

поділу електромагнітного забруднення, що створюється електроенергетичними та радіотехнічними об'єктами, розроблено методичний підхід до встановлення загального електромагнітного забруднення та його навантаження на населення, охарактеризовано стан існуючого електромагнітного забруднення навколишнього середовища на прикладі трьох міст України (м. Київ, м. Львів, м. Одеса) і на основі цього розроблено відповідні гігієнічні рекомендації, визначено пріоритетні джерела електромагнітного забруднення навколишнього середовища населених місць України, встановлено закономірності розподілу електричного і магнітного поля, що створюється підземною високовольтною кабельною лінією електропередачі і запропоновані підходи до гігієнічного регламентування цих чинників в умовах населених місць, науково обґрунтовано та розроблено для населення гранично допустимий рівень електромагнітного випромінювання, що створюється мобільними терміналами стільникового зв'язку стандарту GSM-900, отримано нові дані про вплив на організм електричного поля екстра низької частоти (50 Гц) при поєднаній дії малих доз іонізуючої радіації (цезій-137), обґрунтовано гігієнічні вимоги щодо захисту здоров'я населення в умовах існуючого електромагнітного забруднення населених місць.

ELECTROMAGNETIC POLLUTION AND PROTECTION OF THE POPULATION OF ITS INFLUENCE

*V. Dumansky, S. Bitkin, E. Serdyuk, L. Tomashevskaya, N. Nikitina, A. Bezverkha,
L. Andrienko, S. Galak, S. Medvedev, S. Zotov, E. Bezdenezhnikh*

The work is devoted to the scientific substantiation and improvement of complex hygienic measures to protect public health in the modern electromagnetic situation which has arisen as a result of the rapid development of network radio and electric power facilities. The studies established the basic laws of the territorial and spatial distribution of electromagnetic pollution, which creates electric power and radio facilities, developed a method of introducing a common electromagnetic pollution and the burden on the population, defined the modern state of the electromagnetic pollution in the three cities of Ukraine (Kiev, Lviv, Odessa) and developed hygiene recommendations, priority sources of electromagnetic pollution of Ukrainian cities, identifies patterns of distribution of electric and magnetic fields, which created an underground high-voltage power transmission cable line and proposed a method of hygienic regulation of these factors in urban areas, is designed to limit population allowable level of electromagnetic radiation of mobile terminals GSM-900, new data on the effects on the body of the electric field (50 Hz) and low doses of ionizing radiation (cesium-137), hygiene requirements designed to protect public health from electromagnetic pollution of populated areas.

УДК 621.319.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ ТИПОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ВН В ГОРОДСКОЙ ЧЕРТЕ

Шевченко С.Ю., Окунь А.А.

Вступление. Крупные электроэнергетические объекты высоких напряжений, такие как подстанции и линии электропередачи (ЛЭП), являются источниками низкочастотных электрических полей. Эти поля при превышении предельно-допустимых значений могут воздействовать как на обслужи-

вающий персонал, так и на население (изменения функционального состояния нервной, сердечно-сосудистой и эндокринной систем, а также некоторых обменных процессов, иммунологической реактивности организма и его репродуктивной функции).

Санитарными нормами установлены предельно-допустимые уровни напряженности электрического поля: промышленной частоты для населения – 0,5 кВ/м (внутри жилых домов), 1 кВ/м (в зоне жилой застройки) и 5 кВ/м (в населенной местности, вне жилой застройки) [1]; для обслуживающего персонала – 5 кВ/м (без средств защиты). Для того чтобы оценить возможное воздействие на человеческий организм, а также для выяснения вопросов электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств, напряженность электрического поля должна быть определена при проектировании и реконструкции существующих подстанций, а также для подстанций, находящихся в эксплуатации.

Расчеты электрических полей простых объектов с точки зрения геометрии, таких как ЛЭП, при сведении к плоскопараллельным могут быть произведены аналитически. Множество статей посвящено расчетам полей, создаваемыми ЛЭП [2-5]. На данный момент такая задача расчета не вызывает затруднений. Поля, создаваемые сложными трехмерными объектами, такими как подстанции, как правило, должны рассчитываться, используя численные методы. Метод эквивалентных зарядов (МЭЗ) применялся при вычислении электрических полей в [6]. В работе [7] электрическое поле внутри подстанции вычислено с использованием гибридного численного метода, который объединяет МЭЗ и метод граничных элементов (МГЭ). Другой полуаналитический подход представлен в [8], в нем численным методом отыскивалось неизвестное распределение зарядов на проводниках, затем проводники разбивались на элементы конечной длины, искомое электрическое поле определялось геометрическим суммированием полей, создаваемых каждым из элементов в отдельности. Метод моментов, реализованный посредством NIFREQ, использовался в [9]. В статье [10] расчет был выполнен с помощью МГЭ и метода Галеркина.

Во всех перечисленных работах авторы разрабатывают свои собственные программы, не используя огромное количество доступных смежных программных продуктов, которые в основном используют метод конечных элементов (МКЭ). Главным пре-

имуществом этого метода является его универсальность, что позволяет моделировать широкий круг процессов и явлений. МКЭ дает возможность максимально приблизиться к действительному расположению оборудования подстанции и при этом учесть сложную геометрию объектов. Но для расчета электрического поля подстанций этот метод не рассматривался.

Также необходимо отметить, что практически во всех приведенных работах акцентировалось внимание лишь на подстанциях напряжением 400 кВ и выше, где значения напряженности электрического поля внутри подстанций заведомо превышают предельные значения. В городской черте большинство понижающих подстанций классом напряжения 110 кВ и для них необходимо знать значения напряженности поля не только внутри, но и за пределами территории подстанций.

Поэтому в данной работе представлено эффективное применение МКЭ, для расчета электрического поля крупномасштабных объектов, на примере 3 типовых понижающих подстанций напряжением 110 кВ.

Метод расчета. Практически все основные программные продукты, которые используют МКЭ (Ansys, SolidWorks, ProE и др.), ассоциируются с расчетами механических конструкций. Однако эта тенденция изменилась. МКЭ внедрился в различные области. Подтверждением этого явилось появление значительного числа компаний, разрабатывающих программные продукты на базе МКЭ, предназначенные для расчета электромагнитных полей (Ansoft/Ansys, Infolytica, Jmag-Interenational, Cedrat, CST и другие).

МКЭ сегодня приобрел широкое распространение. Его популярность обусловлена приемлемой точностью решения, возможностью описания криволинейных границ области любой сложности, лёгкостью учета граничных условий различных типов и расчёта поля с объемным зарядом, автоматическим расчётом значений потенциала во всех узлах и, следовательно, быстротой вычисления потенциала и напряженности в любой точке области.

Множество литературы, применительно к различным прикладным задачам,

посвящено МКЭ. Поэтому нет необходимости в приведении описания математической базы. Лишь кратко отметим, что МКЭ базируется на интегральной формулировке граничной задачи. Исследуемая область делится на объемные элементы, в которых неизвестное распределение поля аппроксимируется полиномами. Использование метода Рэлея-Ритца позволяет затем получить систему линейных алгебраических уравнений, из решения которой в конечном итоге будут получены значения потенциалов в каждом узле сетки конечных элементов. После этого при помощи аппроксимации легко определить значение потенциала в произвольной точке.

МКЭ обеспечивает прекрасные возможности визуализации результатов расчета. Вместе с тем МКЭ не лишён недостатков, к которым относится сложность его про-

граммной реализации, необходимость создания сетки элементов во всей области, что требует большого объема компьютерной памяти. Поэтому МКЭ является одним из наиболее ресурсоемких методов. Также нужно отметить, что для вычисления поля в неограниченном пространстве методом конечных элементов, приходится искусственно ограничивать расчётную область, задавая на фиктивных границах дополнительные граничные условия.

Электрическое поле электроэнергетических объектов промышленной частоты (50 Гц) можно рассматривать в каждый данный момент как квазистатическое поле, т.е. применять к нему законы электростатики.

В общем случае система уравнений, описывающих такое поле, имеет следующий вид:

$$\nabla \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla \varphi) = -\rho_v, \quad (1)$$

где, ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость среды; ε_0 – диэлектрическая постоянная, равная $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; ρ_v – объёмная плотность заряда.

При заданных граничных условиях потенциал в любой точке расчетной области находится из решения уравнения (1) МКЭ. Как только потенциал найден, используя вы-

ражение (2) можно найти вектор напряженности электрического поля \vec{E} .

$$\vec{E} = -\nabla \varphi \quad (2)$$

Для решения дифференциального уравнения, описывающее квазистатическое поле, в работе использовались три различных реализации МКЭ – это пакеты JMAG-Studio, CST EM Studio и Ansoft Maxwell. Эти программы обеспечивают возможность расчета потенциалов и напряженностей полей, впоследствии успешно подтверждаемых экспериментально. Данные продукты позволяют успешно импортировать модели, благодаря чему не требуется заново создавать геометрию объектов. Принципиального отличия для расчета электростатического поля во всех пакетах нет. Различие состоит лишь в особенностях геометрических построений, в способе задания потенциалов на проводящих элементах, а также в способах построения начальной сетки КЭ и адаптивном ее уплотнении для достижения необходимой точности.

Источники электрических полей подстанции – проводники и проводящие поверхности с известными потенциалами. Элементы подстанции, такие как линии и шины, моделируются тонкими цилиндрами с диаметром равным расчетному диаметру провода.

Учет земли вводится в расчет путем задания нулевого потенциала всей плоскости, расположенной на нулевом уровне, что равнозначно использованию метода зеркальных изображений.

В большинстве приведенных работах [6,8,9] электрическое поле подстанции определялось лишь проводами ошиновки и ЛЭП. Но порталы и стойки силового и вспомогательного оборудования подстанции играют немаловажную роль. Из-за присутствия таких объектов происходит перераспределение

зарядов, что приводит к деформированию картины поля [11].

Трансформаторы, молниеотводы, ограждения, закрытое распределительное устройства (ЗРУ), помещение общеподстанционного пункта управления (ОПУ), помещения для реакторов смоделированы многогранниками с нулевым потенциалом. Металлические порталы ЛЭП и ошиновки, стойки разрядников (ОПН), разъединителей, выключателей и других устройств смоделированы П-образными блоками, состоящими из параллелепипедов. Все эти элементы имеют решетчатую структуру, которая заменена цельной металлической. Потенциал аналогично принимается равным нулю.

Опорные изоляторы и изолирующие конструкции силового оборудования моделируются цилиндрами с заданной диэлектрической проницаемостью ($\epsilon_r = 6$). Влиянием гирлянд изоляторов линейных и шинных порталов пренебрегаем, поскольку поле считается возле поверхности земли на значительном удалении.

Очевидно, для того чтобы улучшить точность вычисления напряженности электрического поля, оборудование должно быть смоделировано как можно более детально. Это приводит к большим моделям систем, расчеты которых превосходят возможности компьютеров. Поэтому необходимо соблюдение компромисса между рациональным использованием доступных программ и своевременным обновлением технических средств.

Примеры расчета. Расчет был произведен для трех стандартных типов понижающих подстанций 110/10(6) и 110/35/10(6) кВ, выполненных по схемам:

- мостик с отделителями в цепях трансформаторов и дополнительной линией, присоединенной через два выключателя (рисунок 1, а);
- одна рабочая, секционированная выключателем, и одна обходная (рисунок 1, б);
- одна рабочая, секционированная выключателем (рисунок 1, в).

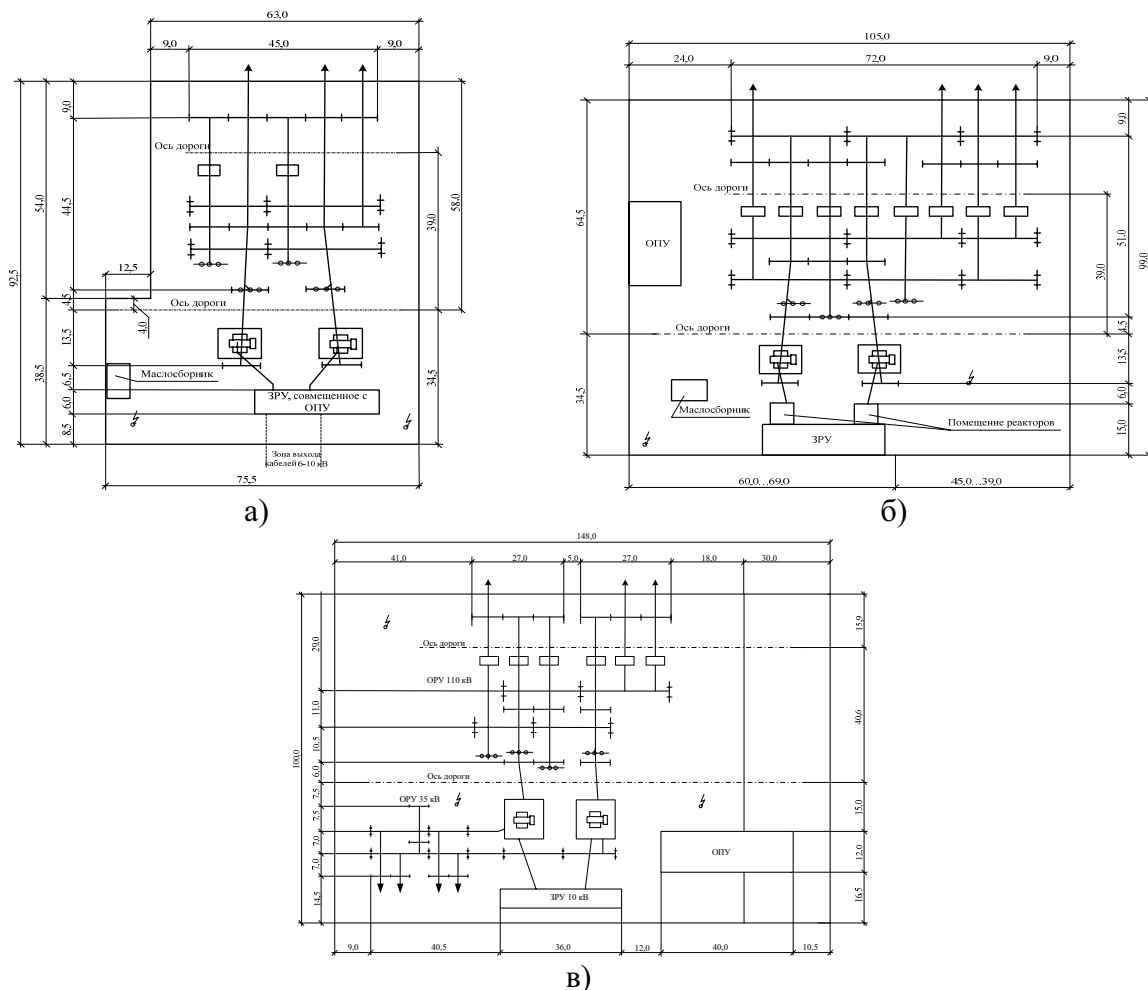


Рисунок 1. Планы понижающих подстанций 110 кВ.

На рисунку 1 приведені плани і основні розміри трьох типових підстанцій. На цих підстанціях встановлені два двухобмоточних (а, б) або трьохобмоточних (в) трансформатора, які понижають напругу до 10(6) і 35/10(6) кВ відповідно. РУ-10 кВ закритого типу розміщуються в будинку підстанції, РУ-35 кВ відкритого типу розташоване на території підстанції поряд з РУ-110 кВ. Напруга 110 кВ подається на підстанцію по декільким ЛЕП, провід яких кріпляться гірляндами ізоляторів к траверсам, зв'язуючим стійки лінійних (ячейкових) порталів ПСЛ-110Я. Ошиновка виконана гнучкими провідниками (провід марки АС). Кріпляться шини на порталах з допомогою підвесних ізоляторів. Відстань між стійками для таких порталів становить 3 м, висота - 7,85, довжина траверси - 6 м. Всі апарати відкритого розподільного пристрою (ОРУ) розташовані на невисоких металевих основах. Від прямих ударів блискавки обладнання ОРУ захищається молниєотводами, смонтованими частково на порталних опорах. По території підстанції передбачені проїзди для можливості механізації монтажу і ремонту обладнання.

Відповідно до приведенного описання, планами (рисунок 1) і розрізами ячеек для типових підстанцій [12] були складені трьохмерні розрахункові моделі, представлені на рисунку 2.

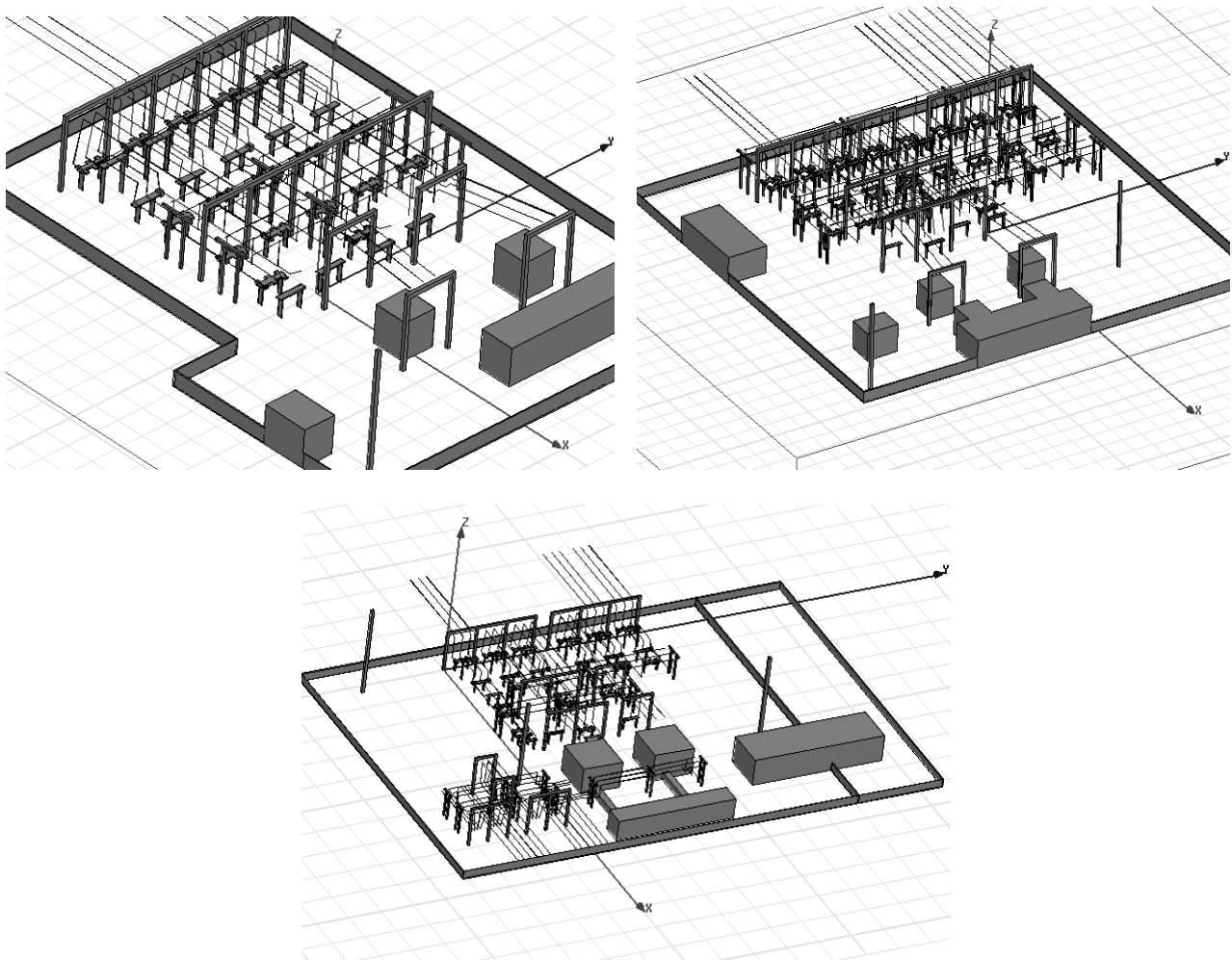


Рисунок 2. Розрахункові моделі підстанцій.

Ошиновка ОРУ і провідів ЛЕП на стороні 110 кВ виконані провідом АС 240/32 (розрахунковий діаметр 20 мм [13]).

Поскольку найбільші значення напруги поля досягаються при макси-

мальном заряді на провіді, т. є при напругі рівном фазному на одному з крайніх провідів [14]. Поэтому значення напруги прийняті наступними: $U_A=63,5$ кВ, $U_B=U_C=-31,75$ кВ.

Отходящие кабельные и воздушные линии 10(6) кВ в расчете не учитывались, поскольку неизвестно их расположение, а также их вклад на картину электрического поля является незначительным по сравнению с полем, создаваемым ошиновкой ОРУ.

Результаты вычисления электрического поля представлены на рисунке 3. По

полученным данным, необходимо отметить, что напряженность электрического поля за пределами подстанции для всех рассмотренных типов не достигает предельных значений, установленных нормативными документами, что подтверждает работы [5,8].

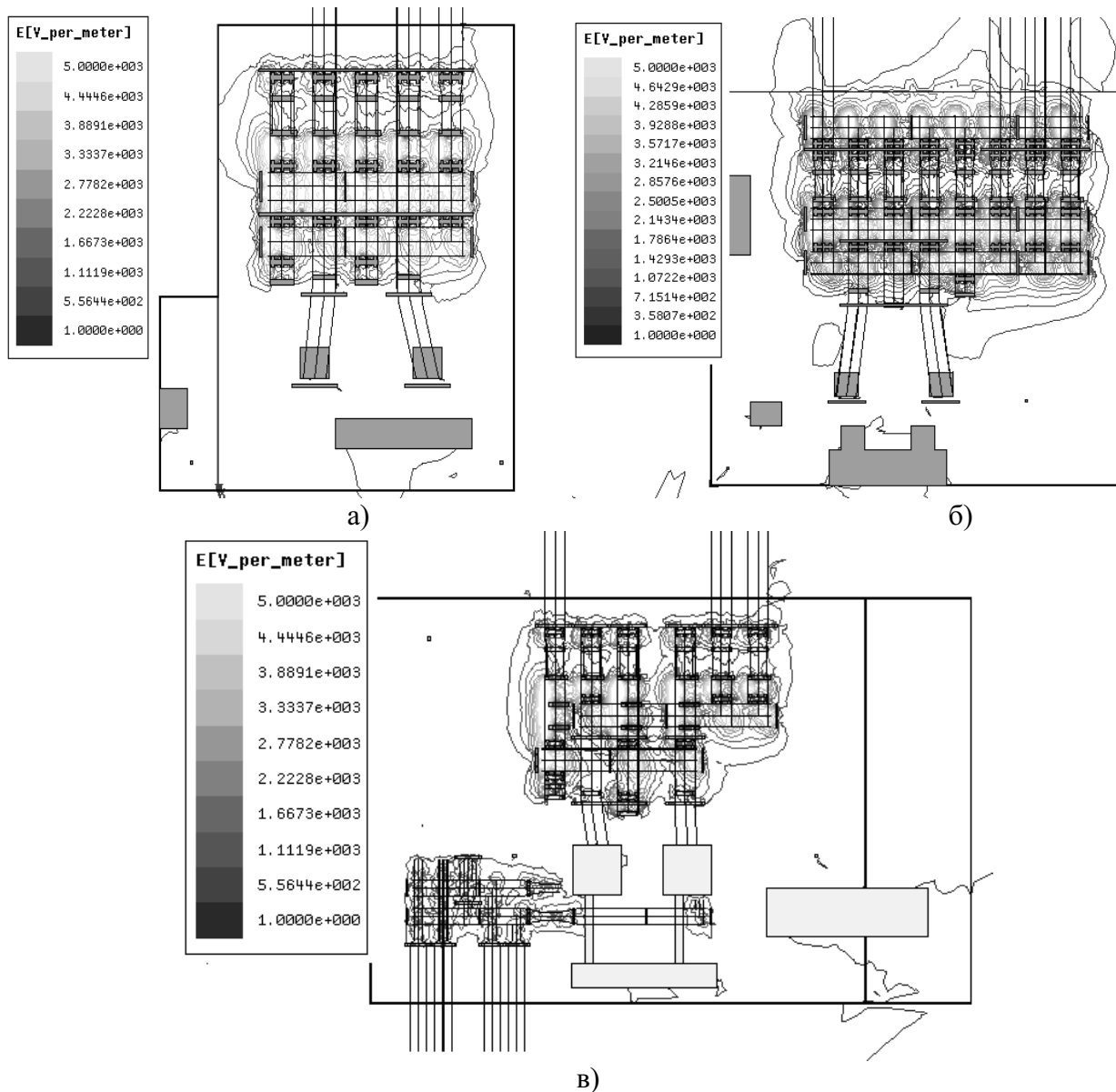


Рисунок 3. Распределение напряженности электрического поля на высоте 1,8 м над землей.

На территории подстанции превышение значений 5 кВ/м наблюдается в ОРУ 110 кВ под проводом с фазным напряжением в местах с наименьшей высотой подвеса (3,6 м). Эти области располагаются между металлическими стойками оборудования, начинаются за выключателями и продолжаются до соединения с поперечной ошинов-

кой. Для схемы на рисунке 1, б дополнительное место находится под ошиновкой со стороны ЛЭП 110 кВ. В этих зонах время пребывания обслуживающего персонала ограничено, поэтому не требуются никаких мероприятий для снижения величины напряженности поля.

Область со значением 1 кВ/м простирается на всей территории оборудования ОРУ 110 кВ (а также ОРУ 35 кВ для схемы “одна рабочей, секционированная”). Эта область достигает дороги перед трансформаторами, со стороны ЛЭП – линейных порталов (ошиновки – для схемы “одна рабочая и одна обходная”), а с левой и правой стороны приближается на расстояние 3 м к забору (для схемы “мостика”).

Границы области 0,5 кВ/м ограничиваются забором с левой и правой стороны, однако со стороны питающих ЛЭП 110 кВ выходит за пределы подстанции. Поле в этой области определяется уже конфигурацией воздушных линий.

Сравнение результатов расчета.

Сравнение результатов расчета, полученных в JMAG-Studio, CST EM Studio и Ansoft Maxwell, проводились по двум условным линиям, проходящими под центральным проводом второй (рисунок 4, а) и четвертой (рисунок 4, б) ячеек на высоте 1,8 м для подстанции, выполненной по схеме “мостика” (рисунок 1, а). Распределения напряженностей электрического поля по длине ячеек, приведенные на рисунке 4, свидетельствуют о количественном и качественном совпадении, что подтверждает корректность использованного метода расчета. Возможность применения каждой из программ.

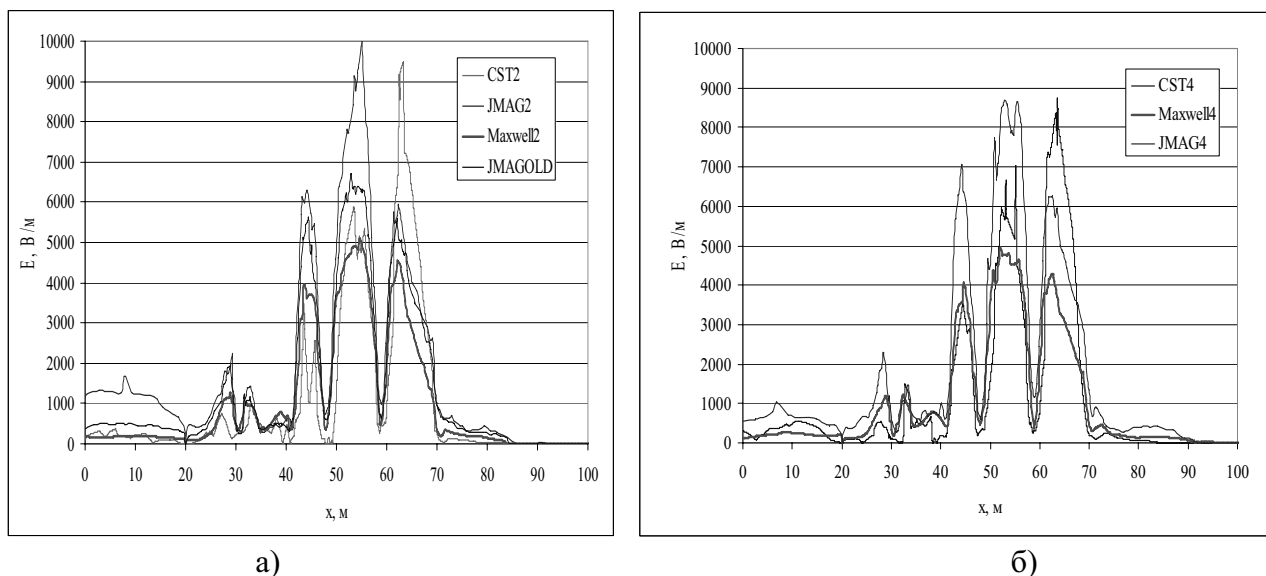


Рисунок 4. Сравнение результатов расчета.

Выводы

1. Вычисление квазистатических электрических полей промышленной частоты – важная задача проектирования электроэнергетических объектов и для существующих подстанций.
2. В этой статье вычисление электрических полей крупномасштабных объектов базируется на использовании МКЭ. Этот метод является пригодным для расчетов напряженности электрического поля подстанции. Позволяет максимально приблизиться к действительному расположению оборудования и при этом учесть сложную геометрию объектов.
3. Расчеты показали, что напряженность электрического поля за пределами подстанции для всех типов не достигает предельных значений, установленных нормативными документами. На территории подстанции превышение значений 5 кВ/м наблюдается в ОРУ 110 кВ под проводом с фазным напряжением в местах с наименьшей высотой подвеса (3,6 м).
4. Сравнения полученных расчетных данных тремя различными программами показало количественное и качественное совпадение результатов расчета.
5. Данный подход с использованием программных продуктов на базе МКЭ может быть полезным для проектировщиков электроэнергетических объектов, а также для специалистов в области электромагнитной экологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Державні санітарні норми і правила захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань : ДСанПіН № 239-96. Затв. Наказом МОЗ України від 01.08.1996 р., №239.
2. Vujevic S. Comparison of 2D algorithms for the computation of power line electric and magnetic fields /S. Vujevic, D. Lovric, P. Sarajcev //Euro. Trans. Electr. Power. – 2011. – №21. – P. 505-521.
3. Tzinevrakis A.E. Analytical calculation of the electric field produced by single-circuit power lines /A.E. Tzinevrakis, D.K. Tsanakas, E.I. Mimos //IEEE Trans. Power Del. – 2008. – Vol.23, №3. – P. 1495-1505.
4. Peric M. Electromagnetic field analysis in vicinity of power lines /M. Peric, S. Ilic, S.Aleksic //Electrotechnika & Elektronika, – Sofia, 2008. – №11-12. – P. 51-56.
5. Довбыш В.Н. Электромагнитная безопасность элементов энергетических систем : монография /В.Н. Довбыш, М.Ю. Маслов, Ю.М. Сподобаев. – Самара: ООО «ИПК «Содружество», 2009. – 198 с.
6. An effective modelling method to analyze the electric field around transmission lines and substations using a generalized finite line charge /[B.Y. Lee, J.K. Park, S.H. Myung and other] //IEEE Trans. Power Del. – 1997. – Vol.12, №3. – P. 1143-1150.
7. Krajewski W. Numerical modelling of the electric field in HV substations /W. Krajewski //IEE Proc. Sci. Meas. Technol. – 2004. – Vol.151, №4. – P. 267-272.
8. Electric and magnetic field distribution inside high and very high voltage substations /[C. Munteanu, Gh. Visan, I. T. Pop and other] //Proc. 20th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, 12-16 Jan. 2009. – P. 277-280
9. Nikolovski S. Electromagnetic field calculation of transformer station 400/110Kv Ernestinovo using the CDEGS software /S. Nikolovski, Z. Klaic, B. Stefic //Journal of Electrical Engineering. – 2007. – Vol.58, №4, – P. 207-213.
10. Trkulja B. Computation of electric fields inside large substations /B. Trkulja, Z. Stih //IEEE Trans. Power Del. – 2009. – Vol.24, №4. – P. 1898-1902.
11. Расчет электрического поля вблизи опоры линии электропередачи высокого напряжения
12. 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.
13. Справочник по проектированию электроэнергетических систем /В.В.Ершевич, А.Н. Зейлигер, Г.А. Илларионов и др. ; под ред. С.С. Рокотяна и И.М. Шапиро. – [3-е изд. перераб. и доп.]. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 322 с.
14. Александров Г.Н. Установки сверхвысоких напряжений и охрана окружающей среды /Г.Н. Александров. – Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1989. – 360 с.

Резюме. У даній статті на прикладі трьох типових підстанцій 110 кВ представлено ефективно застосування МСЕ для розрахунків електричних полів великомасштабних об'єктів. Підхід з використанням програмних продуктів на базі МСЕ може бути корисним для проектувальників електроенергетичних об'єктів, а також для фахівців в області проблем електромагнітної екології.

Summary. In this article on example of three typical substations 110 kV an effective application of FEM for calculation electric field of large scale objects is presented. Electric field strength computations are carried out. Approach with using software products on the basis of FEM can be useful to designers of electric power objects and for specialist in the field of electromagnetic ecology problems.

Index Terms – exposure, finite-element method (FEM), outdoor switchgear, substation, electric field calculation, busbars.