

УДК 538.69.331.45

В.А. Глыва
К.Д. Николаев
Л.А. Левченко
А.А. Вовк

ИСТОЧНИКИ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА СИЛОВОЙ СЕТИ

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 потребителями с нелинейными вольт-амперными характеристиками 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. 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, магнитное поле, электромагнитная обстановка.

Постановка проблемы. В современных промышленных зданиях наблюдаются изменения характера электрической нагрузки на силовые сети. 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 электрических 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.

Анализ последних исследований и публикаций. Значительная часть исследований искажений напряжений (электроотоков) в силовых сетях проводится с точки зрения электромагнитной совместимости технических средств. В основном они касаются проблем энергосбережения, защиты оборудования от выхода из строя и предотвращения аварий в силовых сетях [1-3]. Но ещё 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 электроотоков в трёхфазной 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.

Изложение основного материала и результаты. 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%.

Частота и синусоидальность электротока без нагрузки контролировались с помощью цифрового запоминающего осциллографа Tektronix TDS2022C. Это является обязательным для исключения внешнего воздействия на формирование гармоничного 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 электротоки 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.

Таким образом, при нелинейных нагрузках электротоков в нулевых рабочих проводниках может значительно превышать электротоков 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.

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 6x8 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.

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

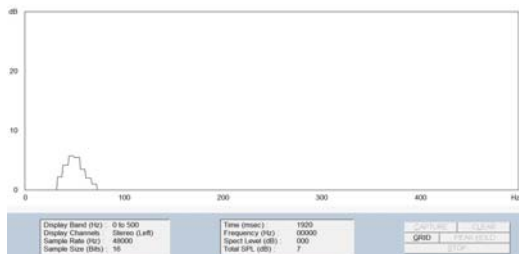
$$B = \frac{2\mu \cdot \mu_0 \cdot I \sqrt{x^2 + y^2}}{\pi \cdot x \cdot y} \quad (4)$$

где μ – магнитная проницаемость среды;
 μ_0 – магнитная постоянная;
 I – эффективное значение электротока;
 r – расстояние от проводника к точке определения поля;

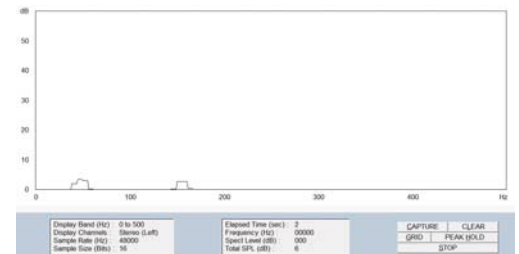
x, y – длина и ширина помещения.

φ_1, φ_2 – углы между концами и направлениями к точке наблюдения.

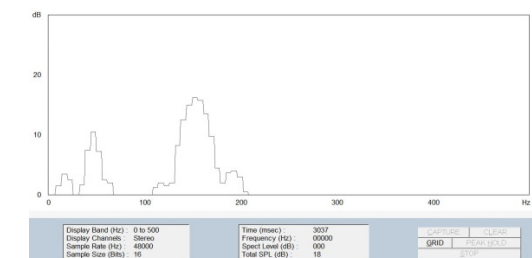
Измерение уровней спектрального состава магнитных полей в помещениях с различным вкладом нелинейных электропотребителей в общую нагрузку на силовую сеть свидетельствует об однозначной связи этих полей с некомпенсированными токами в сети электропитания (Рис. 1).



а) доля нелинейных потребителей до 15%



б) доля нелинейных потребителей до 20%



в) доля нелинейных потребителей выше 20%

Рис. 1. Спектральный состав магнитных полей в производственных помещениях с различным вкладом нелинейного электропотребления

Некоторые различия спектральных составов магнитных полей в помещениях и электротоков 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)

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

где $U_{\text{вх}} (\text{дБ})$ – уровень сигнала в дБ (с экранной формы); $U_{\text{вх}} (\text{В})$ – 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 ΔU с частотой f , то напряжение в сети в любой момент времени определяется соотношением:

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

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

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

ω_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 СЕИ/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 электроток 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;
- дистанцирование 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 электроток в сетях электропитания обнаружено наличие электроток 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.

Выводы.

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 главной причиной повышения уровней магнитных полей в зданиях являются некомпенсированные электроток в сетях электропитания, обусловленные наличием гармоник и интергармоник электроток 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 электроток, 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 перекося фаз, электротоків утечки и выяснение доли нелинейных потребителей в общей нагрузке на силовую сеть.

Список литературы

1. Кузнецов В.Г. Электромагнитная совместимость. Несимметрия и несинусоидальность напряжения / В.Г. Кузнецов, Э.Г. Куренный, А.П. Лютый. – Донецк: Норд-Пресс, 2005. – 250 с.
2. Григорьев О.А. Высшие гармоники в сетях электроснабжения 0,4 кВ / О.А. Григорьев, В.С. Петухов, В.А. Соколов, И.А. Красилов // Новости электротехники. – 2003. - № 1. - С.71 – 74.
3. Плеханов А.С. Средство компенсации реактивной мощности общепромышленных систем энергетики / А.С. Плеханов, А.И. Зайцев // 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 / Сливкин Виктор Геннадиевич. – Самара, 2004. – 212 с.
5. Levchenko O.G. Safe level of electromagnetic field intensity in resistance welding / O.G. Levchenko, V.K. Levchuk // The Paton Welding Journal, 2008. – № 5. – P. 38-47.
6. Глива В.А. Моніторинг і нормалізація фізичних факторів виробничого середовища при експлуатації автоматизованих систем: дис. ...докт.техн.наук: 05.26.21; Глива Валентин Анатолійович. – Київ, 2012. – 320 с.
7. Кирюхин А.Ю. Гибридный фильтр высших гармоник для трехфазных сетей переменного тока 0,4

кВ / А.Ю. Кирюхин, И.Г. Буре // «Электротехника», № 5, 2008 – С. 37 – 41.

References

1. Kuznetsov V., Kurennyi E., Lyutyi A. (2005), «Electromagnetic compatibility. Asymmetry and non-sinusoidal voltage», [«Elektromagnitnaya sovместimost. Nesimetriya i nesuidalnost napryazheniya»]. – Donetsk: Nord-Press., – 250 p. (in Russian).
2. Grigor'ev O., Petukhov V., Krasilov I. (2003), «Higher harmonics in the power networks of 0.4 kV», [Vysshie grmoniki v setyakh elektrsnabzhniya 0,4 kV], Novosti elektrotehniki, No. 1., pp. 71 – 74 (in Russian).
3. Plekhanov A., Zaytsev A. (2008), «Means of reactive power compensation of general industrial-scale power systems», [Sredstvo kompensatsii reaktivnoi moshchnosti obshchepromyshlennykh system energetiki], Energeticheskie sistemy, No. 3., pp. 2 – 7 (in Russian).
4. Slivkin V. (2004), «Electromagnetic compatibility of information technology equipment under the influence of pulsed electromagnetic interferences»: diss...cand.techn. sciences: 05.09.03 [Elektromagnitnaya sovместimost oborudovaniya informatsionnykh tekhnologi pri vozdeistvii impulsnykh elektromagninykh pomeekh: kand.tekhn.nauk: 05.09.03], Samara, 212 p. (in Russian).
5. Levchenko O., Levchuk V., (2008), «Safe level of electromagnetic field intensity in resistance welding», The Paton Welding Journal, No. 5., pp. 38-47.
6. Glyva V., (2012), «Monitoring and normalization of the physical environment factors in the operation of Automated Control Systems»: dis. ... Dokt.tehn.science: 05.26.21, [Monitirnyng i normalizatsiya fizychnykh faktoriv vyrobnychogo seredovyscha pry ekspluatatsii avtomatyzovanykh system: dys. ...dokt.tekhn.nayk: 05.26.21], Glyva Valentin A., Kiev, 320 p.
7. Kiryukhin A., Bure A. (2008), «Hybrid harmonic filter for three-phase AC networks of 0.4 kV» [Gibridnyi filtr vysshyykh garmonik dlya trekhfaznykh setei peremennogo toka 0,4 kV], Elektrotehnika, No. 5, pp. 37 – 41 (in Russian).

Надійшла до редакції 25.10.2017

Рецензент д-р. техн. наук, проф. В.Б. Гого.

Глива Валентин Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой гражданской и промышленной безопасности Национального авиационного университета, (проспект Комарова, 1, Киев, 03058, Украина).

E-mail: glyva.valentin@gmail.com.

Николаев Кирилл Дмитриевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент Национального авиационного университета, кафедра экологии (проспект Комарова, 1, Киев, 03058, Украина).

E-mail: nikolaev.kirill@gmail.com.

Левченко Лариса Алексеевна – кандидат экономических наук, доцент, доцент Национального технического университета Украины «Киевский политехнический университет», кафедра автоматизации проектирования энергетических процессов и систем (ул. Политехническая, 6, Киев, 02000, Украина).

E-mail: larlevch@ukr.net.

Вовк Алексей Ануфриевич – доктор технических наук, профессор, ГП "ННИИПБОТ".

ДЖЕРЕЛА МАГНІТНИХ ПОЛІВ В УМОВАХ СКЛАДНОГО ГАРМОНІЧНОГО СКЛАДУ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ СИЛОВОЇ МЕРЕЖІ

Анотація. Наведено результати експериментальних досліджень гармонічного складу некомпенсованих електричних струмів у системах електропостачання промислових будівель. Встановлено, що ці струми мають частоти гармонік та інтергармонік електричного струму промислової

частоти 50 Гц, які генеруються споживачами з нелінійними вольт-амперними характеристиками, і є причиною підвищення рівня магнітних полів у приміщеннях. Було виміряно рівні спектрального складу магнітних полів у приміщеннях з різним внеском нелінійних електричних споживачів у загальне навантаження на силову мережу. Запропоновані методи зниження магнітних полів. Головні з них - це зниження частки нелінійних споживачів у загальному електричному навантаженні будівлі та екранування ділянок електричної мережі з некомпенсованими електричними струмами.

Ключові слова: гармоніки, інтергармоніки, магнітне поле, електромагнітна обстановка.

Глива Валентин Анатолійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри цивільної та промислової безпеки Національного авіаційного університету, (проспект Комарова, 1, Київ, 03058, Україна).

E-mail: glyva.valentin@gmail.com.

Ніколаєв Кирило Дмитрович – кандидат сільськогосподарських наук, доцент Національного авіаційного університету, кафедра екології (проспект Комарова, 1, Київ, 03058, Україна).

E-mail: nikolaev.kirill@gmail.com.

Левченко Лариса Олексіївна – кандидат економічних наук, доцент, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний університет», кафедра автоматизації проектування енергетичних процесів і систем (вул. Політехнічна, 6, Київ, 02000, Україна).

E-mail: larlevch@ukr.net.

Вовк Олексій Онуфрієвич – доктор технічних наук, професор, ДУ "ННДІПБОП".

HARMONIC ELECTRIC CURRENTS OF INDUSTRIAL FREQUENCY AS THE MAGNETIC FIELD SOURCES AND METHODS TO REDUCE THEIR LEVELS

Modern technological equipment is equipped with impulse power sources. They have nonlinear volt-ampere characteristics. This is the reason for the appearance in the power network of harmonics of electric current of industrial frequency. These currents generate magnetic fields of the corresponding frequencies. The results of experimental research of the harmonic composition of uncompensated electric currents in the building's electrical system are presented. Found that these currents have frequency harmonics and interharmonics electric power frequency of 50 Hz, which are generated by switching power supplies and are cause the enhance of the level of magnetic fields in the premises. Levels were measured spectral composition of the magnetic fields in premises with different contribution of non-linear electric consumers in general load on the power network. Were considered differences spectral composition of the magnetic fields in the premises and to electric power networks. The methods of reducing magnetic fields have been proposed. The main of them - is to reduce the share of non-linear consumers in general electrical load of the building and shielding of plots mains with uncompensated electric currents.

The promising direction of research is the optimization the placement of technological equipment in the room in terms of electromagnetic safety.

Keywords: harmonic, interharmonics, magnetic field, electromagnetic environment,

V. Glyva – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Civil and Industrial Safety of the National Aviation University, (Komarova ave., 1, Kyiv, 03058, Ukraine).

E-mail: glyva.valentin@gmail.com.

K. Nikolaev – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, National Aviation University, Department of Ecology (Komarova ave., 1, Kyiv, 03058, Ukraine).

E-mail: nikolaev.kirill@gmail.com.

L. Levchenko – Candidate of Sciences (Economics), associate professor, assistant professor of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", department of automation of designing of energy processes and systems (Politechnicheskaya str., 6, Kyiv, 02000, Ukraine).

E-mail: larlevch@ukr.net.

O. Vovk – Doctor of Technical Sciences, Professor, PA "NSRIISOSH".