

Представлено спосіб прогнозування магнітного поля підстанцій високої напруги. Розглянуті питання, що стосується правильного завдання струмів в проводах ошиновки підстанцій. Практичний приклад розрахунку магнітного поля типової підстанції додається

Ключові слова: метод скінчених елементів, підстанція, магнітне поле

Представлен способ прогнозирования магнитного поля подстанций высокого напряжения. Рассмотрены вопросы, касающиеся правильного задания токов в проводах ошиновки подстанции. Практический пример расчета магнитного поля типовой подстанции прилагается

Ключевые слова: метод конечных элементов, подстанция, магнитное поле

A way for magnetic field prediction of high voltage substations is presented. Questions concerning the correct assignment of currents in substations busbars are considered. A practical example for calculation magnetic field in vicinity of typical power substation is enclosed

Keywords: finite element method, power substation, magnetic field

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПОДСТАНЦИЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

С. Ю. Шевченко

Кандидат технических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой*

Контактный тел.: (057) 707-62-46, 050-291-44-51

E-mail: syurik42@rambler.ru

В. В. Волохин

Кандидат технических наук, старший преподаватель
Кафедра электроэнергетики

Сумской государственной университет

ул. Римского-Корсакова, 2, г. Сумы, Украина, 40007

Контактный тел.: (0542) 33-12-67, 095-104-08-90

E-mail: vetvol-13@rambler.ru

А. А. Окунь

Аспирант*

Контактный тел.: (057) 707-69-77, 067-546-53-25

E-mail: alexandr.okun@gmail.com

*Кафедра передачи электрической энергии
Национальный технический университет "Харьковский
политехнический институт"
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002

1. Вступление

Известно, что главными объектами электроэнергетики, при эксплуатации которых возникают опасные магнитные поля (МП) промышленной частоты и которые оказывают отрицательное воздействие на окружающую среду и человека, являются воздушные (ВЛ) и кабельные линии (КЛ) различных классов напряжения, действие которых охватывает значительные жилые зоны и населенные территории.

Провода ошиновки на подстанциях, как правило, не причисляют к этому перечню. Долгое время считалось, что напряженность МП в рабочих зонах открытых распределительных устройств (ОРУ) и ВЛ напряжением 330-750 кВ не превышает 25 А/м, в то время как вредное действие МП на биологический объект проявляется при напряженности во много раз большей [1].

В последние годы в Украине проводится активная работа по пересмотру действующих предельных уровней МП, установленных санитарными нормами, с учетом опыта европейских стран. Поэтому рассмотрение задач, связанных с определением МП, создаваемых подстанциями, ВЛ и КЛ, расположенных в городской черте, является актуальной задачей.

Если расчеты МП ВЛ и КЛ трудностей не вызывают при допущении, что поля можно считать плоскопараллельными. То поле, создаваемое подстанциями, таковым не является. Электрические подстанции представляют собой совокупность различных электротехнических устройств, ошиновки, КЛ и ВЛ. Вследствие чего требуют наличия большого количества геометрических данных. Это в конечном итоге приводит к сложным задачам расчета, которые решаются, либо численными методами [2-5], либо упрощенными способами [6-7].

В данной работе представлен способ, основанный на использовании численного метода, реализованного компаниями Ansoft/Ansys в виде программного продукта Maxwell 2D/3D, для расчета МП, создаваемого подстанциями высокого напряжения.

2. Построение расчетной модели подстанции высокого напряжения

Расчет трехмерных магнитных и электрических полей крупномасштабных объектов производится численными методами. Среди всех существующих мето-

дов наиболее общепризнанным и распространенным является метод конечных элементов (МКЭ). Популярность данного метода подтверждается наличием значительного числа программных пакетов на базе МКЭ (JMAG, FLUX3D, Comsol, EMS, Maxwell и другие), применяемых для расчета практически любых электромагнитных полевых задач.

В данной работе для расчета трехмерного МП, создаваемого подстанциями высокого напряжения использован программный продукт Maxwell 2D/3D, разработанный компаниями Ansoft/Ansys.

Уравнение (1), которое описывает МП, создаваемое оборудованием подстанции, и которое решается в Maxwell 3D Magnetostatic, используя МКЭ, получено из закона Ампера и уравнения Максвелла. После того как определен магнитный векторный потенциал A , магнитная индукция B и напряженность H могут затем вычислены через выражения (2) и (3).

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_r \mu_0} \nabla \times A \right) = J, \quad (1)$$

$$B = \nabla \times A, \quad (2)$$

$$H = \frac{B}{\mu_r \mu_0}, \quad (3)$$

где ∇ – оператор набла; H – напряженность МП, А/м; J – плотность электрического тока А/м; B – магнитная индукция, Тл; A – магнитный векторный потенциал Вб/м; μ_r – относительная магнитная проницаемость; μ_0 – магнитная постоянная, которая равна $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Поскольку можно считать, что в электроустановках электрическое поле возникает при напряжении на токоведущих частях, а магнитное – при прохождении тока по этим частям. Поэтому для снижения времени расчета основное внимание при моделировании подстанции уделено проводам ошиновки, которые моделируются цилиндрами с радиусом равным радиусу провода и имеют сложную пространственную конфигурацию.

Оборудование подстанции (силовые трансформаторы, нелинейные ограничители перенапряжений, разрядники, выключатели, разъединители и трансформаторы тока), а также помещение закрытого распределительного устройства, забор и порталы представляются упрощенными моделями, состоящими из блоков-параллелепипедов в соответствии с их действительными размерами и конкретными свойствами материалов. Изоляционные конструкции перечисленного оборудования моделируются цилиндрами с соответствующими значениями μ_r .

Вопрос, связанный с учетом обратных токов в земле, вызывает разногласия. Единого мнения на этот счет не существует. В одной части работ, например [2,6,8], поле определяется лишь токами в фазных проводах над поверхностью земли (влиянием поля, создаваемым обратными токами в земле, которые располагаются на значительной глубине, пренебрегают), в другой части работ, как и в данной, – по аналогии с расчетом электрического поля, помимо токов в проводах вводятся их зеркальные ото-

бражения в земле с токами равными по величине, но с противоположным направлением в каждый момент времени [5,9,10]. Выполняются поставленные условия в Maxwell 3D Magnetostatic путем задания дополнительного граничного условия *odd symmetry*, которое присваивается всей плоскости на нулевом уровне. Данное условие подразумевает, что ток по одну сторону плоскости протекает в противоположном направлении к току по другую сторону плоскости.

Одним из основных вопросов при расчете МП городских подстанций является вопрос правильного задания токов в проводах питающих ВЛ 110 кВ, отходящих 10 кВ, а также шин подстанции. Чтобы прояснить этот вопрос, рассмотрим плоскопараллельную задачу расчета МП трехфазной одноцепной линии с горизонтальным расположением фазных проводов (междуфазное расстояние $d = 2,5$ м) и высотой подвеса H равной 3,6 и 11,2 м. Такое пространственное расположение проводов является подобным для ошиновки типовых проектов подстанций 110 кВ.

Резльтирующее МП B находится геометрическим суммированием полей, создаваемых каждым проводником по отдельности (4-6):

$$B = \sqrt{\left(\sum_3 B_{v_i} \right)^2 + \left(\sum_3 B_{h_i} \right)^2}, \quad (4)$$

$$B_{h_i} = B' h_i + B'' h_i = \frac{\mu_0 \mu_r I_i}{2\pi} \times \left(\frac{H_i - h}{(x - d_i)^2 + (H_i - h)^2} + \frac{H_i + h}{(x - d_i)^2 + (H_i + h)^2} \right), \quad (5)$$

$$B_{v_i} = B' v_i - B'' v_i = \frac{\mu_0 \mu_r I_i}{2\pi} \times \left(\frac{x - d_i}{(x - d_i)^2 + (H_i - h)^2} - \frac{x - d_i}{(x - d_i)^2 + (H_i + h)^2} \right), \quad (6)$$

где $B' h_i$ и $B' v_i$ – горизонтальная и вертикальная составляющие вектора магнитной индукции реального провода, Тл; $B'' h_i$ и $B'' v_i$ – горизонтальная и вертикальная составляющие вектора магнитной индукции зеркального отображения реального провода, Тл; I_i – ток в проводе, А; H_i – высота подвеса, м; d_i – междуфазное расстояние; h – высота плоскости наблюдения над поверхностью земли;

Вычисление МП подстанции не может быть точно выполнено из-за невозможности предсказать ток, текущий через проводники в данный момент. Только для известных сезонных и ежедневных изменений нагрузки можно точно определить поле. А при отсутствии таких графиков (например, на стадии проектирования) можно спрогнозировать поле для максимально возможных нормальных длительных рабочих токов и, соответственно, связанные с этими токами предельные значения магнитной индукции. Поэтому в работе определение величины токов в проводниках произведено через натуральную мощность линии $P_{\text{нат}}$ (9), которая для линий напряжением $U = 110$ кВ составляет 30 МВт [11]. С учетом того, что большинство ВЛ работают в режиме перегрузки на

25-30%, получим, что ток в линии I_L составляет порядка 200 А.

$$I_L = \frac{P_{\text{нат}}}{\sqrt{3} \cdot U} \quad (9)$$

Таким образом, токи, протекающие по проводам рассматриваемой трехфазной линии, смещенные на 120 градусов, имеют вид представленный на рис. 1. Подставив токи в выражения (6)–(8), получаем зависимость $B(x,t)$ для высот 3,6 и 11,2 м, изображенную на рис. 2.

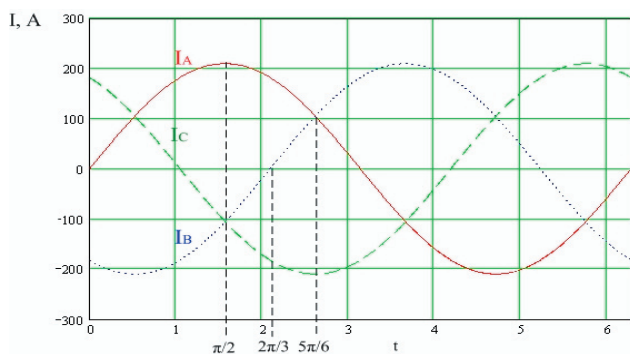


Рис. 1. Токи в проводах трехфазной линии

По результатам расчета плоскопараллельной задачи можно отметить, что максимальные величины МП за один период времени при отличных высотах наблюдаются в различные моменты времени. Так, для высоты $H = 11,2$ м наибольшие значения достигаются в момент времени $t = 2\pi/3$ (кривая 1 на рис. 3,а). Это объясняется тем, что в данный момент времени составляющие индукции МП от дальнего провода (на среднем проводе ток равен нулю) с противоположным знаком меньше, чем составляющие от двух проводов (соседнего и дальнего) при $t = \pi/2$, несмотря на то, что значение тока на крайнем проводе в

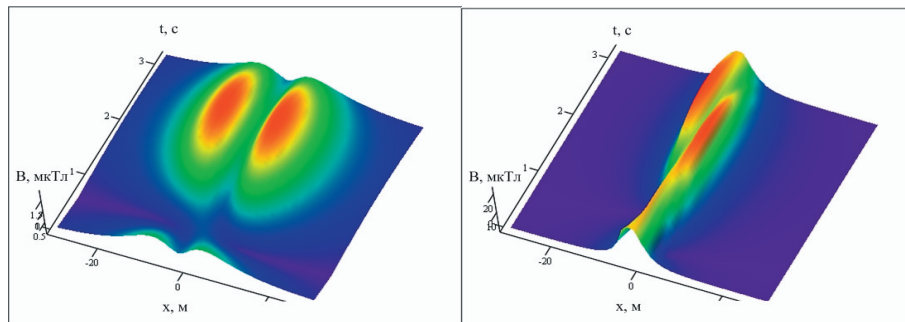


Рис. 2. Распределение магнитной индукции на высоте $h = 2$ м над землей при высоте подвеса провода $H = 11,2$ (а) и $H = 3,6$ (б)

этом случае больше, чем при $t = 2\pi/3$ (кривая 2 на рис.3,а).

При максимуме тока на центральном проводе ($t = \pi/2$), т.е. фазе В, составляющие от двух соседних проводов с противоположным знаком снижают величины магнитной индукции до наименьших значений за период (кривая 3 на рис. 3,а).

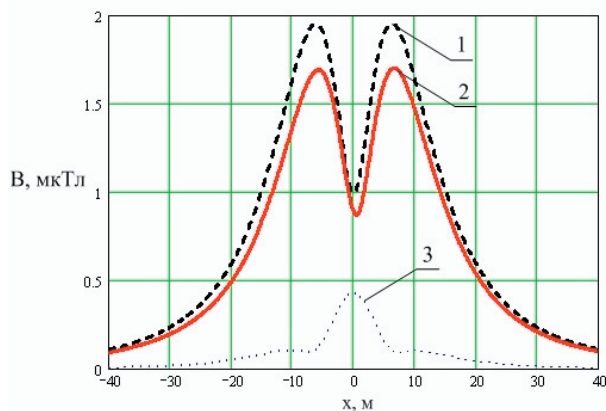
Для высоты $H = 3,6$ м максимальные значения МП (рис. 3,б) наблюдается в моменты времени:

- 1) $t = \pi/2$, амплитудное значение тока на фазе А (кривая 1);
- 2) $t = 5\pi/6$, амплитудное значение тока на фазе С (кривая 2).

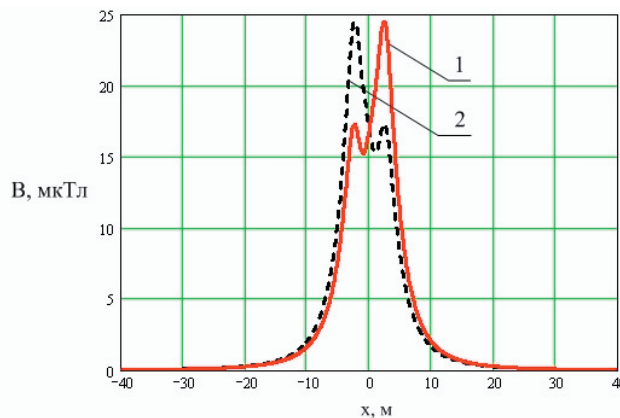
Из этого следует, что нет необходимости проводить расчеты МП на подстанции в каждый момент времени.

Достаточно определить распределение МП для трех моментов времени (при следующих величинах токах):

- 1) максимальное значение на левой фазе; на остальных - половина фазного тока с отрицательным знаком (направление противоположное): $I_A = 210$ А, $I_B = -105$ А, $I_C = -105$ А;
- 2) аналогично только на правой фазе: $I_C = 210$ А, $I_B = -105$ А, $I_A = -105$ А;
- 3) равные значения на крайних фазах, но противоположно направлены; на средней фазе ток равен нулю: $I_C = 182$ А, $I_B = 0$, $I_A = -182$ А.



а)



б)

Рис. 3. Распределение магнитного индукции на высоте 2 м над землей при высоте подвеса провода $H = 11,2$ (а) и $H = 3,6$ (б)

3. Пример расчета МП, создаваемого подстанциями высокого напряжения

Рассмотрим в качестве примера расчет МП, создаваемого оборудованием электрической подстанции 110/10 кВ. Ее общий вид представлен на рис. 4.

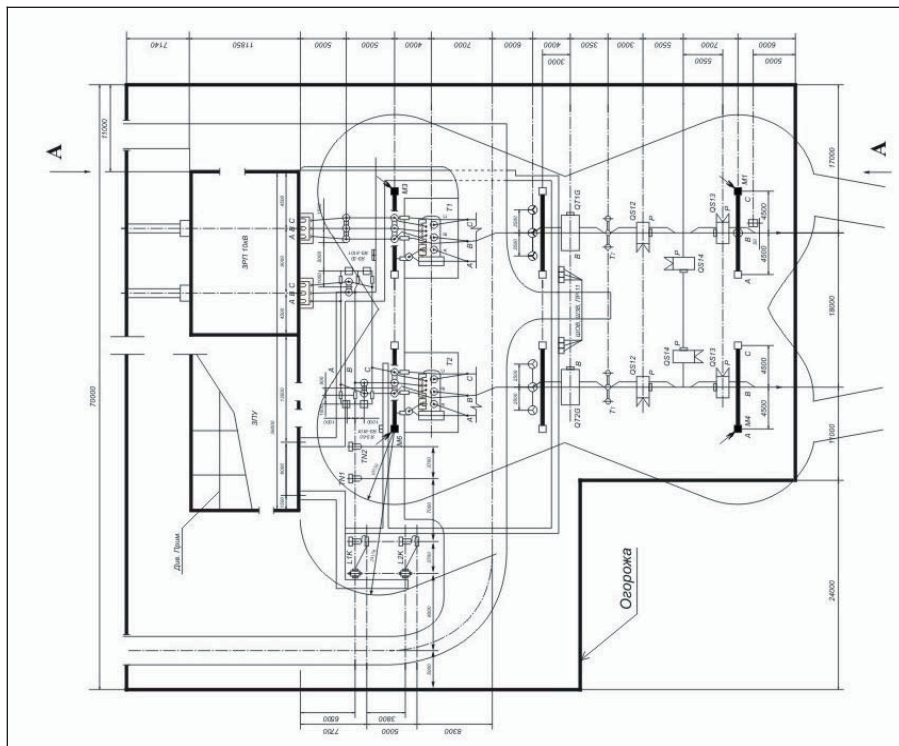


Рис. 4. План подстанции 110/10 кВ

Данная подстанция выполнена по схеме „два блока линия-трансформатор с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линий”. Два идентичных силовых трансформатора установлены на подстанции. Номинальная мощность каждого трансформатора – 40 МВА, номинальные напряжения высокой и низкой сторон – 110 и 10 кВ соответ-

ственно. Питание на подстанцию подается по двум одноцепным ВЛ 110 кВ (марка провода АС 240/32, радиус провода 0,01 м [11]). Ножи разъединителей неавтоматической перемычки разомкнуты. Таким образом, мощность напрямую через коммутационное оборудование поступает на силовой трансформатор.

Для типовых проектов подстанций характерно горизонтальное расположение фаз. 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 [8].

Расчеты были проведены для трех вариантов задания токов. В данной работе приведен только второй случай, когда максимальное значение на левой фазе, а на остальных – половина фазного тока с отрицательным знаком:

$$I_C = 210 \text{ A},$$

$$I_B = -105 \text{ A},$$

$$I_A = -105 \text{ A}.$$

Токи в проводах, отходящих от трансформаторов со стороны обмотки низкого напряжения 10 кВ, получены через коэффициент трансформации $K_T = 11$ ($I_{CH} = 2300 \text{ A}$, $I_{BH} = -1150 \text{ A}$, $I_{AH} = -1150 \text{ A}$).

Высота плоскости наблюдения над поверхностью земли $h = 1,8 \text{ м}$.

Графическая расчетная модель подстанции 110/10 кВ вместе с направлениями токов, созданная в Maxwell 3D, показана на рис. 5,а. Распределение магнитной индукции на территории подстанции и за ее пределами приведено на рис. 5,б.

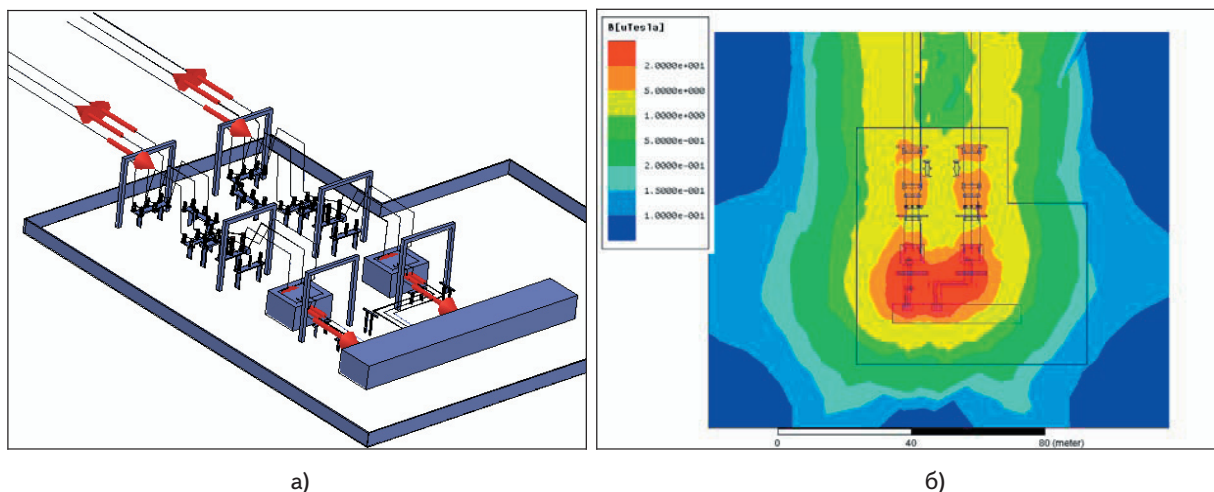


Рис. 5. Расчетная модель с указанием направлений токов (а) и распределение магнитной индукции на территории подстанции (б)

Выводы

1. Расчеты МП крупномасштабных объектов является сложной трудоемкой задачей. Для решения подобных задач применяются численные методы.

2. Правильное задание токов, отражающих действительные потоки мощности на подстанции, определяет точное прогнозирование МП.

3. Поскольку наибольший интерес на подстанции представляют максимальные значения поля, то

нет необходимости проводить расчеты поля в каждый момент времени. Достаточно определить для трех мгновенных состояний МП: максимумы тока на крайних фазах и нулевое значение на средней фазе, при соответствующих значениях на соседних фазах.

4. Решение задачи расчета МП на стадии проектирования может быть полезно инженерам-проектировщикам электроэнергетического оборудования и специалистам в области электромагнитной экологии.

Литература

1. Долин, П.А. Основы техники безопасности в электроустановках [Текст]: учеб. пособие для вузов. / П.А. Долин - 2-е изд., перераб. и доп. - М. Энергоатомиздат, 1984. - 448 с.
2. Hayashi, N. Analysis of 60-Hz fields near ground level in 187 kV switchyard of 187/66 kV AC substation [Текст] / N. Hayashi, K. Isaka, Y. Yokoi // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1992. – Vol. 7, № 1. – P. 237–244.
3. Daily, W.K. Measurements and computations of electromagnetic fields in electric power substations [Текст] / W.K. Daily, F. Dawalibi // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1994. – Vol. 9, № 1. – P. 324 – 333.
4. Nikolovski, S. Electromagnetic field calculation of transformer station 400/110kV Ernestinovo using the CDEGS software [Текст] / S. Nikolovski, Z. Klacic, B. Stefic // Journal of Electrical Engineering. – 2007. – Vol. 58, № 4. – P. 207–213.
5. Довбыш, В.Н. Электромагнитная безопасность элементов энергетических систем [Текст]: монография / В.Н. Довбыш, М.Ю. Маслов, Ю.М. Сподобаев. – Самара: ООО «ИПК «Содружество», 2009. – 198 с.
6. Сайдова, Н.В. Анализ электромагнитной обстановки на подстанциях и метод расчета напряженностей магнитного поля в распределительных устройствах [Текст] / Н.В. Сайдова // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. – 2009. – N 2 (24). – С. 184–191.
7. A simplified method for magnetic field prediction of 110/10kV indoor substations at the design stage [Текст] / 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. – London, UK: Inspec/Iee, 2005. – P. 1-4.
8. Степанов, И.М. Влияние конструкций воздушных линий высокого напряжения на интенсивности магнитных полей по их трассам [Текст] / И.М. Степанов, Кадомская К.П. // 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.
9. Abdallah A.S. Electric fields from transmission lines nearby populated areas in Egypt: theory versus experiment [Текст] / A.S. Abdallah // Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering, 23-27 August 1999, London: in 5 part – Vol. 2. – London: Inspec/Iee, 1999. – P. 119–122.
10. Ehtaiba J.M. Magnetic field around the new 400kV OH power transmission lines in Libya [Текст] / J.M. Ehtaiba, S.M. Elhabashi // Proc. WSEAS International Conference on Environment, Medicine and Health Sciences (EMEH '10), March 23-25, 2010, Penang, Malaysia. – Faro: WSEAS Press, 2010. – P. 17–22.
11. Справочник по проектированию электроэнергетических систем [Текст] / 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.