

А.И.Скрипников, рук.гр., Г.М. Борисов, нач.отд

http://ecoportal.su/view_public.php?id=3992

Филиал ОАО "Южный ИЦЭ" "ЮжВТИ", ул. Содружества, 35, Ростов-на-Дону, 344090

Вычисление уровня магнитного поля частотой 50 Гц в соответствии с требованиями гигиенического норматива ГН 2.1.8/2.2.4.2262-07

1. Требования ГН к вычислению интенсивности МП

Магнитные поля, нормируемые гигиеническим нормативом (ГН) 2.1.8/2.2.4.2262-07 [1], определяются в рамках санитарно-эпидемиологического законодательства как один из возможных физических факторов окружающей среды, создание которых на территории страны связано с производственной средой предприятий и организаций. Математическое описание электромагнитного поля, впервые предложенное Дж. К. Максвеллом [2], является примером единой математической структуры, существование которой позволило объединить воедино электрические и магнитные физические величины и объявить об открытии нового вида материи - электромагнитного поля (ЭМП).

Составной частью этой общей математической структуры, которая нам нужна только в качестве объяснения природы рассматриваемых физических явлений, является векторное магнитное поле, изменяющееся по синусоидальному (гармоническому) закону - то есть, это и есть физический фактор, нормируемый параметр которого необходимо определять и сравнивать со значением ПДУ во всех предусмотренных законодательством случаях.

Термины норматива "*источник магнитного поля частотой 50 Гц*" и "*промышленная частота ЭМП*" уточним следующим образом, чтобы не вызывать дополнительных вопросов к тексту ГН:

- **Источник магнитного поля частотой 50 Гц** - элемент энергетической системы или установки, в работе которого применяется электромагнитное поле промышленной частоты и создающий переменное магнитное поле в окружающей среде.
- **Промышленная частота ЭМП** - частота вынужденных колебаний электромагнитного поля, используемого в промышленности. Измеряется в герцах (Гц). На территории Российской Федерации используется частота 50 Гц.

Термин норматива "*интенсивность магнитного поля*" также требует уточнения в соответствии со строгим математическим определением этого понятия в векторном анализе. Интенсивность обычно связывают с удельной плотностью источников векторного поля $\vec{A}=(A_x, A_y, A_z)$ или, в соответствии со строгим математическим определением, - с дивергенцией векторного поля

$$\operatorname{div} \vec{A} = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z} \quad (1)$$

Для вектора магнитной индукции \vec{B} равенство

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (2)$$

справедливо во всей области определения векторного поля (это одно из уравнений Максвелла), что является математическим обоснованием отсутствия в природе источников этого поля. Но нормировать магнитное поле в соответствии с этим уравнением невозможно.

В названии 3 графы таблицы 1 [1] содержится уточнение смысла нормируемого физического фактора воздействия:

Интенсивность МП частотой 50 Гц (**действующие значения**), мкТл (А/м)

В соответствии с этим уточнением результирующей величиной интенсивности МП в выбранном месте пребывания населения будем считать значение квадратного корня из среднего за период $T=1/50\text{с}$ значения скалярного произведения вектора магнитного поля на себя. Или в математической форме записи:

$$B_{\text{ред}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} (\vec{B}, \vec{B}) dt} \quad (3)$$

Формулу (3) будем считать необходимой и достаточной для нормирования интенсивности магнитного поля вблизи источника МП частотой 50 Гц.

Далее, векторным магнитным полем, в соответствии с математическим определением, является функция, значением которой в некоторой точке евклидова пространства с радиус-вектором \vec{r} есть вектор, меняющийся со временем

$$\vec{B}(\vec{r}, t) = \sqrt{2} B_x(\vec{r}, t) \cdot \vec{i} + \sqrt{2} B_y(\vec{r}, t) \cdot \vec{j} + \sqrt{2} B_z(\vec{r}, t) \cdot \vec{k} \quad (4)$$

или с учетом гармонических (синусоидальных) свойств колебаний промышленной частоты

$$\vec{B}(\vec{r}, t) = \sqrt{2} B_x' \sin(\omega t + \varphi_x) \cdot \vec{i} + \sqrt{2} B_y' \sin(\omega t + \varphi_y) \cdot \vec{j} + \sqrt{2} B_z' \sin(\omega t + \varphi_z) \cdot \vec{k} \quad (5)$$

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ - единичные орты координатных осей, $\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 50$ - круговая частота колебаний, $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ и $\sqrt{2} B_x', \sqrt{2} B_y', \sqrt{2} B_z'$ - фазы и амплитуды колебаний координатных функций.

Действующие значения B_x', B_y', B_z' , входящие в функцию векторного поля, от времени не зависят и для них справедливо следующее равенство:

$$B_{\text{рез}} = \sqrt{(B_x^2)^2 + (B_y^2)^2 + (B_z^2)^2} \quad (6)$$

Таким образом, если нам в некотором месте известны по-координатные действующие (амплитудные) значения индукции магнитного поля, то результирующее значение интенсивности в этом месте можно получить по формуле (6). Приборы с трех координатным индукционным датчиком, рекомендуемые в [3] для измерения магнитных полей (МП) частотой 50 Гц на рабочих местах, в своей работе применяют ту же формулу к измеряемой инструментальным способом физической величине.

Задача вычисления интенсивности МП упрощается ещё тем, что ГН нормирует отсутствие в контролируемой зоне материалов, магнитные свойства которых нарушают соотношение

$$B = \mu_0 \cdot H \quad (7)$$

Очевидно, что принципиальных сложностей при определении значения интенсивности МП в соответствии с требованиями ГН нет, есть только вопрос о действующих в выбранном для контроля месте пространства по-координатных значениях функции векторного поля, создаваемого конкретным источником МП частоты 50 Гц. При использовании измерительных методов этот вопрос решается инструментальным путем.

При расчетных методах существует множество путей вычислений, в зависимости от применяемого математического аппарата.

2. Существующие методы вычисления интенсивности МП

В истории исследований ЭМП известны успешные попытки замены использованного Максвеллом фундаментального математического аппарата в частных случаях описания электромагнитных полей, применяемых в промышленных электроустановках, которые позднее легли в основу теоретических основ электротехники [4].

Весьма плодотворной длительное время была идея использования комплексных функций от комплексной переменной при поиске решений задач свободных и вынужденных синусоидальных колебаний в электрических цепях, позволившая по аналогии с законами постоянного тока сформулировать закон Ома для переменного тока в общем виде с введением понятие импеданса колебательного контура, правил Кирхгофа для квазистационарного тока и получить многие другие аналитические математические методы решения практических задач при эксплуатации и обслуживании электроустановок переменного тока.

Кроме аналитических методов с появлением ЭВМ для решения систем уравнений различных векторных полей - кинематических, тепловых, силовых, в том числе и электромагнитных - получили развитие численные методы вычислительной математики.

Примером реализации вычислительного метода конечных элементов для взаимосвязанных тепловых, силовых и электромагнитных полевых инженерных задач в двумерной (плоско-параллельной или осесимметричной) постановке является программный комплекс отечественной разработки ELCUT [5]. Разработчики ELCUT предусмотрели задачу анализа низкочастотного электромагнитного поля в своей программе [6].

Предпринятая нами попытка использования ELCUT для расчета уровня МП показала, что задача периодических колебаний в их постановке использует упомянутый выше традиционный метод комплексной амплитуды, а также стала очевидной необходимость в дополнительных затратах на переход от исходных трехмерных условий гигиенической оценки к заданию геометрии источника и граничных условий в двумерной постановке и обратной привязки полученных результатов к месту их применения для сравнения с нормируемым ПДУ. Простого и очевидного решения задачи расчета интенсивности МП, понятного всем с точки зрения рассмотренных выше требований ГН, использованный в ELCUT подход, к нашему сожалению, в настоящее время не предоставляет.

Существующие в принятом в ELCUT подходе ограничения, были приняты, по признанию авторов, "с целью получения простого, удобного и интуитивно ясного инструмента, не требующего специальных знаний и подготовки". Присутствующий на мировом рынке программный продукт ANSYS Maxwell [7] позволяет методом конечных элементов выполнить трехмерное моделирование ЭМП. Однако простым и доступным решением задачи расчета интенсивности МП этот программный комплекс считать нельзя.

Другим примером программной реализации различных задач обеспечения электромагнитной безопасности электросетевых объектов, требующих оценки уровней электрического и магнитного полей расчетным способом, является набор программ, описанных в книге [8]:

- **"Линия ЭМП"** - Программа определения напряженности электрических и магнитных полей воздушных линий электропередачи. Предназначена для расчета основных параметров воздушной линии электропередачи. Является прототипом программы "ЭМП ВЛ".
- **"ЭМП ВЛ"** - Электромагнитные параметры воздушных линий электропередачи.
- **"Реактор МП"** - Магнитные поля трехфазных реакторов без ферромагнитного сердечника.
- **"Реактор ЭМЭ"** - Магнитное поле реактора с электромагнитными экранами.

Использованная разработчиками методика расчета ЭМП, создаваемого различными объектами электросетевого хозяйства, основана на уже упомянутом выше методе комплексной амплитуды периодических

колебаний и на преобразовании единой исходной пространственной задачи к набору подзадач в двумерной (плоскопараллельной) постановке. Но по сравнению с вычислительными подходами, в данных программах реализованы чисто аналитические методы решения, которые традиционно применялись в инженерной практике до появления вычислительных методов решения полевых задач. То есть, помимо затрат на переход от исходных условий гигиенической оценки к двумерной постановке и обратно добавляется признаваемый специалистами факт о невозможности аналитического решения системы уравнений Максвелла для любого случая (т. е., в общем виде). Поэтому, в настоящее время данный набор программ сформулированным необходимым и достаточным требованиям ГН не соответствует.

3. Содержание подхода

Предлагаемый подход сложился в результате поиска метода вычисления формулы (3) для векторного поля, создаваемого на контролируемом месте источником МП частотой 50 Гц с заданной в качестве исходных данных геометрией проводников с током, для которых ранее уровни создаваемых ими магнитных полей явно не определялись.

На территории открытых распределительных устройств (ОРУ) и в зданиях подстанций (ПС) к таким источникам относятся провода и шины, находящиеся под напряжением, в качестве изоляции которых в основном используется атмосферный воздух. К этим же источникам относятся катушки индуктивности с воздушным сердечником или, в другой терминологии, трехфазные реакторы без ферромагнитного сердечника. Конструктивно эти источники являются обычными линейными медными или алюминиевыми проводниками различного профиля, по которым происходит распространение ЭМП промышленной частоты. Эти элементы энергетической системы просто соединяют (провода и шины) между собой другие элементы или согласуют (катушки индуктивности) рабочие параметры других элементов для обеспечения устойчивой работы системы в целом. К таким же источникам относятся и воздушные линии электропередачи с не изолированными или изолированными проводами.

Указанные линейные свойства источников позволяют сделать предположение, что векторное магнитное поле должно подчиняться закону Био-Савара-Лапласа, который в дифференциальной форме записывается так:

$$d\vec{B}_M(\vec{r}_{N,t}) = \frac{\mu_0 I_M(t)}{4\pi} \frac{d\vec{l}_M \times \vec{r}_{MN}}{|\vec{r}_{MN}|^3} \quad (8)$$

Этот закон позволяет определить магнитное поле элементарного тока М, которое он создает в месте N. Для магнитной индукции выполняется принцип суперпозиции, по которому векторное магнитное поле в месте N

является независимым объединением магнитных полей элементарных линейных участков, из которых состоит источник магнитного поля:

$$\vec{B}(\vec{r}_N, t) = \sum_{(M)} d \vec{B}_M(\vec{r}_N, t) \quad (9)$$

Полученная числовая функция предназначена для подстановки в качестве векторного магнитного поля в формулу (3). Выполнив в подкоренном выражении этой формулы численное интегрирование для периода T квадрата этой функции (скажем, методом трапеций) мы получаем требуемое значение интенсивности МП в контролируемой зоне V без использования метода комплексных амплитуд и аналитических решений подзадач в двумерной (плоскопараллельной или осесимметричной) постановке.

4. Выводы и предложения

Предлагаемый подход был применен в пробной реализации на языке программирования Си. В результате расчета значения интенсивности МП определяются на боковых поверхностях прямоугольного параллелепипеда и на плане контролируемой зоны на выбранной высоте. Пример исходной геометрии проводников (рис.1а) и значения рассчитанных уровней МП в плане (рис.1б) приводится ниже.

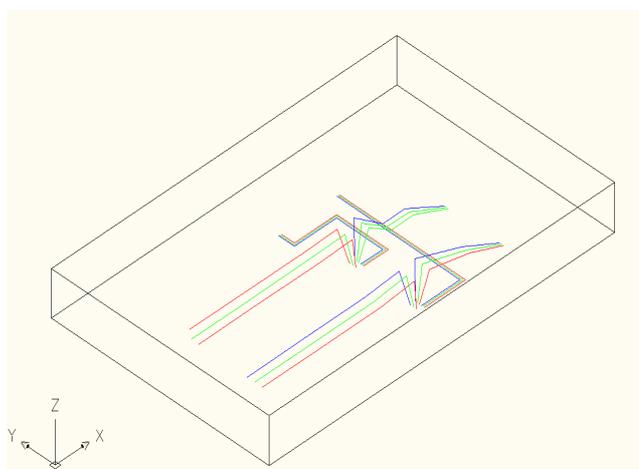


Рис.1а. Шины с током

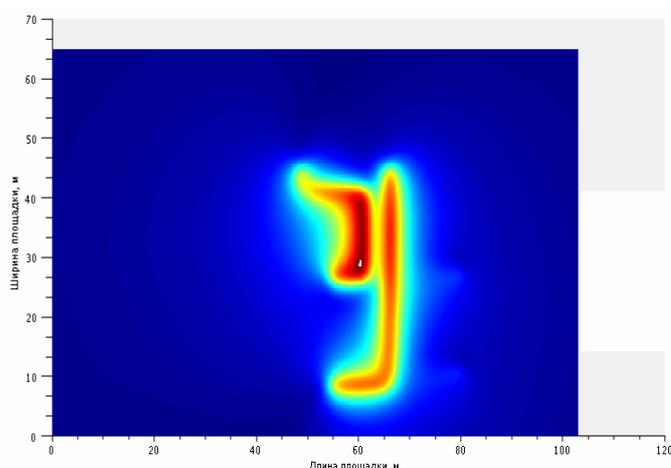


Рис.1б. Уровни МП в плане на высоте 1.8 м

В качестве исходных элементов источников МП 50 Гц при расчете можно использовать:

- **Воздушная линия напряжением выше 1000 В** - не изолированные или изолированные немагнитными материалами провода, подвешенные на опорах и/или строительных конструкциях.
- **Открытая шина напряжением выше 1000 В** - не изолированные или изолированные немагнитными материалами шины, проложенные на стойках и/или опорах .

- **Реактор с воздушным сердечником** - катушка индуктивности с воздушным сердечником, в конструкции которой не используются магнитные материалы.

Данные элементы обычно присутствуют в составе следующих электросетевых объектов:

- **Воздушная линия электропередачи**
- **Открытое распределительное устройство**
- **Подстанция (территория и сооружения)**

Предлагаемый подход позволяет получить расчетным методом значения интенсивности МП частотой 50 Гц в соответствии с требованиями ГН [1] для перечисленных объектов электросетевого хозяйства, конструкция элементов которых представима в виде элементарных линейных участков с током и в которых не используются материалы, нарушающие требование (7).

Ссылки

1. *Гигиенический норматив ГН 2.1.8/2.2.4.2262-07 "Предельно допустимые уровни магнитных полей частотой 50 Гц в помещениях жилых, общественных зданий и на селитебной территории"*
2. *Максвелл Дж. К., [Трактат об электричестве и магнетизме](#)*. - М.: Наука, 1989. - Т. 1, 2
3. *Бессонов Л.А., Теоретические основы электротехники. Электрические цепи*. М.: Высшая школа, 1996, 9 изд.
4. *Методические указания МУК 4.3.2491-09 "Гигиеническая оценка электрических и магнитных полей промышленной частоты (50 Гц) в производственных условиях"*
5. <http://www.elcut.ru>
6. *Дубицкий С.Д., [ELCUT - конечно-элементный анализ низкочастотного электромагнитного поля](#)*//EDAExpress, 2006, N12, с.24-29
7. <http://www.ansoft.com/products/em/maxwell>
8. *Мисриханов М.Ш., Рубцова Н.Б., Токарский А.Ю., Обеспечение электромагнитной безопасности электросетевых объектов*. - М.: Наука, 2010. - 870 с.

Филиал ОАО "Южный ИЦЭ" "ЮжВТИ", ул. Содружества, 35, Ростов-на-Дону, 344090,
А.И.Скрипников, рук.гр., Г.М. Борисов, нач.отд
[Скрипников Александр Иванович erpenii@aanet.ru](mailto:erpenii@aanet.ru)

Статья опубликована на портале «Вся экология ECOPORTAL»

Опубликовано: 22/12/2010, в 13 ч. 23 мин.