета по таблицам являются значения нелинейной нагрузки на шинах источника несинусоидальности (подключение преобразователя ТОВ).

Таблица 3

Значения коэффициентов передачи для типовых подземных передвижных подстанций с $U_{ви} = 6$ кВ

$S_{ном.т},$ кВ·А	$S_{кз.с},$ МВ·А	Коэффициент передачи		
		$K_{мог-рпн}$	$K_{рпн-унп}$	$K_{унп-зпн}$
160	50	0,122	0,488	0,224
	75	0,104	0,386	0,177
	100	0,095	0,323	0,153
250	50	0,153	0,604	0,292
	75	0,125	0,502	0,228
	100	0,112	0,433	0,195
400	50	0,195	0,706	0,234
	75	0,156	0,613	0,187
	100	0,136	0,546	0,143

Для адекватной оценки электромагнитного ущерба от несинусоидальности напряжения в системе электроснабжения необходима разработка нового представления преобразователя частоты (ПЧ) как элемента системы электроснабжения. Принципиально новый подход заключается в учете канонических гармоник в спектре первичного тока преобразователя и анализе интергармоник инвертора, пересчитанных через коммутационную функцию.

Современный частотно-регулируемый электропривод на угольных шахтах Украины сегодня рассматривается как мощный инструмент управления технологическими процессами добычи и транспортировки угля. Все более часто на основных технологических звеньях производства (подъем породы и угля, водоотлив, проветривание горных выработок) устанавливаются преобразователи частоты, работающие по схеме преобразователя со звеном постоянного тока (в том числе и для подземного транспорта повышенной частоты). Применение частотно-регулируемого электропривода экономически обосновано, когда необходимо управлять производительностью машин и механизмов в широком диапазоне рабочих значе-

ний. В этом случае получают оптимальное потребление электроэнергии с минимальными удельными расходами [5]. Однако необходимо отметить, что мощные частотные преобразователи являются источниками высших гармоник тока и напряжения, что негативно сказывается на качестве напряжения в системах электроснабжения и электромагнитной совместимости электрооборудования. В зависимости от схемы выпрямителя и законов управления в спектре искажений присутствуют канонические высшие составляющие и боковые частоты (интергармоники), содержание которых в относительных единицах может достигать 40% тока основной гармоники [80]. Анализом и синтезом кривой входного тока преобразователей частоты при различных нагрузочных режимах неоднократно занимались отечественные и зарубежные ученые (Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л., Железко Ю.С, Гриб О.Г., Волков А.В.) [1-5]. Представление ПЧ как элемента системы электроснабжения, обоснование математического аппарата для анализа режимов работы и генерации высших гармоник, совместный учет параметров системы электроснабжения, преобразователя и другой комплексной нагрузки при моделировании показателей качества в узле нагрузки энергетических объединений – все это новые актуальные направления электроснабжения и электромагнитной совместимости. Решение указанных вопросов возможно при комплексном подходе в решении научных задач и практической проверке результатов.

Электромагнитная составляющая ущерба при несинусоидальности напряжения характеризуется увеличением потерь активной мощности, увеличением потребления активной и реактивной мощностей, ускорением процесса старения изоляции электрооборудования, ограничением области применения конденсаторных батарей для повышения коэффициента мощности.

Таким образом, ущерб от потерь электроэнергии (электромагнитная составляющая ущерба) за год:

$$Y_3 = \Delta P_{\text{а,доп}} C_3 T_{\text{п}} \quad (4),$$

где $\Delta P_{\text{а,доп}}$ - дополнительные потери активной мощности от ВГ; C_3 – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии на данном предприятии (принимается актуальный тариф, утвержденный НКРЭ для предприятий 2 класса); $T_{\text{п}}$ - время действия наибольших искажающих нагрузок.

В результате исследований получены граничные значения электромагнитного ущерба в основном электрооборудовании (трансформаторы и асинхронные двигатели). Мощность трансформаторов передвижных подземных подстанций принималась в диапазоне 160...630 кВ·А, мощность АД в диапазоне 10...100 кВт.

При оценке уровней дополнительных потерь впервые определены показатели графика изменения токов высших гармоник на основании статистических данных, полученных при выполнении научных работ на угольных шахтах «ДТЭК Павлоградуголь». Эти коэффициенты описывают характер изменения ВГ в течение смены, суток, года. Таким образом, можно утверждать о достоверности определения среднесменного и суточного значения времени наибольших искажающих нагрузок, которое используется в методе определения потерь активной мощности.

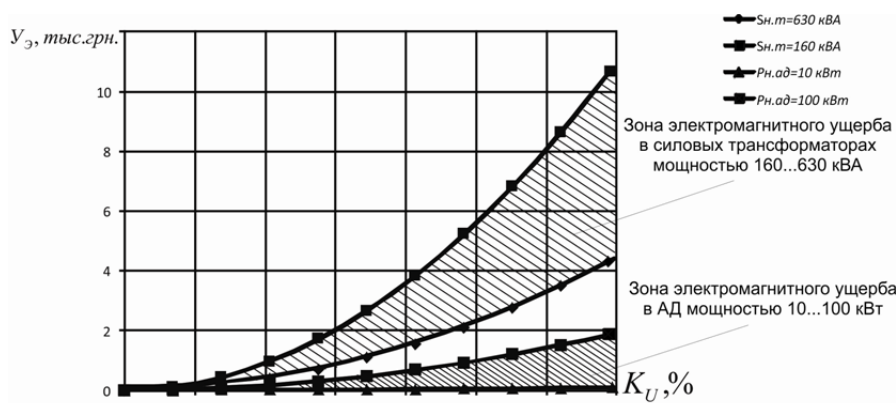


Рис. 5. Граничные зависимости годового электромагнитного ущерба в трансформаторах и АД

Отличительной особенностью полученных на рис. 5 зависимостей является использование информации о характере изменения токов ВГ, полученных экспериментальным путем. Ранее не существовало научно обоснованных взаимосвязей между значением тока ВГ и технологическим алгоритмом электроприемника. Таким образом, для точного определения электромагнитного ущерба в системе электроснабжения, оценке возможности подключения ГПЧ транспорта в той или иной точке электрической сети и возможности выполнения условий электромагнитной совместимости других нелинейных электроприем-

ников необходимо учитывать технологические особенности отдельных звеньев, имеющих частотный привод.

Выводы

1. Специфический характер протекания переходных процессов при пуске ТПЧ бесконтактного транспорта позволил выделить область научных вопросов, не решенных ранее, касающихся электромагнитной совместимости и искробезопасности посторонних контуров. Учитывая то, что ТПЧ сам является источником помех и одновременно питается от несинусоидального напряжения, необходимо оценивать общий уровень дополнительных потерь в системе электроснабжения. Поэтому проанализированы значения электромагнитных помех с учетом особенностей подземных шахтных сетей – низкий уровень мощности короткого замыкания в схеме питания подземных участков, который обуславливает высокие значения дополнительных потерь мощности от ВГ в трансформаторах и кабельных линиях.

2. Для анализа режимных параметров ТПЧ как элемента системы электроснабжения предложено учитывать комплексную обобщенную нагрузку узла (на примере угольных шахт). Такая постановка задачи моделирования позволяет выявить взаимосвязи режимных параметров энергосистемы, линейной нагрузки и мощных нелинейных нагрузок ТПЧ и оценить уровни электромагнитной совместимости узлов нагрузки. Путем математического моделирования установлены зоны годового электромагнитного ущерба от несинусоидальности напряжения в основном электрооборудовании (3,5...8,0 тыс. грн. для трансформаторов передвижных подстанций мощностью соответственно 160...630 кВ·А и 0,3...1,8 тыс. грн. для асинхронных двигателей мощностью соответственно 10...100 кВт).

Список литературы

1. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий. / И.В. Жежеленко. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – 254 с.
2. Электромагнитная совместимость потребителей [текст]: Э45 моногр. / И.В. Жежеленко, А.К. Шидловский, Г.Г. Пивняк и др. – М.: Машиностроение, 2012. – 350 с.
3. Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко, Т.К. Бараненко, А.В. Горпинич, В.В. Нестерович; Под ред. И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 296 с.
4. Пивняк Г.Г., Шидловский А.К., Кігель Г.А., Рыбалко А.Я., Хованська О.І. Особливі режими електричних мереж. – Дніпропетровськ: НГА України, 2004. – 375 с.
5. Расчеты показателей электромагнитной совместимости [текст]: Э45 Учебное пособие / Г.Г. Пивняк, И.В. Жежеленко, Ю.А. Папаика – Д.: Национальный горный университет, 2014. – 114 с.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Випанасенко С.І.

УДК 621.319.7.001

В.И. Голинько, д-р техн. наук Д.С. Пустовой

(Украина, Днепропетровск, ГВУЗ «Национальный горный университет»)

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД ЗАРЯДКИ АЭРОЗОЛЕЙ ПРИ ОЧИСТКЕ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА ОТ ВЫСОКОДИСПЕРСНОЙ ПЫЛИ

Введение. В настоящее время, как правило, для улавливания аэрозолей из отходящих газов используется широкий класс газоочистного оборудования (циклоны, фильтры, пылеуловители, осадительные камеры и др.). Однако из-за низкой эффективности этого оборудования при улавливании мелкодисперсной пыли, необходимости замены или чистки фильтрующих элементов, область его применения ограничена.

Состояние вопроса. Решением проблемы удаления мелкодисперсной пыли (менее 5 мкм) из запыленного воздуха может быть электростатическое осаждение. Фундаментальным отличием процесса электростатического осаждения от механических методов сепарации частиц является то, что в этом случае энергия, подводимая к обрабатываемым газопылевым потокам, расходуется преимущественно на оказание непосредственного воздействия на осаждаемые частицы. Этим обусловлены многие преимущества процесса электрофильтрации, основными из которых являются умеренное потребление энергии, а также то, что даже мельчайшие частицы аэрозолей улавливаются эффективно, поскольку и на эти частицы действует достаточно большая сила [1].