

А.А. ОКУНЬ, аспирант, НТУ "ХПИ", Харьков

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ ГОРОДСКИХ ПОДСТАНЦИЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Theoretical investigation of power frequency magnetic field generated inside the typical high voltage power industrial substations of 110/10 kV and in their sanitary buffer are resulted. It is shown that the magnetic flux density computed values do not reach the exposure limits specified by Ukrainian regulations and exceed ones of some European guidelines.

Представлены результаты теоретических исследований магнитного поля частоты сети, создаваемого внутри и на границе санитарной зоны типовых понижающих подстанций 110/10 кВ, располагаемых в черте города. Показано, что расчетная величина магнитной индукции не превышает предельного значения, установленного действующими нормативными документами Украины и превышает на границе санитарной зоны величины рекомендаций некоторых европейских стран.

Представлено результати теоретичних досліджень магнітного поля частоти мережі, що створюються усередині та на границі санітарної зони типових понижуючих підстанцій 110/10 кВ, що розташовуються в межах міста. Показано, що розрахункова величина магнітної індукції не досягає граничного значення, встановленого діючими нормативними документами Україна та перевищує на границі санітарної зони величини рекомендацій деяких європейських країн.

Введение. Крупные электроэнергетические объекты высокого напряжения (ВН), такие как подстанции и линии электропередачи (ЛЭП), являются источниками магнитных полей (МП) промышленной частоты. Эти поля при превышении предельно-допустимых значений могут воздействовать как на обслуживающий персонал, так и на население. В Украине государственными санитарными нормами и правилами при работе с источниками электромагнитных полей: ДСанНіП 3.3.6.096-2002, установлены предельно-допустимые уровни магнитной индукции (предельно допустимые уровни при общем воздействии в течение 8 часов составляют 1750 мкТл).

В последние годы в Украине проводится активная работа по пересмотру действующих предельных уровней МП, установленных санитарными нормами, с учетом опыта европейских стран. При этом

следует обратить внимание на два важных обстоятельства. Первое состоит в том, что эпидемиологические исследования показали статистическую зависимость между уровнями МП и детской лейкемией [1], а специализированное агентство по онкологическим исследованиям IARC при Всемирной организации здравоохранения WHO (ВОЗ) классифицировало МП промышленной частоты в условиях продолжительного воздействия как "возможно канцерогенное для организма человека" (группа 2В) [2]. Поэтому ВОЗ рекомендует придерживаться предупредительного принципа, т.е. всеми доступными средствами пытаться ограничивать воздействие МП на организм человека.

Второе обстоятельство связано с введением в действие в нескольких европейских странах преимущественно при строительстве новых объектов предельных ("исследовательских") значений МП для населения [3] – 0,4 мкТл (Норвегия в 2007 г., Дания в 2009 г., Голландия в 2005 г.), 0,2 мкТл (три области в Италии: Венета 1999 г., Тоскана 1999 г. и Эмилия-Романья 2000 г.) и 0,1-0,2 мкТл (Швеция в 1996г.), которые значительно ниже украинских норм. Таким образом, появляется актуальная задача оценить на перспективу соответствие уровней МП, создаваемых электроэнергетическими объектами, на границе санитарной зоны и предельными значениями 0,1-0,4 мкТл.

Главными объектами электроэнергетики, при эксплуатации которых возникают опасные МП промышленной частоты и которые оказывают отрицательное воздействие на окружающую среду и человека, являются воздушные (ВЛ) и кабельные линии (КЛ), а также ошиновка подстанций различных классов напряжения, действие которых охватывает значительные жилые зоны и населенные территории. Задача определения уровней МП, создаваемых ВЛ и КЛ, освещена в различных источниках (последние работы в этой области [4-10]), поэтому особого интереса не представляет. На подстанциях аналогичная задача преимущественно решалась экспериментальным путем (последние работы [11-18]). Теоретические расчеты [19-25] в большинстве случаев нацелены на определение распределения МП только на территории подстанции и соблюдение преимущественно только международных рекомендаций ICNIRP 1998 [26] (для населения 100 мкТл; для обслуживающего персонала 500 мкТл), которые отличаются от вышеперечисленных предельных значений европейских стран.

Цель работы – провести теоретические исследования МП промышленной частоты, создаваемых на территории и за пределами городских электрических подстанций, и установить соответствие между уровнями полей и предельными значениями, установленными для на-

селения нормативными документами Украины и европейских стран.

Метод решения. Теоретические исследования МП были проведены для двух стандартных типов понижающих подстанций 110/10 кВ, выполненных по схемам:

- мостик с отделителями в цепях трансформаторов и дополнительной линией, присоединенной через два выключателя (рис. 1, а);
- два блока линия-трансформатор с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линий (рис. 1, б).

Для исследования полей, создаваемых подстанциями ВН, в работе использовался способ, который основан на использовании численного метода конечных элементов, реализованного компаниями Ansoft/Ansys в виде программного продукта Maxwell 2D/3D. Описание данного способа, программы, используемой в расчетах, моделирование элементов подстанции, а также задание токов в проводах ошиновки приведено в работе [27].

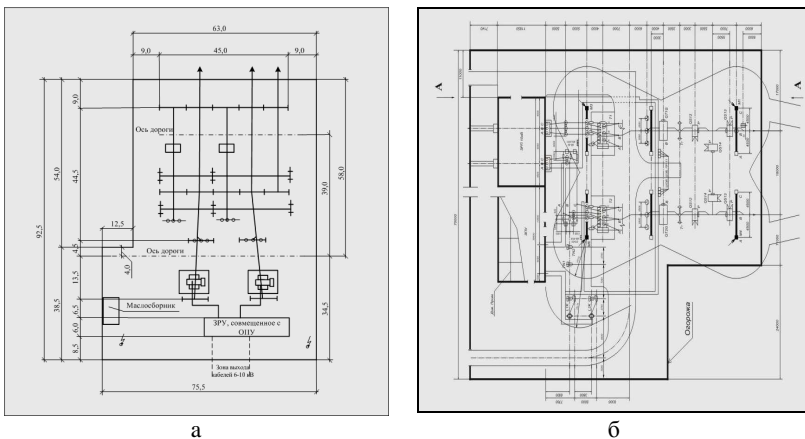


Рис. 1. Планы типовых понижающих подстанций 110/10 кВ.

На рис. 1 приведены планы и основные размеры исследуемых подстанций ВН. На каждой из подстанций установлены по два двухобмоточных понижающих трансформатора 110/10 кВ. Номинальная мощность каждого трансформатора – 40 МВА. Распределительные устройства 10 кВ закрытого типа размещаются в здании подстанции. Мощность подается на подстанцию по нескольким ЛЭП, провода которых крепятся гирляндами изоляторов к траверсам, связывающим стойки линейных (ячейковых) порталов ПСЛ-110Я. Ошиновка выполнена гибкими проводниками (про-

вода марки АС 240/32; расчетный диаметр 20 мм [28]). Для данных подстанций характерно типовое горизонтальное расположение проводов. Такое конструктивное решение с точки зрения уровней электрических и магнитных полей в нормальном эксплуатационном режиме является наилучшим. Однако горизонтальное расположение фазных проводов обусловлено удобством монтажа распределительных устройств [29]. Крепится ошиновка на порталах с помощью подвесных изоляторов. Расстояние между стойками для таких порталов составляет 3 м, высота – 7,85 м, длина траверсы – 6 м. Все аппараты открытого распределительного устройства (ОРУ) располагаются на невысоких металлических стойках. От прямых ударов молнии оборудование ОРУ защищается молниеотводами, смонтированными частично на порталных опорах.

Расстояние между ячейками для первой подстанции 110/10 кВ составляет 9 м, для второй 18 м, расстояние между проводами верхнего яруса ошиновки – 2,5 м, для нижнего изменяется в диапазоне от 1,6 до 2 м. Высота крепления проводов верхнего яруса ошиновки на порталах является типовой и для ОРУ 110 кВ составляет 11,5 м [30].

Для первой подстанции был рассмотрен наиболее тяжелые длительный режим работы, который обеспечивает протекание мощностей к трансформаторам через ЛЭП по двум крайним ячейкам, т.е. дополнительная линия, подключенная через выключатель первой ячейки, вместе с первой ЛЭП питает первый трансформатор, в то время как второй трансформатор питает только вторая линия. Для второй подстанции рассмотрен режим, когда ножи разъединителей неавтоматической перемычки разомкнуты. Таким образом, мощность напрямую через коммутационное оборудование поступает на силовой трансформатор.

Расчеты были проведены для трех вариантов задания токов в проводах ошиновки [27]:

1 – максимальное значение на левой фазе; на остальных – половина фазного тока с отрицательным знаком (направление противоположное): $I_C = 210 \text{ A}$, $I_B = -105 \text{ A}$, $I_A = -105 \text{ A}$;

2 – аналогично только на правой фазе: $I_A = 210 \text{ A}$, $I_B = -105 \text{ A}$, $I_C = -105 \text{ A}$;

3 – равные значения на крайних фазах, но противоположно направлены; на средней фазе ток равен нулю: $I_C = 182 \text{ A}$, $I_B = 0$, $I_A = -182 \text{ A}$.

Токи в проводах, отходящих от трансформаторов со стороны обмотки низкого напряжения 10 кВ, получены через коэффициент трансформации $K_T = 11$ (например, для первого варианта задания токов – $I_{CH} = 2300 \text{ A}$, $I_{BH} = -1150 \text{ A}$, $I_{AH} = -1150 \text{ A}$). Высота плоскости наблюдения над поверхностью земли $h = 1,8 \text{ м}$.

В соответствии с приведенным описанием, планами (рис. 1), разрезами ячеек [30], величинами токов и их направлениями в проводах ошиновки, для типовых подстанций были составлены трехмерные расчетные модели. Графические расчетные модели подстанций 110/10 кВ вместе с направлениями токов, созданные в Maxwell 3D, показаны на рис. 2.

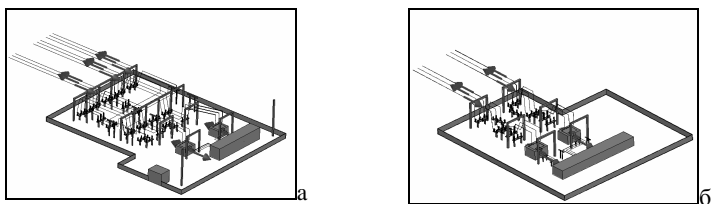


Рис. 2. Расчетные модели подстанций: вариант I (а) и вариант II (б).

Распределение магнитной индукции на территории и за пределами рассматриваемых подстанций при различных вариантах задания токов приведено на рис. 3 и 4. Вспомогательные линии проведены на расстоянии 20 и 30 м от забора подстанции.

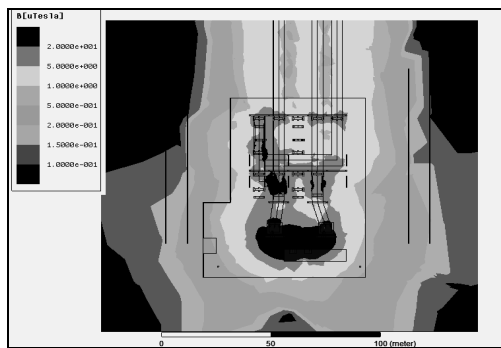


Рис. 3. Распределение магнитной индукции на территории первой подстанции при $I_C = 182$ А, $I_B = 0$ А, $I_A = -182$ А.

Проведенные исследования показали, что величины магнитной индукции за пределами подстанции для третьего варианта задания токов являются наибольшими из трех вариантов. Поэтому достаточно при расчете МП за пределами городских подстанций ВН использовать только третий вариант задания токов. Для определения максимальных значений магнитной индукции на территории подстанции необходимо проводить расчеты для всех трех вариантов.

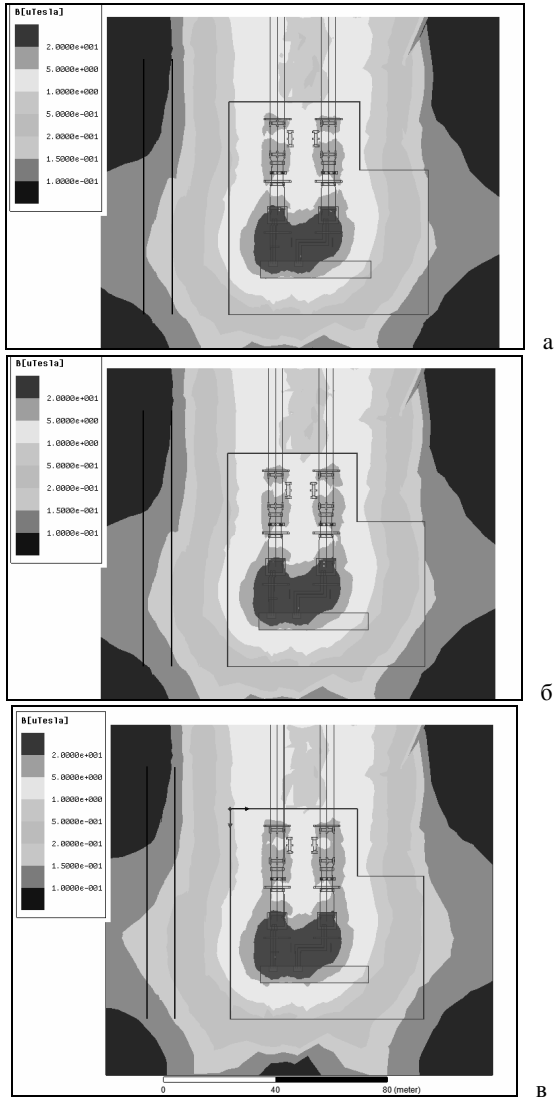


Рис. 4. Распределение магнитной индукции на территории второй подстанции при различных вариантах задания токов: а – $I_A = 210$ А, $I_B = I_C = -105$ А; б – $I_C = 210$ А, $I_A = I_B = -105$ А; в – $I_C = 182$ А, $I_B = 0$ А, $I_A = -182$ А.

По представленным на рис. 4 распределениям МП на второй подстанции видно, что за пределами подстанции область 0,1 мкТл простирается далеко за границы санитарной зоны и достигает с левой стороны 45-55 метров, 0,15 мкТл в нескольких точках касается границы санитарной зоны (0,2 мкТл – 20 м). Область 1 мкТл практически полностью ограничивается забором подстанции.

Для первой подстанции (рис. 3) характерно схожее распределение МП, но с усилением в правую сторону, за счет близкого расположения шин низкого напряжения к забору с этой стороны и более протяженных по территории ОРУ проводов ошиновки ВН. Поэтому область 0,1 мкТл достигает 50-60 метров, область 0,2 мкТл с правой стороны касается границы санитарной зоны и область 1 мкТл, аналогично второй подстанции, практически полностью ограничивается забором подстанции.

На границе санитарной зоны максимальные значения составляют 0,2 мкТл для первой подстанции (с правой стороны) и 0,17 для второй (с левой стороны).

На территории подстанции превышение значений 100 мкТл (предельное значение для населения по международным рекомендациям ICNIRP 1998) выявлено вблизи шин 10 кВ, на участке между трансформаторами и распределительным устройством закрытого типа. В этих местах на подстанции высота подвеса составляет порядка 3 м и токи, протекающие по этим проводам, в 11 раз превышают токи на территории ОРУ 110 кВ. Наибольшие величины МП в данных местах достигают 400 мкТл, но при этом с увеличением расстояния степень снижения МП быстро растет (на расстоянии 3 м от шин не достигает 100 мкТл).

Выводы. Проведенные исследования показали, что величины магнитной индукции на территории рассмотренных подстанций высокого напряжения, не достигают предельных значений, установленных нормативными документами Украины (1750 мкТл) и международными рекомендациями ICNIRP (500 мкТл). За пределами подстанций на границе санитарной зоны максимальные расчетные значения составляют 0,2 мкТл для первой подстанции и 0,17 мкТл для второй и превышают предельные значения для населения, принятые в некоторых европейских странах (Италия и Швеция). Это свидетельствует о наличии возможной потенциальной экологической опасности за пределами подстанции, расположенных в черте города, в связи с пересмотром действующих нормативных документов. Поэтому необходимо рассмотреть на перспективу "разумные" меры по снижению возможных опасных величин на стадии проектирования подстанций.

Список литературы: 1. A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukaemia / [Ahlbom A., Day N., Feychting M. and others] // British Journal of Cancer. – 2000. – Vol. 83, № 5. – P. 692-698. **2.** Non-ionizing radiation, Part 1: Static and extremely low frequency (ELF) electric and magnetic fields. Vol. 80: IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans / [Int. Agency Res. Cancer]. – Lion, France: IARC Press, 2002. – 429 p. **3.** EMFs.info. Electric and magnetic field. Exposure limits in specific countries. Режим доступа: <http://www.emfs.info/Related+Issues/limits/world/> – 25.03.2012 г. – Загл. с экрана. **4.** Moro F. Fast analytical computation of power-line magnetic fields by complex vector method / F. Moro, R. Turri // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2008. – Vol. 23, № 2. – P. 1042-1048. **5.** Segundo H.B.S. Reduction of low voltage power cables electromagnetic field emission in MV/LV substations / H.B.S. Segundo, V.F. Roig // Electric Power Systems Research. – 2008. – Vol. 78, № 6. – P. 1080-1088. **6.** Довбыш В.Н. Электромагнитная безопасность элементов энергетических систем: монография / В.Н. Довбыш, М.Ю. Маслов, Ю.М. Споодобаев. – Самара: ООО "ИПК "Содружество", 2009. – 198 с. **7.** Salari J.C. Comparative analysis of 2- and 3-D methods for computing electric and magnetic fields generated by overhead transmission lines / J.C. Salari, A. Mpalantinos, J.I. Silva // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2009. – Vol. 24, № 1. – P. 338-344. **8.** El Dein A.Z. Magnetic-field calculation under EHV transmission lines for more realistic cases / Adel Z. El Dein // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2009. – Vol. 24, № 4. – P. 2214-2222. **9.** Measurements and predictions of electric and magnetic fields from power lines / [C.P. Nicolaou, A.P. Papadakis, P.A. Razis, G.A. Kyriacou, J.N. Sahalos] // Electric Power Systems Research. – 2011. – Vol. 81, № 5. – P. 1107-1116. **10.** Vujevic S. Comparison of 2D algorithms for the computation of power line electric and magnetic fields / S. Vujevic, D. Lovric, P. Sarajcevic // European Transactions on Electrical Power. – 2011. – Vol. 21, № 1. – P. 505-521. **11.** Saffigianni A.S. Electric and magnetic-field measurements in an outdoor electric power substation / A.S. Saffigianni, C.G. Tsompanidou // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2009. – Vol. 24, № 1. – P. 38-42. **12.** Public magnetic field exposure based on internal current density for electric low voltage systems / T. Keikko, R. Seesvuori, M. Hyvonen, S. Valkealahti // Health Physics. – 2009. – Vol. 96, № 4. – P. 423-431. **13.** Joseph W. General public exposure by ELF fields of 150-36/11-kV substations in urban environment / W. Joseph, L. Verloock, L. Martens // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2009. – Vol. 24, № 2. – P. 642-649. **14.** Occupational exposure to electric and magnetic fields while working at switching and transforming stations of 110 kV / [L. Korpinen, H. Kuisti, R. Paakkonen, P. Vanhala, J. Elovaara] // The Annals of Occupational Hygiene. – 2011. – Vol. 55, № 5. – P. 526-536. **15.** Magnetic-field measurements near two-pole-type distribution substations / A.N. Proios, C.D. Halevidis, E.I. Koufakis; P.D. Bourkas // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2011. – Vol. 26, № 2. – P. 1137-1144. **16.** Fard M.S. Measurement of the magnetic fields of high-voltage substations (230 kV) in Tehran (Iran) and comparison with the ACGIH threshold limit values / M.S. Fard, P. Nasiri, M.R. Monazzam // Radiation Protection Dosimetry. – 2011. – Vol. 145, № 4. – P. 421-425. **17.** Tanaka K. Measurement of power frequency electric and magnetic fields near power facilities in several countries / K. Tanaka, Y. Mizuno, K. Naito // IEEE Transactions on Power Delivery. –

2011. – Vol. 26, № 3. – P. 1508-1513. **18.** *Safigianni A.S.* Electric and magnetic field measurements in a high voltage center / *A.S. Safigianni, A.I. Spyridopoulos, V.L. Kanas* // The Annals of Occupational Hygiene. – 2012. – Vol. 56, № 1. – P. 18-24. **19.** *Hayashi N.* Analysis of 60-Hz fields near ground level in 187 kV switchyard of 187/66 kV AC substation / *N. Hayashi, K. Isaka, Y. Yokoi* // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1992. – Vol. 7, № 1. – P. 237-244. **20.** *Daily W.K.* Measurements and computations of electromagnetic fields in electric power substations / *W.K. Daily, F. Dawalibi* // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1994. – Vol. 9, № 1. – P. 324-333. **21.** A simplified method for magnetic field prediction of 110/10kV indoor substations at the design stage / *C. Song, G. Chen, C. Zhu, Z. Fu* // 18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2005) 6-9 June 2005 Turin, Italy : technical reports. Session № 2: Power quality and EMC. – P. 1-4. **22.** *Nikolovski S.* Electromagnetic field calculation of transformer station 400/110Kv Ernestinovo using the CDEGS software / *S. Nikolovski, Z. Klacic, B. Stefic* // Journal of Electrical Engineering. – 2007. – Vol. 58, № 4. – P. 207-213. **23.** *Сайдова Н.В.* Анализ электромагнитной обстановки на подстанциях и метод расчета напряженностей магнитного поля в распределительных устройствах / *Н.В. Сайдова* // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. – 2009. – N 2 (24). – С. 184-191. **24.** *Munteanu C.* Electric and magnetic field distribution inside high voltage power substations. Numerical modeling and experimental measurements / *C. Munteanu, G. Visan, I.T. Pop* // IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering. – 2010. – Vol. 5, № 1. – P. 40-45. **25.** Simplistic numerical methodology for magnetic field prediction in open air type substations / *C.P. Nicolaou, A.P. Papadakis, P.A. Razis, G.A. Kyriacou, J.N. Sahalos* // Electric Power Systems Research. – 2011. – Vol. 81, № 12. – P. 2120-2126. **26.** ICNIRP: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 Ghz). – Health Physics. – 1998. – Vol. 74, № 4. – P. 494-522. **27.** *Окунь А.А.* Определение магнитного поля подстанций высокого напряжения на основе метода конечных элементов / *С.Ю. Шевченко, В.В. Волохин, А.А. Окунь* // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – Харьков, 2012. – № 2/4(56). – С. 35-39. **28.** Справочник по проектированию электроэнергетических систем / [*В.В. Ершевич, А.Н. Зейлигер, Г.А. Илларионов и др.*]; под ред. *С.С. Рокотяна и И.М. Шатира*. – [3-е изд. перераб. и доп.]. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 322 с. **29.** *Степанов И.М.* Влияние конструкций воздушных линий высокого напряжения на интенсивности магнитных полей по их трассам / *И.М. Степанов, К.П. Кадомская* // Линии электропередачи – 2008: проектирование, строительство, опыт эксплуатации и научно-технический прогресс: Сборник докладов Третьей Российской науч.-практ. конф. с междунар. участием, 3-5 июня 2008г., Новосибирск / под ред. Лаврова Ю.А. – Новосибирск : [б. и.], 2008. – С.81-91. **30.** *Рожкова Л.Д.* Электрооборудование станций и подстанций: учебник для техникумов / *Л.Д. Рожкова, В.С. Козулин*. – [3-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.

*Поступила в редколлегию 08.05.2012
Рецензент проф., д.т.н., Луников В.С.*