

УДК 538.69.331.45

**Гармоники электрических токов промышленной частоты как источники магнитных полей и методы снижения их уровней**

Левченко Л.А., Перелёт Т.Н., Панькив К.В.

Приведены результаты экспериментальных исследований гармонического состава некомпенсированных электрических токов в системах электроснабжения зданий. Установлено, что эти токи имеют частоты гармоник и интергармоник электрического тока промышленной частоты 50 Гц, которые генерируются импульсными блоками питания и являются причиной повышения уровня магнитных полей в помещениях. Были измерены уровни спектрального состава магнитных полей в помещениях с различным вкладом нелинейных электрических потребителей в общую нагрузку на силовую сеть. Рассмотрены различия спектральных составов магнитных полей в помещениях и электротоков в силовых сетях. Предложены методы снижения магнитных полей. Основные из них – это уменьшение доли нелинейных потребителей в общей электрической нагрузке здания и экранирование участков электрической сети с некомпенсированными электрическими токами.

*Ключевые слова:* гармоники, интергармоники, электромагнитная обстановка, магнитное поле.

**Electric current harmonics of industrial frequency as magnetic field sources and methods to reduce their levels**

Levchenko L.A., Perelot T.N., Pankiv K.V.

The paper presents the results of an experimental research of the harmonic composition of uncompensated electric currents in indoors electrical supply system. These currents prove to have the frequency of harmonics and interharmonics of 50 Hz electric power frequency, which are generated by static power supply units and lead to boosting indoors magnetic field levels. Spectral composition levels of indoors magnetic fields, featuring different share of non-linear electric consumers in the total load on the power system, are provided. The contrast between spectral composition of indoors magnetic fields and current flows in electric power system is considered. The methods of reducing magnetic fields are presented. The main one of them is to reduce the share of non-linear consumers in total indoors electrical load and to shield the parts of electric power system characterized by uncompensated electric currents.

*Keywords:* harmonics, interharmonics, electromagnetic environment, magnetic field.

**Введение**

В последние годы наблюдаются значительные изменения характера электрической нагрузки на силовые сети промышленных, административных, а также жилых зданий и сооружений. Это обусловлено появлением большого количества электрического и электронного оборудования с нелинейными вольт-амперными характеристиками. Следствием этого является изменение гармонического состава токов электропитания, что может приводить к повышению энергопотребления, выходу из строя оборудования и авариям в электриче-

ских сетях. Во многих случаях изменения в гармоническом составе напряжения электропитания связаны с нарушениями синусоидальности напряжения силовой сети. Ещё одним неблагоприятным явлением является дисбаланс электрических токов в фазных и нулевых рабочих проводниках трёхфазной сети, что приводит к генерации магнитных полей ненормативных уровней.

Значительная часть исследований искажений напряжений (электротоков) в силовых сетях проводится с точки зрения электромагнитной совместимости технических средств. В

осн-овном они касаются проблем энергосбережения, защиты оборудования от выхода из строя и предотвращения аварий в силовых сетях [1-3]. Но еще одним следствием такого фактора является наличие в кабелях электропитания токов высших гармоник промышленной частоты 50 Гц, которые протекают по нулевым рабочим проводникам и генерируют магнитные поля гигиенически значимых уровней. Большинство исследований посвящены влиянию таких полей на технические средства [4] или касаются магнитных полей заведомо сверхнормативных уровней, генерируемых электросварочным оборудованием [5]. В работе [6] исследовано появление некомпенсированных электроток в трехфазной силовой сети, но предложения по снижению генерируемых ими магнитных полей касаются исключительно средств вычислительной техники, укомплектованными встроенными импульсными источниками питания.

Целесообразно исследовать общие закономерности появления гармоник электротока промышленной частоты, критичность генерируемых ими магнитных полей и определить направления работ по их минимизации.

Целью работы являются экспериментальные исследования гармонического состава электрических токов силовых сетей с разными долями нелинейных нагрузок, уровней магнитных полей и разработка методов их снижения.

#### **Экспериментальные исследования гармонического состава электрических токов силовых сетей**

Исследования выполнялись в производственных зданиях, а также в отдельных помещениях с разной долей нелинейных потребителей в общей электронагрузке на силовую сеть. В качестве тестовых выбирались звенья силовой сети, на которых нелинейные нагрузки составляли примерно: до 15%, до 20% и более 25%.

Экспериментальные исследования проводились с помощью специализированных поверенных приборов.

Частота и синусоидальность электротока без нагрузки контролировались с помощью цифрового запоминающего осциллографа Tektronix TDS2022C. Это является обязательным для исключения внешнего воздействия на формирование гармонического состава электротока в силовой сети здания.

Характер электротока нелинейного (импульсного) потребителя обуславливает искажение синусоидального напряжения на входе нагрузки. Это так называемая «плоская» синусоида, что является следствием падения напряжения на внутреннем сопротивлении электросети:

$$U_H(f) = U_M(f) - I(f) \cdot Z_M, \quad (1)$$

где  $U_H(f)$  – искаженное напряжение на входе нагрузки;

$U_M(f)$  – синусоидальное напряжение силовой сети;

$I(f)$  – импульсный электроток нагрузки;

$Z_M$  – полное сопротивление сети со стороны нагрузки.

Несинусоидальные электроток вызывают падение напряжения на сопротивлении  $Z_M$ , что является следствием появления на входе нелинейного потребителя «плоской» синусоиды напряжения. То же самое наблюдается на входе всех электропотребителей, включенных параллельно этой нагрузке.

Несинусоидальность напряжения в системах электропитания беспокоит электротехников и энергетиков из-за снижения коэффициентов полезного действия электротехнического оборудования и его ускоренного износа: торможение роторов электрических машин, перегрев трансформаторов и изоляционных покрытий, нештатная работа и выход из строя батарей конденсаторов для компенсации реактивной нагрузки и т.д.. С точки зрения охраны труда фактор несинусоидальности напряжения является причиной повышения уровней

магнитных полей как в отдельных помещениях, так и в зданиях в целом.

Искажение синусоидальности напряжения (электротока) изменяет их гармонический состав, что приводит к нежелательным последствиям, с точки зрения электромагнитной безопасности, а именно, является источником некомпенсированных электротоков в силовой электросети (в основном в нулевом рабочем проводнике).

При симметричной нагрузке (нагрузка каждой фазы не превышает нормативное отклонение в 10%) фазные электротоки основной частоты создают системы прямой и обратной последовательности и дают в сумме нулевое значение.

Гармоники, кратные трем, создают системы нулевой последовательности, то есть имеют в любой момент одинаковые амплитуды и фазы. Поэтому в нулевом рабочем проводнике возникают электротоки, равные утроенной сумме токов высших гармоник, кратные трем. При несинусоидальной симметричной электронагрузке ток в нулевом рабочем проводнике равен

$$I_N = 3 \cdot \sqrt{I_3^2 + I_9^2 + \dots + I_n^2}, \quad (2)$$

где  $I_3, I_9, \dots, I_n$  – действующие значения соответствующих гармоник электротока;

$n$  – нечетное число, кратное трём.

Таким образом, при нелинейных нагрузках электроток в нулевых рабочих проводниках может значительно превышать электроток в фазах и зависит от доли нелинейной нагрузки в общей нагрузке на силовую сеть.

Рассмотрение амплитудных значений высших гармоник показал, что с точки зрения электромагнитной безопасности практическое значение имеет учет только третьей гармоники частотой 150 Гц.

Натурные измерения электротоков в силовой сети показали, что третья гармоника промышленной частоты может быть меньшей, сопоставимой и большей, чем электротоки основной частоты (Рис. 1 – Рис. 3).

Очевидно, что наличие некомпенсированных электротоков является причиной появления соответствующих магнитных полей. Расчеты индукции магнитного поля по известным соотношениям для проводника фиксированной длины показали (3, 4), что для помещения размерами 6х8 м для сегмента длиной 8 м и электротока 5 А индукция магнитного поля на расстоянии 1,0...1,5 м от стены составляет до 0,2 мкТл, а при протекании такого тока в сети электропитания по периметру помещения – 0,9 мкТл в его центре, что более, чем в три раза превышает предельно допустимый уровень для эксплуатации компьютерной техники.

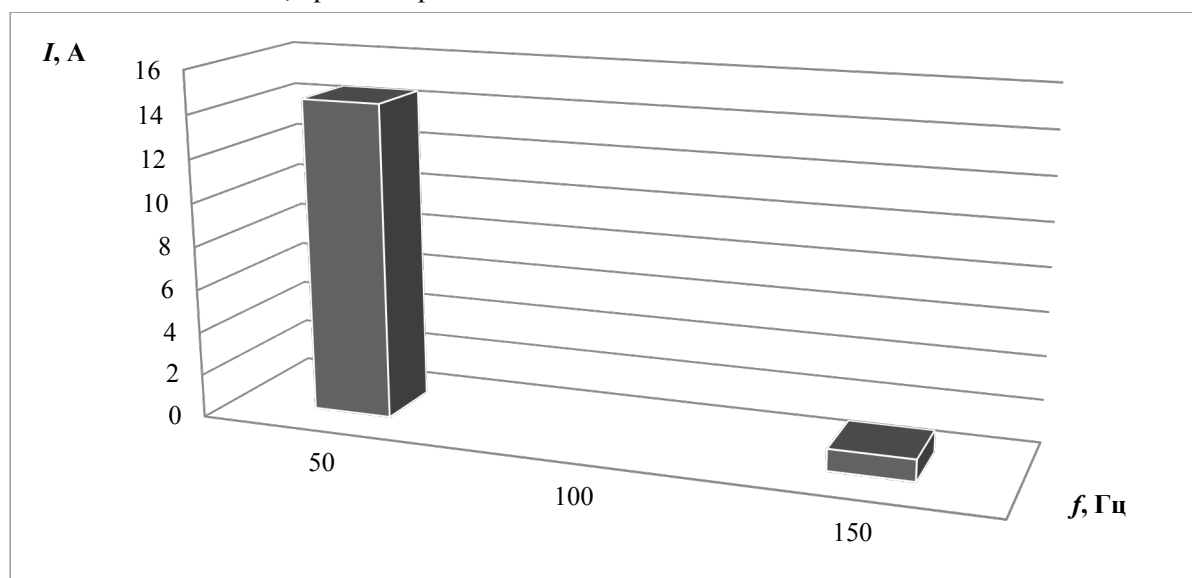


Рис. 1. Электротоки в нулевых рабочих проводниках с долей нелинейных потребителей до 15%.

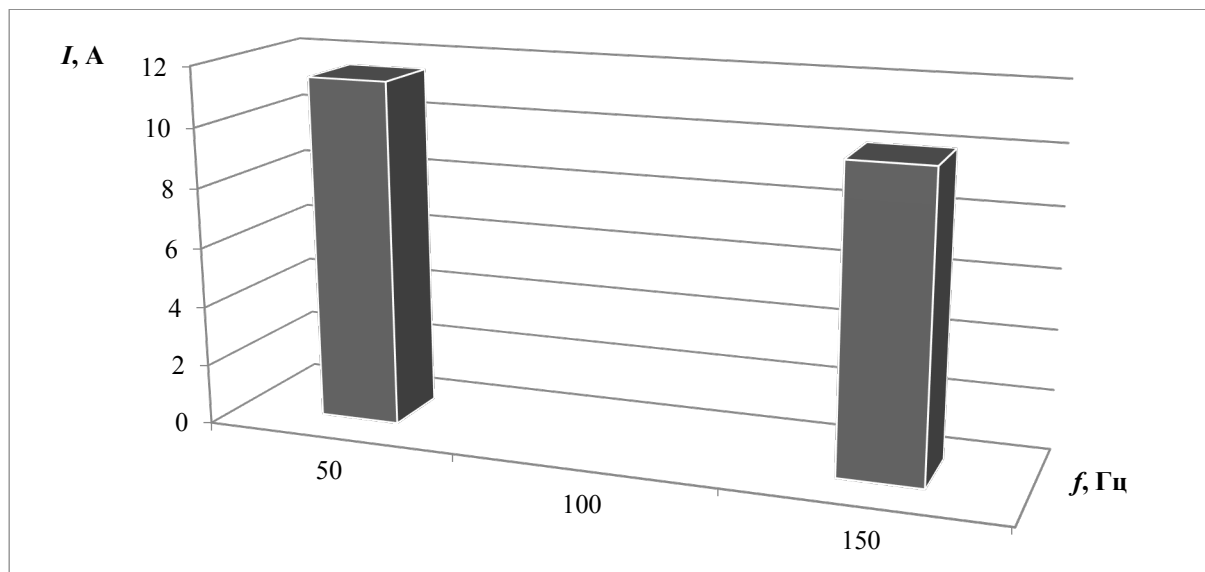


Рис. 2. Электротоки в нулевых рабочих проводниках с долей нелинейных потребителей до 20%.

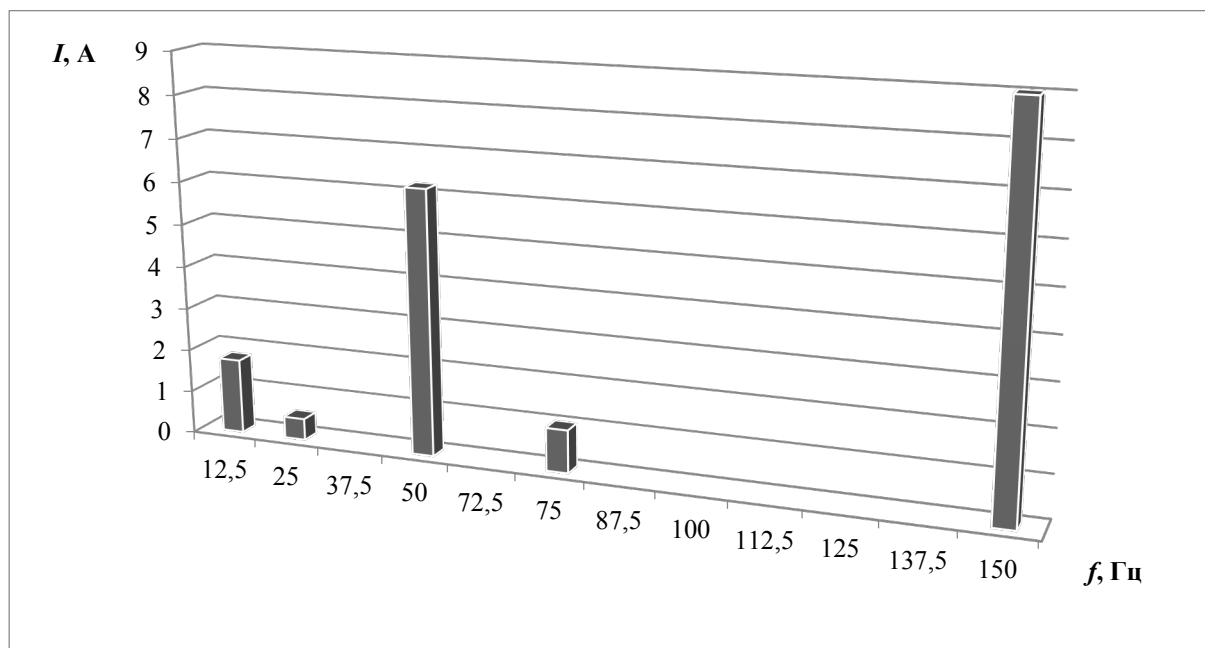


Рис. 3. Электротоки в нулевых рабочих проводниках с долей нелинейных потребителей выше 20%.

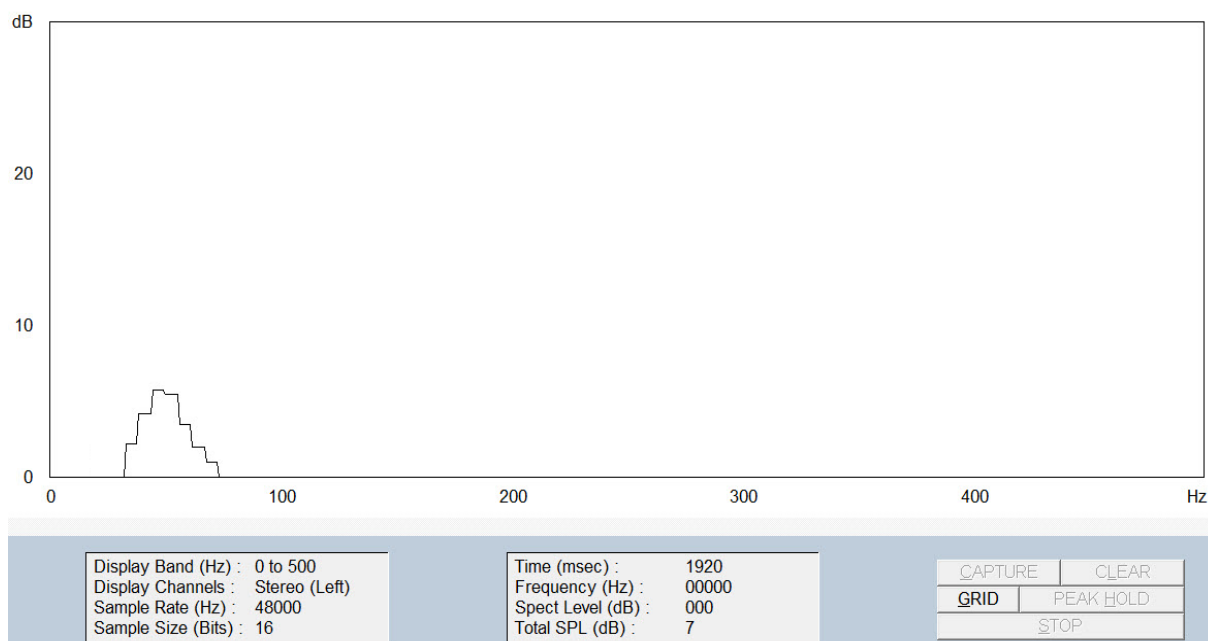
$$B = \frac{\mu \cdot \mu_0}{4\pi \cdot r} \cdot (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) \quad \text{и} \quad (3)$$

$$B = \frac{2\mu \cdot \mu_0 \cdot I \sqrt{x^2 + y^2}}{\pi \cdot x \cdot y} \quad (4)$$

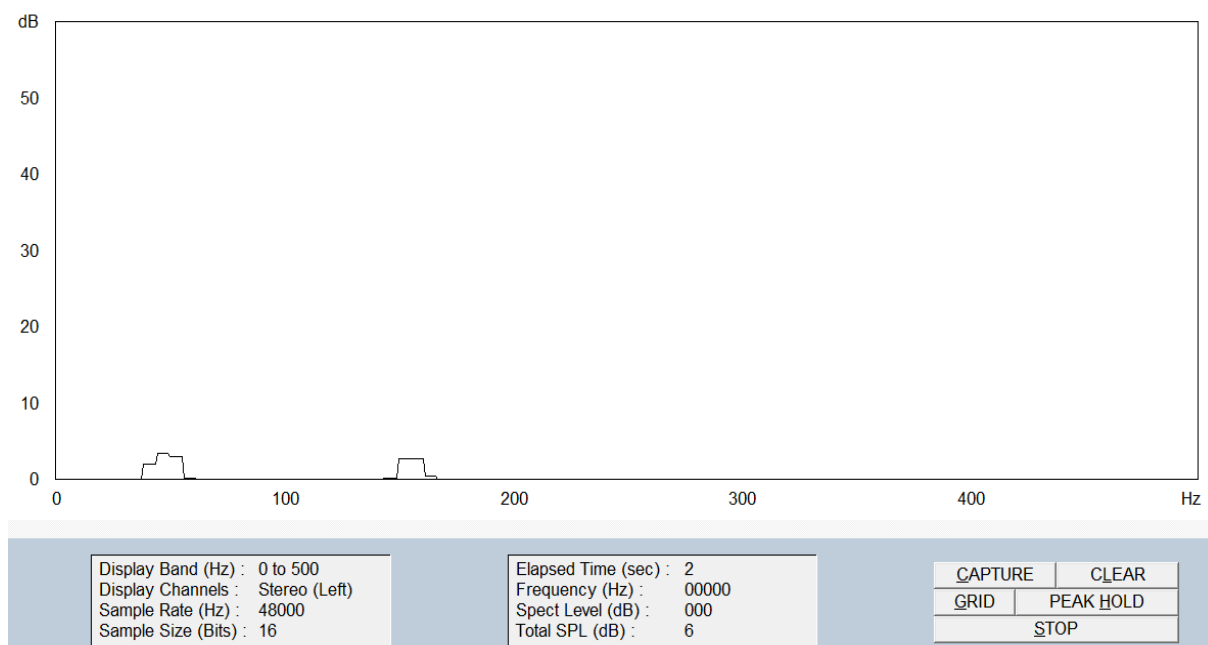
где  $\mu$  – магнитная проницаемость среды;  
 $\mu_0$  – магнитная постоянная;  
 $I$  – эффективное значение электротока;  
 $r$  – расстояние от проводника к точке определения поля;

$x, y$  – длина и ширина помещения.  
 $\varphi_1, \varphi_2$  – углы между концами и направлениями к точке наблюдения.

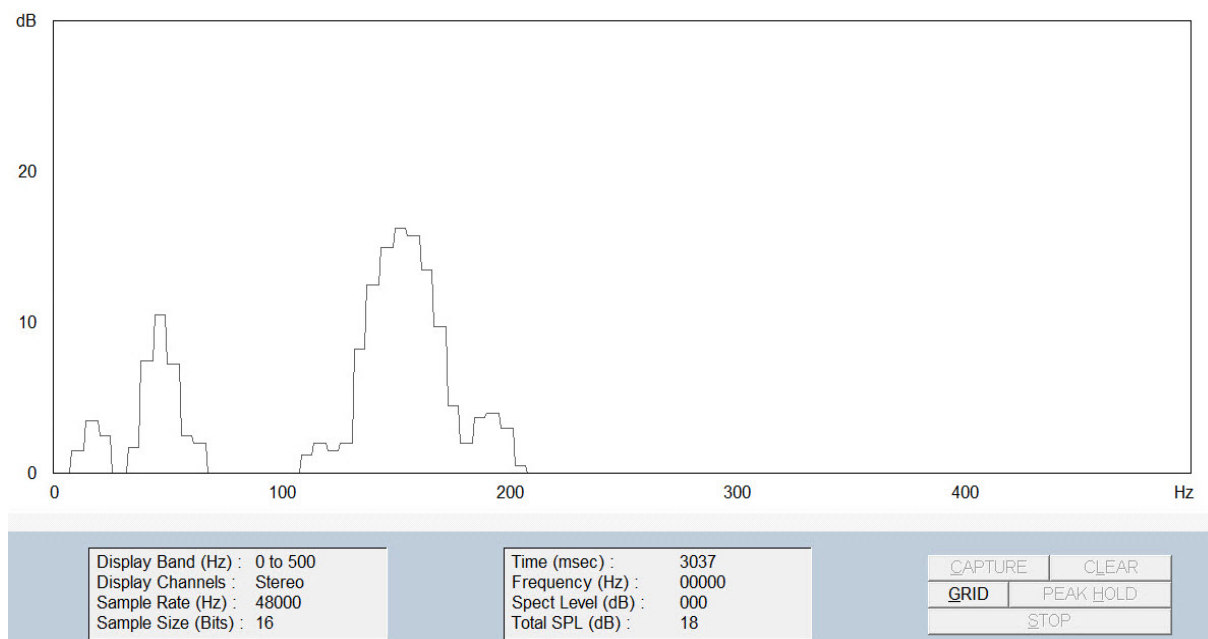
Измерение уровней спектрального состава магнитных полей в помещениях с различным вкладом нелинейных электропотребителей в общую нагрузку на силовую сеть свидетельствует об однозначной связи этих полей с некомпенсированными токами в сети электропитания (Рис. 4).



а) доля нелинейных потребителей до 15%



б) доля нелинейных потребителей до 20%



в) доля нелинейных потребителей выше 20%

**Рис. 4.** Спектральный состав магнитных полей в производственных помещениях с различным вкладом нелинейного электропотребления

Некоторые различия спектральных составов магнитных полей в помещениях и электро-токов в силовых сетях объясняется вкладом в электромагнитную обстановку магнитных полей электронных технических средств, которые могут иметь сложный механизм генерации.

Пересчет уровней магнитных полей из логарифмических единиц в фактическую напряженность магнитного поля осуществляется из соотношения (5)

$$U_{\text{ex}}(\text{дБ}) = 20 \lg \frac{U_{\text{ex}}(\text{В})}{U_k(\text{В})}, \quad (5)$$

где  $U_{\text{ex}}(\text{дБ})$  – уровень сигнала в дБ (с экранной формы);

$U_{\text{ex}}(\text{В})$  – уровень электрического сигнала с датчика магнитного поля в вольтах;

$U_k(\text{В})$  – рабочее напряжение звуковой карты персонального компьютера (В).

Фактические значения индукции магнитного поля получаются из калибровочной таблицы датчика магнитного поля. Так, частоте 50 Гц соответствует чувствительность 0,780 мВ/мкТл, частоте 100 Гц – 0,784 мВ/мкТл, 150 Гц – 0,788 мВ/мкТл, 200 Гц – 0,793 мВ/мкТл.

Существенным фактором изменения гармонического состава напряжения силовой сети даже при отсутствии или минимальном количестве нелинейных потребителей являются колебания напряжения: модуляция напряжения частотой 50 Гц приводит к искажению синусоидальности [1].

Если в сети происходят периодические колебания  $\Delta U$  с частотой  $f$ , то напряжение в сети в любой момент времени определяется соотношением:

$$\begin{aligned} U &= U_0 \sin \omega t + \\ &+ \frac{k}{2} (\cos(\omega - \omega_M) + \cos(\omega + \omega_M) t) =, \\ &= U_0 (1 + k \sin \omega_M t) \sin \omega t \end{aligned}$$

где  $U_0$  – среднее значение огибающей амплитуд напряжения за период  $1/f$ ;

$$k = \frac{\Delta U}{\sqrt{2} U_0} \text{ – коэффициент модуляции;}$$

$\omega_M$  – круговая частота модуляции ( $\omega_M = 2\pi f$ ).

В этом случае кривая напряжения отличается от синусоиды, причём частоты  $\omega \pm \omega_M$  являются интергармониками. Международный

норматив CEI/IEC61000-4-15 рассматривает гармонические колебания частотой 25 Гц, поэтому частоты интергармоник составляют 25 и 75 Гц.

Нужно отметить, что магнитные поля именно этих частот были зафиксированы нами в производственных помещениях, где большинство электропотребителей были нелинейными. Причём в некоторых случаях фиксировалось магнитное поле частотой 12,5 Гц (Рис. 3).

Полученные результаты обуславливают необходимость определения путей снижения влияния магнитных полей некомпенсированных электротоков в сетях электропитания зданий на работающих, а также магнитных полей гармоник и интергармоник магнитного поля промышленной частоты. Особенно это касается магнитного поля частотой 150 Гц.

Использование источников бесперебойного питания двойного преобразования дает положительный эффект, но ограничено по мощностям. Использование таких источников целесообразно при эксплуатации автоматизированных систем и наличия однородных технических средств [6].

Внедрение мероприятий по снижению электромагнитной нагрузки на производственную среду целесообразно проводить в такой последовательности:

- обследование силовой сети на предмет ненормативного перекоса фаз;
- снижение доли нелинейных электропотребителей в общую нагрузку на силовую электросеть здания;
- дистанционирование работающих от источников электромагнитных полей со сложным частотным спектром;
- экранирование, по крайней мере нулевых рабочих проводников, ферромагнитными оболочками. Это касается распределительных щитов (обычно их корпуса изготовлены из дешевого материала без учета специфики условий эксплуатации);

- непрерывный контроль равномерности нагрузки фаз трехфазной силовой электросети.

В каждом конкретном случае разработка и внедрение мероприятий по повышению электромагнитной безопасности работающих осуществляется после определения электромагнитной обстановки, как на отдельных рабочих местах, так и в здании в целом, с обязательным контролем гармонического состава магнитных полей.

Проведенное исследование нельзя считать полностью законченным. Требуют уточнения вклады отдельных источников и механизмы изменения гармонического состава магнитных полей в производственных условиях. Необходимо также выяснить техническую и экономическую целесообразность использования фильтров высших гармоник в здании в целом. Опыт показал, что пассивные фильтры не всегда эффективны, а гибридные фильтры (например, [7]) имеют большую стоимость и являются сложными в эксплуатации.

В процессе измерения некомпенсированных электротоков в сетях электропитания обнаружено наличие электротоков утечки, которые при определенных условиях могут влиять на электромагнитную безопасность работающих и снижать прочностные характеристики здания, ускоряя коррозионные процессы несущих конструкций. Это представляется перспективным направлением дальнейших исследований.

### Заключение

1. Современные бытовые и производственные сооружения, а также отдельные помещения характеризуются сложной электромагнитной обстановкой с превышением предельно допустимых уровней для отдельных диапазонов частот.

2. Одной из главных причин повышения уровней магнитных полей в зданиях являются некомпенсированные электротоки в сетях

электропитания, обусловленные наличием гармоник и интергармоник электротока промышленной частоты 50 Гц.

3. Существенный вклад в электромагнитную обстановку помещений дают магнитные поля технических средств со сложным спектральным составом магнитных полей.

4. Снижение электромагнитной нагрузки на людей достигается внедрением ряда мероприятий, главным из которых является снижение доли нелинейных электропотребителей в общей нагрузке на силовую сеть и экранирование участков с электротоками, соответствующими частотам высших гармоник и интергармоник промышленной частоты 50 Гц.

5. Разработке и внедрению организационно-технических мероприятий по нормализации электромагнитной обстановки должна предшествовать ревизия системы электропитания на предмет отсутствия перекоса фаз, электротоков утечки и выяснение доли нелинейных потребителей в общей нагрузке на силовую сеть.

### Литература

1. Кузнецов В.Г., Куренный Э.Г., Лютый А.П. Электромагнитная совместимость. Несимметрия и несинусоидальность напряжения. – Донецк: Норд-Пресс, 2005. – 250 с.
2. Высшие гармоники в сетях электроснабжения 0,4 кВ / О.А. Григорьев [и др.]. // Новости электротехники, 2003, № 1. – С. 71-74.
3. Плеханов А.С., Зайцев А.И. Средство компенсации реактивной мощности общепромышленных систем энергетики // Энергетические системы, 2008, № 3. – С. 2-7.
4. Сливкин В.Г. Электромагнитная совместимость оборудования информационных технологий при воздействии импульсных электромагнитных помех: дис... канд. техн. наук: 05.09.03. – Самара, 2004. – 212 с.
5. Levchenko O.G., Levchuk V.K. Safe level of electromagnetic field intensity in resistance welding // The Paton Welding Journal, 2008, № 5. – P. 38-47.

6. Глыва В.А. Мониторинг и нормализация физических факторов производственной среды при эксплуатации автоматизированных систем: дис... докт. техн. наук: 05.26. 01 Охрана труда. – Киев, 2012. – 320 с.

7. Кирюхин А.Ю., Буре И.Г. Гибридный фильтр высших гармоник для трехфазных сетей переменного тока 0,4 кВ // Электротехника, 2008, № 5. – С. 37-41.

### References

1. Kuznecov V.G., Kurenniy E.G., Lyutiy A.P. Jelektromagnitnaja sovmestimost'. Nesimmetrija i nesinusoidal'nost' naprjazhenija [Electromagnetic compatibility. Asymmetry and non-sinusoidal voltage]. – Donetsk: Nord-Press, 2005. – 250 p.
2. Vysshie garmoniki v setjah jelektrosnabzhenija 0,4 kV [Higher harmonics in the power networks of 0.4 kV] / O.A. Grigoryev [et al] // Novosti jelektrotehniki [Electrical News], 2003, № 1. – P. 71-74.
3. Plehanov A.S., Zaycev A.I. Sredstvo kompensacii reaktivnoj moshhnosti obshhepromyshlennyh sistem jenergetiki [Means of reactive power compensation of general industrial-scale power systems] // Jenergeticheskie sistemy [Energy Systems], 2008, № 3. – P. 2-7.
4. Slivkin V.G. Jelektromagnitnaja sovmestimost' oborudovaniya informacionnyh tehnologij pri vozdejstvii impul'snyh jelektromagnitnyh pomeh [Electromagnetic compatibility of information technology equipment under the influence of pulsed electromagnetic interferences]: diss... cand. techn. sciences: 05.09.03. – Samara, 2004. – 212 p.
5. Levchenko O.G., Levchuk V.K. Safe level of electromagnetic field intensity in resistance welding // The Paton Welding Journal, 2008, № 5. – P. 38-47.
6. Glyva V.A. Monitoring i normalizacija fizicheskikh faktorov proizvodstvennoj sredy pri jekspluatácii avtomatizovannyh sistem [Monitoring and normalization of the physical environment factors in the operation of Automated Control Systems]: dis... Dokt. tehn. sciences: 05.26. 01 Labor Safety. – Kiev, 2012. – 320 p.
7. Kiryukhin A.Y., Bure I.G. Gibridnyj fil'tr vysshih garmonik dlja trehfaznyh setej peremennogo toka 0,4 kV [Hybrid harmonic filter for three-phase AC networks of 0.4 kV] // Jelektrotehnika [Electric technique], 2008, № 5. – P. 37-41.



**Статья поступила в редакцию 1 марта 2015 г.**

---

*Левченко Лариса Алексеевна* – кандидат экономических наук, доцент, доцент Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт», кафедра автоматизации проектирования энергетических процессов и систем, г. Киев, Украина. E-mail: larlevch@ukr.net

*Перелет Татьяна Николаевна* – аспирант, Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина. E-mail: ta2303ta@ukr.net

*Паньків Кристина Владимировна* – аспирант, Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина. E-mail: ta2303ta@ukr.net

---

*Levchenko Larisa Alekseevna* – PhD, National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine. E-mail: larlevch@ukr.net

*Perelot Tatyana Nikolaevna* – Graduate student, National Aviation University, Kiev, Ukraine. E-mail: ta2303ta@ukr.net

*Pankiv Kristina Vladimirovna* – Graduate student, National Aviation University, Kiev, Ukraine. E-mail: ta2303ta@ukr.net