

6. Пожаро-взрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: В 2-х т. / Под ред. А.Н.Баратова и А.Я.Корольченко. – М.: Химия, 1990.

7. Патент на корисну модель №30720 UA. Пристрій для захисного відключення електричної мережі / Сольоний С.В., Ковальов О.П., Сольона О.Я., зареєстрований 11.03.2008 р., Бюл. № 5.

8. Соленый С.В., Шевченко О.А., Якимишина В.В., Демченко Г.В. Предотвращение возгорания изоляции в сетях 380-220 В из-за появления ослабленных контактных соединений // Наукові праці Донецьк. нац. техн. ун-ту. Серія: “Електротехніка і енергетика”. Вип.9 (158). – Донецьк: ДонНТУ, 2009. – 270 с.

*Получено 21.06.2010*

УДК 621.331

**И.В.СЛОБОДЧИКОВ**

*Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, г.Харьков*

### **К ВОПРОСУ ОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА С ИМПУЛЬСНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ С ТЯГОВЫМИ ПОДСТАНЦИЯМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Рассматриваются вопросы электромагнитной совместимости тяговой подстанции постоянного тока с подвижным составом с импульсными преобразователями.

Розглядаються питання електромагнітної сумісності тягової підстанції постійного струму з рухомих складом з імпульсними перетворювачами.

The questions of electromagnetic compatibility of DC traction substation with a rolling stock with pulse converters are considered.

*Ключевые слова:* электромагнитная совместимость, подвижной состав, импульсные преобразователи, эквивалентное мешающее напряжение, биения, пассивный фильтр.

Электромагнитная совместимость тяговой подстанции постоянного тока с нагрузкой и смежными электроустановками ухудшается при эксплуатации электрического подвижного состава с импульсными преобразователями [1], которые генерируют в контактную сеть несвойственные ей гармонические составляющие. Дальнейшее развитие подвижного состава с импульсным регулированием ставит задачу исследования влияния его работы на величину эквивалентного мешающего напряжения в контактной сети. Указанная задача усложняется тем, что на одном участке тяговой сети, питаемом смежными подстанциями, могут работать несколько электровозов с импульсными преобразователями [2].

Рассмотрению вопроса электромагнитной совместимости подвижного состава с импульсным регулированием и тяговой сети посвящен ряд работ [2-4]. Так, в [2] приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния локомотивов с тиристор-

ным регулированием на устройства СЦБ и связи. В [3] рассматривается возможность компенсации гармоник от частотно-регулируемого привода с помощью активного фильтра, установленного на подвижном составе. В [4] дается теоретическое исследование процессов в системе «управляемый выпрямитель - широтно-импульсный преобразователь» (ШИП). Вместе с тем остается нерешенной задача оценки влияния гармоник, сгенерированных импульсными преобразователями локомотивов в контактную сеть, на величину эквивалентного мешающего напряжения.

Целью данной работы является анализ влияния подвижного состава с импульсными преобразователями на величину эквивалентного мешающего напряжения на выходе тяговой подстанции.

По условию защиты воздушных линий связи от мешающих и опасных влияний тяговой сети постоянного тока среднее значение эквивалентного мешающего напряжения на выходе тяговой подстанции не должно превышать [5]

$$U_{\text{эм}} < 4 \text{ В.} \quad (1)$$

Для уменьшения напряжений пульсаций, обусловленных работой выпрямительного агрегата подстанции, до требуемого условием (1) уровня применяют специальные сглаживающие резонансно-апериодические фильтры [5]. В [6] показано, что в нагрузочном режиме при допустимых по ГОСТ 13109-97 несимметрии и несинусоидальности питающих выпрямитель напряжений некоторые фильтры тяговых подстанций могут не обеспечивать выполнения требования условия (1). Указанное усложняется дополнительным вкладом гармонических составляющих, возникающих при работе импульсных преобразователей электрического подвижного состава и имеющих частоты

$$f_k = f_{\Pi} \cdot k, \quad (2)$$

где  $f_{\Pi}$  – основная частота преобразователя;  $k=1, 3, 5, \dots$

Амплитуды гармоник в контактной сети определяются схемой выпрямления тяговой подстанции, коэффициентом сглаживания резонансно-апериодического фильтра и гармоническими составляющими напряжения, вносимыми импульсными преобразователями подвижного состава. Фазовый сдвиг  $\varphi$  между гармониками одинаковой частоты может изменяться в диапазоне  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$  и является случайной величиной с постоянной плотностью вероятности  $f(\varphi) = 1/2\pi$ . Таким образом, выражение для результирующей амплитуды  $M(U_f)$  гармоники частотой  $f$  от векторной суммы  $m$  гармонических составляющих той же частоты, полученное по аналогии с [2], может быть представлено в

виде:

$$M(U_f) \leq \sqrt{\sum_{i=1}^m U_{fi}^2}. \quad (3)$$

Как следует из выражения (3), расчетная результирующая амплитуда гармоник при совпадении частот отдельных гармонических составляющих в тяговой сети может приниматься в расчетах как их среднегеометрическая сумма, что подтверждается экспериментальными исследованиями, приведенными в [2]. В свою очередь (3) свидетельствует об ухудшении показателей качества электрической энергии. Выражение для коэффициента пульсации принимает вид:

$$K_{\Pi} = \frac{\sqrt{\sum_{q=1}^{\infty} U_q^2 + \sum_{f=1}^n [M(U_f)]^2}}{U_0}, \quad (4)$$

где  $U_q$  – действующее значение  $q$ -й гармонической составляющей;  $n$  – количество гармоник, получаемых в результате векторного сложения отдельных гармонических составляющих при совпадении частот;  $U_0$  – среднее значение напряжения контактной сети.

Эквивалентное мешающее напряжение [5] с учетом (3) определяется выражением

$$U_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{q=1}^{\infty} (U_q \cdot p_q)^2 + \sum_{f=1}^n (M(U_f) \cdot p_f)^2}, \quad (5)$$

где  $p_q, p_f$  – коэффициенты акустического воздействия  $q$ -й и  $f$ -й гармоник.

Известно [4], что в результате взаимодействия канонических и неканонических гармоник управляемого выпрямителя с собственными гармониками импульсного преобразователя, а также при несовпадении частот модуляции импульсных преобразователей находящихся на одном участке локомотивов, в напряжении контактной сети возбуждаются боковые гармоники (биения). В таком случае частоты боковых гармоник определяются [4]

$$\begin{aligned} \omega_{ik} &= i\omega_0 \pm 2k\pi f_{\Pi}, \\ \omega_{vk} &= v\omega_0 \pm 2k\pi f_{\Pi}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\omega_{ik}$  – частота субгармоники при взаимодействии  $i$ -й канонической гармоники выпрямителя и  $k$ -й гармоники импульсного преобразователя;  $\omega_{vk}$  – частота боковой гармоники при взаимодействии  $v$ -й неканонической гармоники выпрямителя и  $k$ -й гармоники импульсного преобразователя;  $f_{\Pi}$  – частота модуляции напряжения импульсного преобразователя.

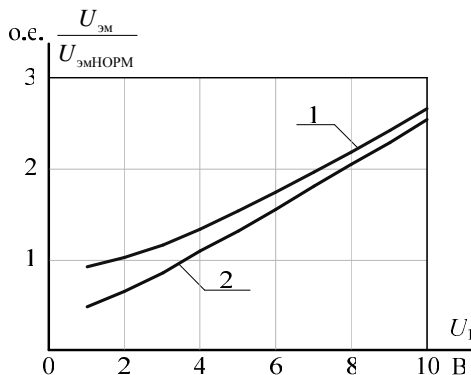
Анализ (6) показывает, что при возникновении биений в напряжении и токе тяговой сети могут присутствовать гармонические составляющие с частотами, совпадающими или близкими к частотам полезных сигналов устройств СЦБ в рельсовых цепях. При этом появление боковых гармоник оказывает существенное влияние на величины коэффициента пульсаций и эквивалентного мешающего напряжения, что ухудшает электромагнитную совместимость тяговой сети со смежными электроустановками. Согласно [4] присутствие низкочастотных неканонических гармоник, попадающих в полосу пропускания частотной характеристики ШИП, усложняет динамические процессы с возможной потерей устойчивости в случае его включения в замкнутую структуру автоматического регулирования.

Для анализа мешающего влияния подвижного состава с импульсными преобразователями проведена проверка выполнения условия (1) путем расчета эквивалентного мешающего напряжения в контактной сети согласно [5] с учетом выражения (5). На рисунке приведены полученные зависимости относительной величины эквивалентного мешающего напряжения  $U_{\text{эм}} / U_{\text{эмНОРМ}}$  от значения  $U_1$  основной гармоники ШИП подвижного состава при  $U_{\text{эмНОРМ}} = 4$  В. Несущая частота широтно-импульсного преобразователя задана согласно [2] и равна 800 Гц. Влияние на амплитуды гармоник распределенных параметров контактной сети и боковые гармоники не учитывались. Кривая 1 соответствует случаю использования на тяговой подстанции Г-образного LC-фильтра с резонансными цепочками на частоты 300, 600, 900, 1200 Гц, кривая 2 соответствует случаю применения схемы пассивного фильтра, разработанной лабораторией Западно-Сибирской железной дороги. Значения амплитуды основной гармоники ШИП на выходе тяговой подстанции намеренно выбраны малыми (от 0 до 10 В). Заданная величина тягового тока при расчетах равна 1000 А.

Как видно из рисунка, уже при малых значениях амплитуды  $U_1$  основной гармоники ШИП частотой 800 Гц наблюдается нарушение условия (1). При учете полного спектра гармонических составляющих входного напряжения подвижного состава с импульсным преобразователем эквивалентное мешающее напряжение на выходе подстанции возрастет. Полученные расчетные данные соотносятся с результатами экспериментальных исследований, приведенных в [2].

Таким образом, применение перспективных видов электрического подвижного состава с импульсным регулированием требует решения проблемы их электромагнитной совместимости с тяговой сетью и смежными электроустановками путем эффективной компенсации гар-

монических составляющих, возникающих в процессе их работы. Решение поставленной задачи возможно за счет разработки и использования активных методов фильтрации. Сглаживающие устройства тяговых подстанций не могут подавлять гармонические возмущения со стороны нагрузки.



Зависимости относительной величины эквивалентного мешающего напряжения от амплитуды основной гармоники ШИП

1.Гаврилюк В.И., Миргородская А.И. Испытания подвижного состава на электромагнитную совместимость // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків, 2007. – №4 (Додаток). – С.10-11.

2.Штолл К., Бечка Й., Надворник Б. Влияние тягового подвижного состава с тиристорным регулированием на устройства СЦБ и связи: Пер. с чеш. – М.: Транспорт, 1989. – 199 с.

3.Сергиенко Н.И., Гончаров Ю.П., Панасенко Н.В., Сыченко В.Г. Тяговый частотно-регулируемый преобразователь с активным фильтром и комбинированной схемой защиты в аварийных режимах // Залізничний транспорт України. – 2009. – №2. – С.9-16.

4.Щербак Я.В. Теоретические основы и методы регулирования субгармоник полупроводниковых преобразователей электроэнергии: Дисс. ... д-ра техн. наук: 05.09.12. – Харьков, 2001. – 409 с.

5.Трейвас М.Д. Высшие гармонические выпрямленного напряжения и их снижение на тяговых подстанциях постоянного тока. – М.: Транспорт, 1964. – 100 с.

6.Щербак Я.В., Слободчиков И.В. Анализ эффективности работы пассивных энергетических фильтров тяговых подстанций постоянного тока // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків, 2009. – №6. – С.27-31.

*Получено 21.06.2010*