

## УРОВНИ НАПРЯЖЕННОСТЕЙ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ОТ ВЫСШИХ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВЫПРЯМЛЕННОГО ТОКА

К.Б. Кузнецов<sup>1</sup>, А.Р. Закирова<sup>1</sup>, И.М. Кирпичникова<sup>2</sup>, Ю.И. Аверьянов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург, Россия,

<sup>2</sup> Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Приведены источники электромагнитных полей, которые оказывают вредное воздействие на электротехнический персонал, обслуживающий электроустановки. Рассматривается в зависимости от схемы выпрямления (6-, 12-, 24-х пульсовые) спектр высших гармонических составляющих выпрямленного тока. У 12-пульсовых преобразователей в кривой первичного выпрямленного тока помимо основной гармоники с частотой 50 Гц от электрооборудования переменного тока выпрямительной установки присутствуют высшие гармонические составляющие выпрямленного тока с частотами, начиная с одиннадцатой (11; 13; 23; 25 и т. д.), а у 24-пульсовых преобразователей в кривой первичного выпрямленного тока помимо основной гармоники с частотой 50 Гц присутствуют высшие гармонические составляющие выпрямленного тока с частотами, начиная с двадцать третьей (23; 25 и т. д.). Показано, что наиболее безопасным с точки зрения воздействия напряженности магнитного поля на электротехнический персонал тягового электроснабжения является 24-пульсовый выпрямитель, имеющий минимальный спектр частот: 50; 1150 и 1250 Гц.

Проведен расчет напряженности магнитного поля выпрямленного тока на рабочих местах в зоне «+» и «-» шины РУ-3,3 кВ методом наложения без учета влияния земли. Выявлено, что на тяговых подстанциях даже при наличии сглаживающего фильтр устройства на персонал воздействует целый ряд гармонических составляющих магнитного поля выпрямленного тока, предельно допустимые уровни которых в настоящее время в России не нормируются и их вредное воздействие на электротехнический персонал до недавнего времени не рассматривалось.

*Ключевые слова:* магнитное поле, электроустановка, выпрямительный преобразователь.

### Введение

Полупроводниковые преобразователи тяговых подстанций постоянного тока относятся к классу электроустановок, имеющих нелинейную вольт-амперную характеристику. Нелинейные нагрузки потребляют из сети несинусоидальный ток, который можно представить как сумму синусоидальных составляющих, называемых гармониками.

В ряде работ [1–7] показано, что каждой высшей гармонике выпрямленного напряжения порядка  $k = m \cdot l$  в переменном токе преобразователя соответствуют две высшие гармоники с порядковыми номерами

$$k = m \cdot l \pm 1, \quad (1)$$

где  $m$  – число пульсаций кривой выпрямленного напряжения;  $l = 0, 1, 2, 3 \dots$  ряд натуральных чисел.

Для учета воздействия на электротехнический

персонал магнитного поля токов выпрямительного преобразователя рассмотрим первичный ток 6-пульсового выпрямителя. При идеально сглаженном выпрямленном токе ( $X_d = \infty$ ) и мгновенной коммутации вентилей ( $X_a = 0$ ) кривая выпрямленного первичного тока имеет прямоугольную либо ступенчатую форму. Для вышеуказанных условий амплитуда  $k$ -й гармоники первичного тока при 6-пульсовых (12- и 24-пульсовых) преобразователях равна [5]:

$$I_k = \frac{2\sqrt{3} \cdot I_d}{\pi \cdot k_T \cdot k}. \quad (2)$$

Из формулы следует, что снижению уровня и состава высших гармонических составляющих в первичном токе и в питающих сетях способствует применение на тяговых подстанциях многопульсовых преобразователей (табл. 1).

Таблица 1

Спектр высших гармонических составляющих в кривой выпрямленного тока

Схема выпрямления	50 Гц $k = 1$	250 Гц $k = 5$	350 Гц $k = 7$	550 Гц $k = 11$	650 Гц $k = 13$	850 Гц $k = 17$	950 Гц $k = 19$	1150 Гц $k = 23$	1250 Гц $k = 25$
6-пульсовые	+	+	+	+	+	+	+	+	+
12-пульсовые	+	–	–	+	+	–	–	+	+
24-пульсовые	+	–	–	–	–	–	–	+	+

Примечание: (+) частота присутствует, (–) частота отсутствует.

Можно сделать вывод, что у 12-пульсовых преобразователей в кривой первичного выпрямленного тока помимо основной гармоники с частотой 50 Гц присутствуют высшие гармонические составляющие выпрямленного тока с частотами, начиная с одиннадцатой (11; 13; 23; 25 и т. д.), а у 24-пульсовых преобразователей в кривой первичного выпрямленного тока помимо основной гармоники с частотой 50 Гц присутствуют высшие гармонические составляющие с частотами, начиная с двадцать третьей (23; 25 и т. д.). Значение заданного максимального выпрямленного тока подстанции  $I_{дгп}$  определяется по формуле:

$$I_{дгп} = \frac{P_T}{U_{дн}}, \quad (3)$$

где  $U_{дн}$  – номинальное выпрямленное напряжение на шинах подстанций (3,3 кВ);  $P_T$  – заданное значение мощности на тягу поездов (до 12 700 кВт).

### Расчет магнитного поля длинных разноименных заряженных параллельных осей без учета потенциала земли

Для бесконечно длинных проводов с противоположно направленными токами величина напряженности магнитного поля может быть определена из выражения для векторного потенциала  $A$  этого поля в соответствии с рисунком.

Окружающая среда – воздух. Поместим начало координат в точку  $O$ , находящуюся посередине линии, соединяющей центры проводов. Полная величина скалярного магнитного потенциала в точке  $M$ :

$$\Phi_M = \frac{I}{2\pi} \beta_1 + \frac{I}{2\pi} \beta_2 + \text{const}. \quad (4)$$

Вектор магнитной индукции в точке  $M$  найдем из подобия треугольников:

$$\frac{B}{B_1} = \frac{2h}{\rho_2};$$

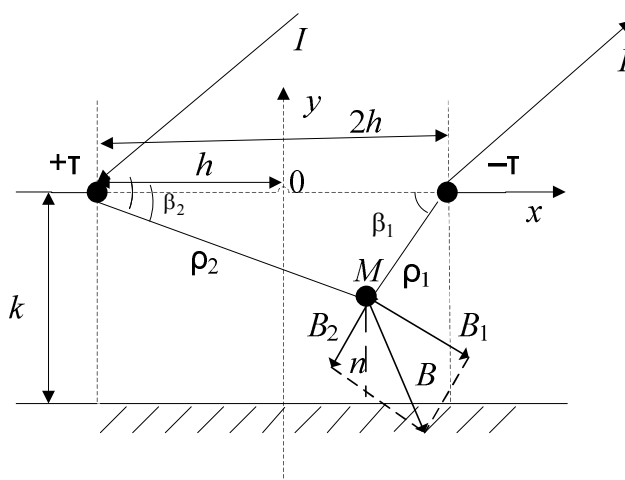
$$B = \mu_0 \frac{I \cdot 2h}{2\pi \cdot \rho_1 \cdot \rho_2}; \quad (5)$$

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{I \cdot h}{\pi \cdot \rho_1 \cdot \rho_2}.$$

Результаты расчета переменных токов высших гармонических составляющих при 6-пульсовом выпрямителе для следующих условий:  $I_d = 3150$  А (ток);  $2h = 2$  м (расстояние между осями проводов);  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – это расстояния от осей проводов до точки  $M$ , равные соответственно 2,34 и 1,77 м;  $B_1, B_2, B$  – вектора магнитной индукции; высота подвеса проводов  $k = 3,5$  м; расстояние от земли до точки  $M$   $n = 1,8$  м, приведены в табл. 2.

Из табл. 2 можно сделать вывод, что на рабочем месте электротехнического персонала, обслуживающего электроустановки распределительного устройства 3,3 кВ (РУ-3,3 кВ), присутствует спектр частот от 50 до 1250 Гц. Нормируются предельно допустимые уровни напряженности магнитного поля только для частоты 50 Гц, при сравнении полученных максимальных уровней магнитных полей (МП) 50 Гц (85 А/м) с предельно допустимым уровнем (ПДУ) [8] наблюдается небольшое превышение 80 А/м. Одной из важных особенностей мощных выпрямительных установок являются достаточно низкие напряженности электрических полей, включая от гармонического ряда напряжений. С другой стороны, величина напряженностей магнитного поля таких установок превышает нормируемые значения для частоты 50 Гц и содержит ряд напряженностей гармонических составляющих выпрямленного тока высокого уровня, который может представлять угрозу здоровью персонала.

Актуальным в настоящее время является работа по нормированию предельно допустимых уровней напряженности магнитного поля для спектра частот от 50 Гц до 10 000 Гц. Необходимо



Магнитное поле длинных разноименных заряженных параллельных осей без учета потенциала земли

Таблица 2

Расчетные значения переменных токов высших гармонических составляющих  
максимального выпрямленного тока (3150 А)

$k$	$f$ , Гц	$I_k$ , А	$H$ , А/м	ПДУ $H$ , А/м в РФ (8 ч)
Машинный зал тяговой подстанции				
1	50	1100	85	80
5	250	220	17	Не нормируется
7	350	157	12	
11	550	100	8	
13	650	85	7	
17	850	65	5	
19	950	58	4	
23	1150	48	4	
25	1250	44	3	

автоматически контролировать продолжительность нахождения электротехнического персонала вблизи выпрямительных установок и в необходимых случаях сокращать до безопасного времени нахождения его вблизи электроустановки с помощью применения на рабочих местах индивидуальных и стационарных сигнальных устройств [9] о превышении ПДУ МП. Осуществлять разработку организационно-технических мероприятий, в качестве которых необходимо применять защиту расстоянием, временем, изоляцией от неионизирующего магнитного поля. Требуется разработка методики оценки вредного воздействия микс МП данного диапазона частот при наличии магнитного поля постоянного и переменного тока разной частоты и длительности.

### Заключение

Негативное индуктивное влияние высших гармонических составляющих переменного тока до последнего времени оценивалось на работу промышленных систем автоматики, телемеханики и связи. Выпрямленный ток выпрямительного преобразователя обладает спектром высших синусоидальных электрических токов, напряженности магнитных полей которых могут оказывать вредное воздействие на персонал, что до настоящего времени как научная проблема в России и за рубежом не рассматривалась. Выше показано, что уровень напряженностей магнитного поля от переменных гармонических составляющих выпрямленного тока выпрямительного преобразователя может оказывать вредное воздействие на электротехнический персонал тягового электроснабжения.

В работе показано, что в тяговых электрических сетях железнодорожного транспорта, в частности, при применении 6-пульсовых выпрямительных преобразователей, при реализуемой мощности электрических локомотивов электрической тяги в окружающем пространстве создаются напряженности магнитных полей, которые могут превышать нормируемые уровни для отдельных частот гармонических составляющих.

### Литература

1. Полупроводниковые преобразовательные агрегаты тяговых подстанций / С.Д. Соколов, Ю.М. Бей, Я.Д. Гуральник, О.Г. Чаусов. – М.: Транспорт, 1979. – 264 с.
2. Аржанников, Б.А. Тяговое электроснабжение постоянного тока скоростного и тяжеловесного движения поездов: моногр. / Б.А. Аржанников. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2012. – 207 с.
3. Бурков, А.Т. Электронная техника и преобразователи: учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / А.Т. Бурков. – М.: Транспорт, 1999. – 464 с.
4. Опыт-конструкторская разработка, исследование и эксплуатационное освоение двенадцатипульсовых выпрямителей тяговых подстанций: отчет № 960 о научно-исследовательской работе / исполн.: Четвергов В.А. [и др.]. – М., 1980. – 149 с.
5. Бадер, М.П. Электромагнитная совместимость: учеб. для вузов ж.-д. транспорта / М.П. Бадер. – М.: УМК МПС, 2002. – 638 с.
6. Косарев, А.Б. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта / А.Б. Косарев, Б.И. Косарев. – М.: Интекс, 2008. – 480 с.
7. Zakirova, A.R. Higher Harmonic Components of Rectifiers Magnetic Fields and their Adverse Health Effects / A.R. Zakirova, K.B. Kuznetsov // Procedia Engineering. – 2015. – № 129. – С. 415–419. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.141
8. СанПиН 2.2.4.3359-16. Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах. – М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2016. – 71 с.
9. Пат. 2436111 Российская Федерация, МПК51 G 01 R 33/02. Способ контроля уровня напряженности магнитного поля электроустановок переменного тока и устройство для его осуществления / А.Р. Закирова, К.Б. Кузнецов; заявитель и патентообладатель Урал. гос. ун-т путей сообщения. – № 2436111; заявл. 23.06.2010; опубл. 10.12.2011, Бюл. № 34. – 2 с.

**Кузнецов Константин Борисович**, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Техносферная безопасность», Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург; kobokuz@gmail.com.

**Закирова Альфия Резавановна**, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Техносферная безопасность», Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург, Alfij\_2011@bk.ru.

**Кирпичникова Ирина Михайловна**, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; kirpichnikovaim@susu.ru.

**Аверьянов Юрий Иванович**, д-р техн. наук, профессор, кафедра безопасности жизнедеятельности, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; bgd-susu@mail.ru.

*Поступила в редакцию 23 мая 2017 г.*

---

DOI: 10.14529/power170306

## LEVELS OF MAGNETIC FIELDS FROM HIGHER HARMONIC COMPONENTS OF RECTIFIED CURRENT

**K.B. Kuznetsov**<sup>1</sup>, kobokuz@gmail.com,

**A.R. Zakirova**<sup>1</sup>, alfij\_2011@bk.ru,

**I.M. Kirpichnikova**<sup>2</sup>, kirpichnikovaim@susu.ru,

**Yu.I. Aver'yanov**<sup>2</sup>, bgd-susu@mail.ru

<sup>1</sup> Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russian Federation,

<sup>2</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The article presents the sources of electromagnetic fields which have harmful effects on the electrical engineering personnel servicing electric plants. The authors consider, depending on the rectification circuit (6, 12, 24 pulse) –the range of higher harmonic components of the rectified current, 12-pulse converters, in addition to the main harmonic with a frequency of 50 Hz of electrical alternating current rectifier, have higher harmonic components of the rectified current with frequencies starting from the eleventh (11; 13; 23; 25, etc.) in the primary curve of the rectified current, while 24-pulse converters, in addition to the main harmonic with 50 Hz frequency, have higher harmonic components of the rectified current with frequencies from the twenty-third (23; 25, etc.) in the primary curve of the rectified current. It is shown that the safest from the point of view of the magnetic field impact on the electrical staff of the traction power supply is a 24-pulse rectifier having a minimum frequency range: 50 Hz, 1150 Hz, 1250 Hz.

The calculation of the magnetic field of the rectified current on the work stations in the area of “+” and “-” bus of RU-3.3 kV with the superposition method without taking into account the influence of the earth. It is revealed that at traction substations, even in the presence of a smoothing filter unit, the personnel is influenced by a number of harmonic components of the magnetic field of the rectified current the maximum allowable levels of which are not currently standardized in Russia and their harmful effects on the electrical staff has not been considered until recently.

*Keywords: magnetic field, power system, rectifier inverter.*

### References

1. Sokolov S.D., Bey Yu.M., Gural'nik Ya.D., Chausov O.G. *Poluprovodnikovye preobrazovatel'nye agregaty tyagovykh podstantsiy* [Semiconductor Rectifier Units for Traction Substations]. Moscow, Transport Publ., 1979. 264 p.
2. Arzhannikov B.A. *Tyagovoe elektrosnabzhenie postoyannogo toka skorostnogo i tyazhelovesnogo dvizheniya poezdov: monografiya* [Traction Power Supply DC High-speed and Heavy Train Traffic]. Ekaterinburg, Ural State University of Railway Transport Publ., 2012. 207 p.
3. Burkov A.T. *Elektronnaya tekhnika i preobrazovatel'i: Ucheb. posobie dlya vuzov zh.-d. transp.* [Electronic Equipment and Transmitters]. Moscow, Transport Publ., 1999. 464 p.
4. Chetvergov V.A. *Opytno-konstruktorskaya razrabotka, issledovanie i ekspluatatsionnoe osvoenie dvanadtsatipul'sovykh vypryamiteley tyagovykh podstantsiy* [Experimental Design Development, Research and Operational Development of 12-Pulse Rectifiers for Traction Substations]. Moscow, 1980. 149 p.
5. Bader M.P. *Elektromagnitnaya sovmestimost': uchebnyk dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta* [Electromagnetic Compatibility: Textbook for Universities of Railway Transport]. Moscow, Transport Publ., 2002. 638 p.

6. Kosarev A.B., Kosarev B.I. *Osnovy elektromagnitnoy bezopasnosti sistem elektrosnabzheniya zheleznodorozhnogo transporta*. [Fundamentals of Electromagnetic Safety Power Supply Systems for Railway Transport]. Moscow, Inteks Publ., 2008. 480 p.

7. Zakirova A.R., Kuznetsov K.B. Higher Harmonic Components of Rectifiers of Magnetic Fields and their Adverse Health Effects. *Procedia Engineering*, 2015, no. 129, pp. 415–419. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.141

8. SanPiN 2.2.4.3359-16. *Sanitarno–epidemiologicheskie trebovaniya k fizicheskim faktoram na rabochikh mestakh* [Sanitary-Epidemiological Requirements to Physical Factors at Workplaces]. Moscow, Federal'nyy tsentr Gossanepidnadzora Minzdrava Rossii, 2016. 71 p.

9. Zakirova A.R., Kuznetsov K.B. *Sposob kontrolya urovnya napryazhennosti magnitnogo polya elektroustanovok peremennogo toka i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method of Controlling Level of Magnetic Field Intensity in Electrical AC Device for its Implementation]. Patent RF, no. 2436111, 2011.

Received 23 May 2017

---

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Уровни напряженностей магнитных полей от высших гармонических составляющих выпрямленного тока / К.Б. Кузнецов, А.Р. Закирова, И.М. Кирпичникова, Ю.И. Аверьянов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17, № 3. – С. 55–59. DOI: 10.14529/power170306

#### FOR CITATION

Kuznetsov K.B., Zakirova A.R., Kirpichnikova I.M., Aver'yanov Yu.I. Levels of Magnetic Fields from Higher Harmonic Components of Rectified Current. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 55–59. (in Russ.) DOI: 10.14529/power170306

---