

К ВОПРОСУ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭКОЛОГИИ НА ОБЪЕКТЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

А. С. Сидоренко, Н. В. Силин

*ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»,
Владивосток, Россия*

Ключевые слова: высоковольтное оборудование; высокочастотные электромагнитные поля; электромагнитная обстановка, электрическая подстанция.

Аннотация: Рассмотрены вопросы электромагнитной экологии на объекте электроэнергетики, где расположено высоковольтное оборудование. Приведена информация о нормативных документах, регулирующих электромагнитную обстановку, указаны наиболее мощные источники электромагнитного поля на электрической подстанции. Разработана методика расчетного определения пространственного и амплитудного распределений электромагнитных полей. Выполнено компьютерное моделирование пространственного и частотного распределений электромагнитного поля вблизи силового автотрансформатора 500 кВ. Показано, что вопросы электромагнитной экологии на объектах электроэнергетики целесообразно решать на стадии проектирования с учетом мощности и интенсивности возможных источников.

Введение

Электромагнитная обстановка на объектах энергетики характеризуется высокими значениями напряженности электрического и магнитного полей в широком диапазоне частот как в штатных режимах, так и при протекании нестационарных процессов. Высокочастотные электромагнитные поля в окружающем пространстве создаются источниками, излучение которых не предусмотрено их функциональным назначением, а также источниками естественного происхождения. При стационарных режимах напряженности электромагнитных полей вблизи высоковольтного оборудования могут превосходить разрешенные с точки зрения экологического воздействия на биологические объекты значения. При нестационарных режимах работы, таких как переходные процессы, грозовые разряды, короткие замыкания, значения величин напряженностей могут увеличиваться в разы.

Сидоренко Андрей Сергеевич – аспирант департамента энергетических систем, e-mail: sidorenko.aseg@dvfu.ru; Силин Николай Витальевич – доктор технических наук, доцент департамента энергетических систем, ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия.

Таким образом, в один и тот же момент времени на подстанции могут существовать поля от нескольких мощных источников, что обуславливает необходимость проведения исследований по оценке влияния электромагнитных полей как на работу радиоэлектронных средств, так и на биологические объекты, в том числе на человека.

В последние десятилетия количество устройств, излучающих электромагнитные поля (ЭМП) значительно возросло. Рост уровней электрических и магнитных полей, а также мощности потоков электромагнитного излучения обусловили введение соответствующих понятий и определений. Термин «электромагнитная экология» приобрел значительную важность наравне с медико-биологической и инженерной экологией. Сформировался новый параметр загрязнения окружающей среды – электромагнитные поля техногенного происхождения [1].

Значимость вопросов обеспечения экологической безопасности нашла подтверждение в разработанных в 2000 году положениях о технической политике Россетей [2]. Согласно п. 4.4.3 деятельность энергоснабжающих предприятий должна:

- обеспечивать функционирование и постоянное улучшение системы экологического менеджмента, соответствующей требованиям ГОСТ Р ИСО 14001 [3];

- обеспечивать учет негативного воздействия на окружающую среду, совершенствование системы производственного экологического контроля и применение предупредительных мер по снижению негативного воздействия.

Вышеприведенные требования подтверждают важность и актуальность тщательного контроля и анализа электромагнитной обстановки (ЭМО) на электроэнергетических объектах. Как показывает практика, данные исследования особенно актуальны для электрических станций и подстанций, в состав которых входят трансформаторное оборудование напряжением 110 кВ и выше.

Для выполнения данных требований на действующих объектах электроэнергетики систематически проводятся измерения уровней напряженностей электрических и магнитных полей промышленной частоты. Электромагнитная обстановка на объекте электроэнергетики должна соответствовать нормам СанПиН 1.2.3685-21 [4]. Результаты замеров позволяют оценить ЭМО на объекте и соответствие ее показателей нормам. В результате формируются рекомендации по пребыванию персонала в зонах повышенных значений напряженностей полей.

Получение информации об уровнях напряженностей электромагнитных полей в различных частотных диапазонах, определение пространственного расположения мощных источников электромагнитных полей при нестационарных режимах, направлений распространения наиболее мощных потоков излучения позволяют планировать мероприятия, направленные на улучшение экологической обстановки, такие как:

- смягчение или предотвращение неблагоприятных воздействий на экологию с целью защиты окружающей среды;

- уменьшение негативных воздействий условий окружающей среды на организацию (системного оператора).

Такие мероприятия могут быть учтены при проектировании новых и модернизации существующих электроэнергетических объектов.

Цель исследования – разработка методики анализа электромагнитной обстановки на объекте энергетики с мощными, экологически опасными источниками электромагнитных излучений (ЭМИ).

Разработка методики анализа ЭМП

Разработка мер по защите от электромагнитного влияния обслуживающего персонала зависит от расположения высоковольтного оборудования на энергетическом объекте. Для решения данного вопроса необходимо определять распределения электромагнитных полей и в первую очередь определение направлений, в которых наиболее вероятно распространение мощных ЭМИ. Распределение полей зависит от многих факторов, в том числе от размеров конструктивных элементов оборудования.

Несмотря на типовой характер расположения оборудования на подстанции (ПС), решение комплексной задачи распределения полей для всей системы целесообразно индивидуализировать с рассмотрением как предсказуемых, так и непредсказуемых ситуаций.

Сотрудники энергетических компаний систематически проводят измерения напряженностей электромагнитных полей на объектах электроэнергетики, однако и эти эксперименты не позволяют достаточно точно определить местоположение источника, направления распространения наиболее мощных потоков электромагнитной энергии. Результаты обследования ЭМО должны содержать пространственную, амплитудную и частотную выборки сигналов. Решения, направленные на обеспечение экологической безопасности, опираются на нормативные документы, в частности, на СанПиН 1.2.3685-21, в котором приведена информация о допустимых уровнях электромагнитных полей в широком диапазоне частот, например, таких как напряженность электрического поля 30...300 МГц – 10 В/м; напряженность магнитного поля 0,03...3,00 МГц – 5 А/м. Наиболее мощными источниками ЭМИ в указанных диапазонах частот являются: трансформаторное оборудование, радиовещание, удары молнии с амплитудой 50...200 кА в частотном диапазоне $10^3 \dots 5 \cdot 10^6$ Гц, коммутации и короткие замыкания в распределительных устройствах с амплитудой 1...40 кА в частотном диапазоне $(1 \dots 100) \cdot 10^6$ Гц.

Определение ЭМО, содержащей информацию об уровнях ЭМП, направлениях распространения наиболее мощных потоков ЭМИ и их спектральном составе, представляется довольно сложной, но решаемой задачей. Один из способов ее решения – привлечение аппарата и методов теории антенн. В этом случае каждая единица электроэнергетического оборудования представляется излучающим элементом (антенной). Характеристики каждой антенны можно определить с достаточной степенью точности, что позволяет с помощью уже разработанных программных продуктов выполнить необходимые расчеты. В этом случае возможно представить методику по анализу пространственного и амплитудного распределения ЭМП высоковольтного оборудования, включающую следующие этапы:

- 1) выбор оборудования, работа которого сопровождается наиболее мощным ЭМИ;
- 2) построение излучающей модели выбранного оборудования;
- 3) выбор частотных диапазонов с наиболее мощным ЭМИ;
- 4) анализ пространственного распределения ЭМИ с помощью диаграмм направленности для выбранных частотных диапазонов.

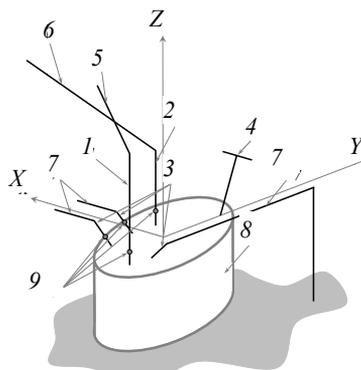
Результаты проведенного исследования

Для апробации приведенной методики выбрана электрическая ПС, на территории которой располагалось оборудование напряжением 500 кВ. Наиболее мощным источником электромагнитных излучений на ПС является силовой автотрансформатор (АТ) (рис. 1, а). Для расчета распределения ЭМП вблизи АТ использована излучающая модель (см. рис. 1, б), построенная в программном комплексе MMANA [5, 6].

Излучающими элементами в конструкции АТ являются высоковольтные вводы, которые в модели представляются в виде вертикальных вибраторов. Высоковольтные вводы на напряжение 500, 220 и 35 кВ являются основными излучающими элементами. На модели эти вводы обозначены цифрами 1, 2 и 3 соответственно (см. рис. 1, б). Кроме того, на модели представлены расширительный бак 4 и шины 5, 6, 7 соответственно на напряжения 500, 220 и 35 кВ. Все высоковольтные вводы расположены на заземленном баке 8 автотрансформатора, но так как они установлены на изоляторах, то контакта с баком не имеют. Бак представлен в виде железного цилиндра с удельной электропроводностью 107 См/м, высотой 4,1 м и диаметром 6 м. Земля представлена кольцом на нулевой высоте с внутренним радиусом 6 м и неограниченным внешним радиусом с удельной электропроводностью $2 \cdot 10^{-3}$ См/м и относительной диэлектрической проницаемостью равной 10. В модели учтены четыре источника сигналов 9: высоковольтные вводы 500 и 220 кВ и два ввода 35 кВ. Ввод номер три напряжением 35 кВ соединен с землей [7].



а)



б)

Рис.1. Автотрансформатор АОДЦТН 167000/500/220-У1:
а – фотография объекта; б – излучающая модель

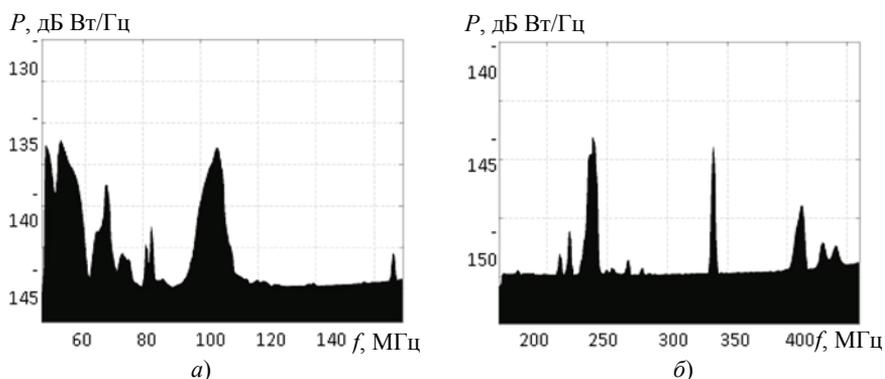


Рис. 2. Спектральные плотности мощности ЭМП АТ, измеренные с угла 210° в диапазонах частот, МГц:
a – 45...170; *б* – 160...460

Согласно методике, после выбора оборудования с наиболее мощным источником ЭМИ осуществляется выбор частотного диапазона, который проводится на основании экспериментальных данных по регистрации спектров собственного ЭМИ вблизи АТ, а также с учетом возможных ЭМИ при нестационарных режимах и разрядах молнии. На рисунке 2 приведены результаты регистрации спектров собственного ЭМИ вблизи силовых АТ 500 кВ [8] с помощью специальных направленных антенн [9]. Приведенные данные позволяют выделить частотные диапазоны с наиболее интенсивным излучением, а именно 45...120 МГц и 220...460 МГц со спектральной плотностью мощности ЭМИ до 10 дБ Вт/Гц.

Пространственное распределение ЭМИ целесообразно исследовать путем построения диаграмм направленности. На рисунке 3 в качестве примера приведены результаты расчета диаграммы направленности с помощью программного продукта MMANA для исследуемого АТ, расположение которого в горизонтальной плоскости на рисунке обозначено схематично.

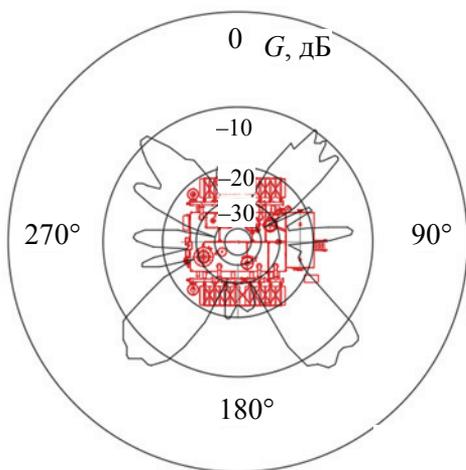


Рис. 3. Относительное распределение ЭМП автотрансформатора в горизонтальной плоскости в диапазоне частот 325...345 МГц

Расчеты приведены для одной из частот 338 МГц, на которой зарегистрировано мощное излучение (см. рис. 2). Из рисунка 3 видно, что мощные потоки ЭМИ следует ожидать по направлениям, соответствующим следующим секторам: 200°...230°, 110°...130°, 290°...320°, 30°...50°. Для оценки достоверности расчетов проведены экспериментальные исследования распределения ЭМП в секторе от 130° до 230° с шагом 10°.

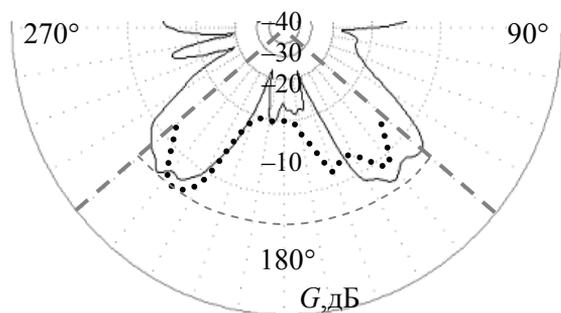


Рис. 4. Сравнение расчетной и измеренной диаграмм распределения ЭМП в горизонтальной плоскости для частоты 338 МГц
(сплошная линия – расчетная диаграмма распределения ЭМП; прерывистая линия – измеренная диаграмма распределения ЭМП)

На рисунке 4 точками обозначены экспериментально полученные данные пространственного распределения ЭМП в секторе от 130° до 210° на частоте 338 МГц. Выбор сектора для проведения экспериментальных исследований обусловлен тем, что в других секторах проводить измерения на данном объекте затруднительно ввиду расположения возле АТ защитных ограждений, вспомогательного электроэнергетического оборудования. Сравнение с расчетными данными (сплошная линия) показывает достаточно хорошее качественное совпадение диаграмм по направлениям распространения ЭМИ в данном секторе.

Заключение

Вопросы электромагнитной экологии на электроэнергетических объектах целесообразно решать на стадии проектирования объектов с учетом мощности и расположения оборудования, интенсивности возможных нестационарных процессов.

Представление каждой единицы высоковольтного оборудования в виде излучающего элемента позволяет разработать методику по определению ЭМО, позволяющей учесть амплитудное, частотное и пространственное распределения потоков электромагнитной энергии на электрической подстанции.

Экспериментальные исследования по пространственному распределению ЭМП на действующей подстанции показали достаточно хорошее совпадение с результатами компьютерного моделирования.

Список литературы

1. Сподобаев, Ю. М. Основы электромагнитной экологии / Ю. М. Сподобаев, В. П. Кубанов. – М. : Радио и связь, 2000. – 240 с.
2. Положение ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе». – Текст: электрон. – 2021. – 226 с. – URL : https://www.rosseti.ru/upload/docs/tehpolitika_29.04.2022.pdf (дата обращения: 10.09.2024.)
3. ГОСТ Р ИСО 14001–2016. Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению. – Текст: электрон. – Введ. 2016-04-29. – М. :

Стандартинформ, 2016. – 36 с. URL : <https://pro-iso.ru/assets/files/gost-iso/gost-r-iso-14001-2016.pdf> (дата обращения: 10.09.2024.)

4. СанПиН 1.2.3685–21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и(или) безвредности для человека факторов среды обитания. – Введ. 2021-01-28. – М. : Федер. Центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2021. – 469 с.

5. Гончаренко, И. В. Компьютерное моделирование антенн. Все о программе MMANA / И. В. Гончаренко. – М. : ИП РадиоСофт, Журнал «Радио», 2002. – 80 с.

6. Катанаев, В. А. Применение программы моделирования антенн MMANA для анализа электромагнитного излучения от высоковольтного оборудования / В. А. Катанаев, М. Ю. Белушкин, В. В. Клоков // Наука делает мир лучшим : регион. науч.-техн. конф. – Владивосток, 2003. – С. 98 – 101.

7. Белушкин, М. Ю. Излучающие свойства элементов конструкции трансформаторов / М. Ю. Белушкин, В. В. Клоков, Н. В. Силин // Молодежь и научно-технический прогресс : материалы регион. науч.-техн. конф. – Владивосток, 2002. Ч. 1. – С. 343–344.

8. Высоковольтный силовой трансформатор как источник собственных электромагнитных излучений / М. Ю. Белушкин, В. В. Клоков, Н. В. Силин, В. А. Катанаев // V Международ. симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии ЭМС-2003 : сб. науч. докл. (Санкт-Петербург, 16 – 19 сентября 2003 г.). – СПб., 2003. – С. 55 – 57.

9. Белушкин, М. Ю. Выбор антенны для регистрации электромагнитного излучения от высоковольтного оборудования / М. Ю. Белушкин, В. В. Клоков, Н. В. Силин // Энергетика: управление, качество и эффективность исследование энергоресурсов : сб. тр. третьей Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Благовещенск, 2003. – Т. 1. – С. 452 – 454.

References

1. Spodobayev Yu.M., Kubanov V.P. *Osnovy elektromagnitnoy ekologii* [Fundamentals of Electromagnetic Ecology], Moscow: Radio i svyaz', 2000, 240 p. (In Russ.)

2. Available at: https://www.rosseti.ru/upload/docs/tehpolitika_29.04.2022.pdf (accessed 10 September 2024.)

3. GOST R ISO 14001-2016. *Sistemy ekologicheskogo menedzhmenta. Trebovaniya i rukovodstvo po primeneniyu* [Environmental management systems. Requirements and guidance for use], Moscow: Standartinform, 2016, 36 p., available at: <https://pro-iso.ru/assets/files/gost-iso/gost-r-iso-14001-2016.pdf> (accessed 10 September 2024.)

4. SanPiN 1.2.3685-21. *Gigiyenicheskiye normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i(ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya* [Hygienic standards and requirements for ensuring safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans], Moscow: Feder. Tsentr Gossanepidnadzora Minzdrava Rossii, 2021, 469 p. (In Russ.)

5. Goncharenko I.V. *Komp'yuternoye modelirovaniye antenn. Vse o programme MMANA* [Computer modeling of antennas. All about the MMANA program], Moscow: IP RadioSoft, Zhurnal "Radio", 2002, 80 p. (In Russ.)

6. Katanayev V.A., Belushkin M.Yu., Klokov V.V. *Nauka delayet mir luchshim: region. nauch.-tekhn. konf.* [Science makes the world a better place: regional scientific and technical conf.], Vladivostok, 2003, pp. 98-101. (In Russ.)

7. Belushkin M.Yu., Klokov V.V., Silin N.V. *Molodezh' i nauchno-tekhnicheskij progress: materialy region. nauch.-tekhn. konf.* [Youth and scientific and technical progress: materials of the regional scientific and technical conf.], Vladivostok, 2002, part 1, pp. 343-344. (In Russ.)

8. Belushkin M.Yu., Klokov V.V., Silin N.V., Katanayev V.A. *V Mezhdunar. simpozium po elektromagnitnoy sovmestimosti i elektromagnitnoy ekologii EMS-2003: sb. nauch. dokl.* [V International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology EMC-2003: collection of scientific reports], St. Petersburg, 16-19 Sept. 2003, St. Petersburg, 2003, pp. 55-57. (In Russ.)

9. Belushkin M.Yu., Klokov V.V., Silin N.V. *Energetika: upravleniye, kachestvo i effektivnost' issledovaniye energoresursov: sb. tr. tret'yey Vseros. nauch.-tekh. konf. s mezhdunar. uchastiyem* [Power engineering: management, quality and efficiency of energy resources research: collection of papers of the third All-Russian scientific and technical conf. with international participation], Blagoveshchensk, 2003, vol. 1, pp. 452-454. (In Russ.)

The Analysis of Electromagnetic Ecology at an Electric Power Facility

A. S. Sidorenko, N. V. Silin

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

Keywords: high-voltage equipment; high-frequency electromagnetic fields; electromagnetic environment; electrical substation.

Abstract: The article discusses the issues of electromagnetic ecology at an electric power facility where high-voltage equipment is located. Information is provided on regulatory documents regulating the electromagnetic environment; the most powerful sources of the electromagnetic field at an electric substation are indicated. A method for calculating the spatial and amplitude distribution of electromagnetic fields has been developed. To test the calculation, computer simulation of the spatial and frequency distribution of the electromagnetic field near a 500 kV power autotransformer was performed. It is shown that it is advisable to solve the issues of electromagnetic ecology at electric power facilities at the design stage, taking into account the power and intensity of possible sources.

© А. С. Сидоренко, Н. В. Силин, 2024