

Е.И. Сокол, М.М. Резинкина, О.Г. Гриб, В.И. Васильченко, А.А. Зуев, А.В. Бортников, Е.В. Сосина

МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОНИТОРИНГА ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УКРАИНЫ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЕЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Стаття присвячена опису алгоритму комплексного автоматизованого моніторингу об'єктів енергетичної системи України, спрямованого на забезпечення безпеки функціонування її встаткування та персоналу. Даний моніторинг буде використовувати безпілотні повітряні апарати (БППА) для планової і позапланової реєстрації стану ліній електропередачі (ЛЕП) та високовольтних підстанцій (ВП). Передбачається, що позапланові обльоти будуть здійснюватися при аварійних ситуаціях на ЛЕП. За допомогою БППА будуть записуватися з повітря картини ЛЕП і ВП в оптичному і інфрачервоному діапазонах, а також виміряться напруженості їх електричного (ЕП) і магнітного (МП) полів уздовж траси прольоту. Використання спеціально розробленого програмного забезпечення дозволить зрівняти картини, що реєструються БППА з попередньо створеними еталонними картинками, які відповідають штатним режимам роботи контрольованих ЛЕП і ВП. Такі еталонні картини в сукупності з експериментально отриманими картами захисних заземлень ВП будуть зведені в єдиний документ – паспорт ВП і ЛЕП. Даний паспорт повинен містити також обмірювані і розраховані значення рівнів напруженостей ЕП і МП у місцях перебування персоналу енергетичних об'єктів і розташування встаткування, найбільш уразливого до впливу електромагнітних завод. При необхідності в рамках виконання проведеного моніторингу будуть дані рекомендації з конструкції та розташування електромагнітних екранів, які знижують рівні електромагнітних впливів, і по розташуванню блискавоквідводів, що зменшують імовірність поразки блискавкою досліджуваних об'єктів. У роботі приводяться аналітичні вирази, які лягли в основу розробленого програмного забезпечення для розрахунку напруженості ЕП в околиці ЛЕП. Дане програмне забезпечення буде використано в якості базового при навігації БППА уздовж ЛЕП, а також для розпізнавання порушень у роботі ЛЕП. Наведене також порівняння розподілів напруженості ЕП, розрахованих за допомогою даного програмного забезпечення, з даними, відомими з літератури. Відмінність пропонованої методики моніторингу від існуючих полягає в тому, що комплексний контроль ряду параметрів, що характеризують зовнішній стан об'єктів енергосистеми, а також її основні електричні параметри будуть повністю автоматизовані. Це стане можливим у результаті використання спеціально розробленого програмного забезпечення по розпізнаванню оптичних і інфрачервоних зображень, а також картин ліній рівної напруженості ЕП і МП. Бібл. 12, рис. 4.

Ключові слова: лінії електропередачі, електричне та магнітне поле, автоматизований моніторинг, безпілотні повітряні апарати.

Статья посвящена описанию алгоритма комплексного автоматизированного мониторинга объектов энергетической системы Украины, направленного на обеспечение безопасности функционирования ее оборудования и персонала. Данный мониторинг предполагает использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для плановой и внеплановой регистрации состояния линий электропередачи (ЛЭП) и высоковольтных подстанций (ВП). Предполагается, что внеплановые облеты будут производиться при аварийных ситуациях на ЛЭП. С помощью БПЛА будут записываться с воздуха картины ЛЭП и ВП в оптическом и инфракрасном диапазонах, а также измеряться напряженности их электрического (ЭП) и магнитного (МП) полей вдоль трассы пролета. Использование специально разработанного программного обеспечения позволит сравнить регистрируемые БПЛА картины с предварительно созданными эталонными картинками, соответствующих штатным режимам работы контролируемых ЛЭП и ВП. Такие эталонные картины в совокупности с экспериментально полученными картами защитных заземлений ВП будут сведены в единый документ – паспорт ВП и ЛЭП. Данный паспорт должен содержать также измеренные и рассчитанные значения уровней напряженностей ЭП и МП в местах пребывания персонала энергетических объектов и расположения оборудования, наиболее уязвимо к воздействию электромагнитных помех. При необходимости в рамках выполнения проводимого мониторинга будут даны рекомендации по конструкции и расположению электромагнитных экранов, снижающих уровни электромагнитных воздействий, и молниеотводов, уменьшающих вероятность поражения молнией исследуемых объектов. В работе приводятся аналитические выражения, которые легли в основу разработанного программного обеспечения для расчета напряженности ЭП в окрестности ЛЭП. Данное программное обеспечение будет использовано в качестве базового при навигации БПЛА вдоль ЛЭП, а также для распознавания нарушений в работе ЛЭП. Приведено также сравнение зависимостей напряженности ЭП, рассчитанных с помощью данного программного обеспечения, с данными, известными из литературы. Отличие предлагаемой методики мониторинга от существующих состоит в том, что комплексный контроль ряда параметров, характеризующих внешнее состояние объектов энергосистемы, а также ее основных электрических параметров будут полностью автоматизированы. Это станет возможным в результате использования специально разработанного программного обеспечения по распознаванию оптических и инфракрасных изображений, а также картин линий равной напряженности ЭП и МП. Библ. 12, рис. 4.

Ключевые слова: линии электропередачи, электрическое и магнитное поле, автоматизированный мониторинг, беспилотные летательные аппараты.

Введение. В настоящее время проблема обеспечения энергетической безопасности Украины весьма актуальна. При этом особое значение приобретает мониторинг состояния систем передачи электроэнер-

гии от производителя к потребителю. Такой мониторинг должен быть направлен на предотвращение аварийных отключений линий электропередачи (ЛЭП), а также скорейшего восстановления их работоспособ-

ности, если такое отключение произошло. К наиболее перспективным современным методам диагностики состояния ЛЭП относится мониторинг с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Такой мониторинг получил развитие в Российской Федерации (РФ) [1], а также в Европе [2], Китае [3], Бразилии [4] и других странах. При этом осуществляется контроль состояния ЛЭП путем ее оптической регистрации, регистрации с помощью тепловизоров, а также регистрации частичных разрядов, имеющих место в изоляции.

Как показывает анализ причин отказов ЛЭП в РФ, энергосистема которой весьма похожа на энергосистему Украины, они в основном происходят на ЛЭП 110 кВ – 86 %, 11 % – на ЛЭП 220 кВ и 3 % ЛЭП 330-750 кВ (см. [1]). Такое распределение числа отказов пропорционально длине соответствующих ЛЭП. Наибольшее число аварийных отключений ЛЭП в РФ вызвано повреждением проводов и грозозащитных тросов – 56 %. Другими причинами, вызывающими отключения ЛЭП, являются такие повреждения как пробой изоляторов – 19 %, повреждения опор – 15 % и других элементов ЛЭП – 10 %. Согласно имеющейся статистике, резкое возрастание аварийных отключений ЛЭП происходит в весенне-летний период из-за перекрытий изоляционных промежутков зелеными насаждениями. Велико также число аварийных отключений ЛЭП из-за вандализма, такого как разрушение гирлянд изоляторов, похищение проводов и элементов опор ЛЭП, набросы на провода ЛЭП и др. [1].

Постановка задачи. Исходя из вышеизложенного, оперативный контроль состояния ЛЭП, а также высоковольтных подстанций, являющихся неотъемлемой частью системы энергоснабжения, и устранение причин аварийных отключений оказывается весьма эффективным.

Целью данной работы является разработка алгоритма комплексного автоматизированного мониторинга объектов энергетической системы Украины, направленная на обеспечение ее безопасного функционирования

Материалы исследований. Алгоритм выполнения мониторинга объектов энергетической системы Украины. Известны запатентованные технические решения, целью которых является обеспечение управления движением БПЛА с помощью измерения напряженности электрического (ЭП) или магнитного поля (МП) [5, 6]. Данные решения могут быть использованы для разработки методики мониторинга безопасности объектов энергетической системы Украины. Такая методика предусматривает создание паспортов – эталонов, описывающих функционирование ЛЭП и высоковольтных подстанций в штатном режиме. Данные паспорта – эталоны должны включать оптические изображения исследуемых объектов и их изображения в инфракрасном диапазоне, полученные с помощью тепловизоров. В состав таких паспортов должны входить также карты уровней напряженности электрического и магнитного полей, полученных с помощью расчетов и измерений на определенных расстояниях над линиями ЛЭП, а также на определенных

расстояниях над высоковольтными подстанциями. Предполагается, что БПЛА будут с заданной периодичностью производить аэрофотосъемку исследуемых объектов в оптическом и инфракрасном диапазонах, а также измерять напряженности их ЭП и МП. Предполагается, что внеплановые облеты будут производиться при аварийных ситуациях на ЛЭП для определения места и характера повреждений. Сравнение с помощью разработанного программного обеспечения данных, регистрируемых при облетах БПЛА, с данными паспорта – эталона исследуемого объекта позволит принимать оперативные решения по его текущему состоянию: устранять возникшие нарушения, наличие которых может привести к аварийным отказам, или находить места аварий, если их не удалось избежать.

Использование автоматизированной системы для сравнения наиболее значимых параметров, описывающих штатное функционирование исследуемых объектов (ЛЭП и высоковольтных подстанций), позволит также предотвратить несанкционированный отбор мощности из энергосистемы. Анализ таких параметров может быть использован для оптимизации как режимов работы, так и структуры самих исследуемых энергетических объектов.

Такие паспорта должны также включать карты расположения систем защитного заземления высоковольтных подстанций, имеющих ключевое значение для обеспечения безопасности функционирования персонала и оборудования. Причем, такие карты должны быть получены в результате измерений напряженности МП при протекании тока по защитному заземлению. Для этого получения достоверной информации о текущем состоянии системы защитного заземления (СЗЗ) предполагается подсоединять к ней генератор токов и измерять напряженность МП над поверхностью земли. Полученная таким образом карта будет отражать истинное расположение элементов системы защитного заземления. Это даст возможность оценить степень надежности защиты исследуемого объекта системой защитного заземления в различных аварийных режимах короткого замыкания и, при необходимости, разработать рекомендации по восстановлению вышедших из строя участков СЗЗ, а также ее доукомплектованию и модернизации. Полученные таким образом данные о расположении элементов системы защитного заземления вводятся как исходные в разработанное программное обеспечение, позволяющее построить распределения линий равного потенциала и напряженности ЭП на поверхности земли, определить уровни шаговых напряжений и напряжений прикосновения, а также полное сопротивление системы заземления. По данным картин делаются выводы о надежности существующей системы защитного заземления. При необходимости в рамках выполнения проводимого мониторинга будут даны рекомендации по конструкции и расположению электромагнитных экранов, использование которых позволяет снизить уровни электромагнитных воздействий [7].

Еще одной важной системой, обеспечивающей безопасную работу энергетических объектов, является

их система молниезащиты. С помощью разработанного программного обеспечения по методике [8] будут построены картины распределения вероятности попадания молний на территории высоковольтных подстанций и, при необходимости, даны рекомендации по доукомплектованию и модернизации существующей системы молниезащиты.

С помощью карт распределений напряженностей ЭП и МП при работе ЛЭП и высоковольтных подстанций, полученных в результате измерений и проведенных расчетов напряженностей ЭП и МП, а также достоверных карт системы защитного заземления и молниезащиты должны быть составлены планы безопасного перемещения технического персонала высоковольтных подстанций, а также расположения оборудования, особо чувствительного к возможным электромагнитным воздействиям, на их территории.

Для разработки системы мониторинга безопасности объектов энергетической системы необходимы методики расчета напряженности ЭП и МП. Причем, при отсутствии персонала в зоне действия ЭП могут быть применены аналитические методы.

Основным параметром, характеризующим электромагнитное поле ЛЭП, который не зависит от вида нагрузки ЛЭП, является напряженность ЭП. Остановимся подробнее на принципах, которые легли в основу программного обеспечения, разработанного для реализации предлагаемой методики комплексного мониторинга объектов энергетической системы.

Аналитические методы расчета ЭП ЛЭП.

Для использования аналитических методов при расчете напряженности электрического поля ЛЭП должны быть приняты следующие допущения:

- провода ЛЭП полагаются параллельными бесконечно длинными цилиндрами, заряд которых равномерно распределен вдоль их осей;
- напряжение на проводах ЛЭП изменяется по синусоидальному закону с частотой 50 Гц;
- сдвиг фаз во времени между напряжениями проводов ЛЭП равняется 120° ;
- поверхность земли считается плоской, а самая земля по отношению к воздуху абсолютно электропроводной и имеющей нулевой потенциал;
- наличие опор, сооружений, технических и биологических объектов в зоне ЛЭП не учитывается;
- наличие дополнительных тросов (грозозащитных, компенсационных, и т.п.) не учитывается;
- считается, что провода ЛЭП находятся в воздухе с относительной диэлектрической проницаемостью, равной $\epsilon_e = 1$;
- действующие значения напряженности электрического поля определяются у плоскости, которая перпендикулярна направлению проводов ЛЭП, в области наибольшего приближения проводов к земле.

При принятых предположениях значения потенциалов, удельных зарядов и напряженности ЭП могут быть записанные в символической форме для комплексных значений, а электрическое поле представлено как сумма электрических полей проводов ЛЭП и их зеркальных отображений относительно поверхности земли [9, с. 84, 93].

На рис. 1 показанные типовые случаи расположения проводов ЛЭП.

Если провода ЛЭП расщеплены, эквивалентный радиус провода рассчитывается по формуле [9, с. 42]:

$$r = \left(M \cdot r_{ph} \cdot a^{M-1} \right)^{\frac{1}{M}},$$

где M – количество расщепленных проводов фаз ЛЭП; r_{ph} – радиус сечения проводов фаз ЛЭП [м]; a – радиус окружности, по которой располагаются провода расщепленных фаз ЛЭП [м].

В общем случае произвольного расположения проводов ЛЭП, значение емкости на единицу длины рассчитывается по формуле [10, с. 96]:

$$C_S = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\ln \left[\frac{2 \sqrt[3]{h_1 \cdot h_2 \cdot h_3} \cdot \sqrt[3]{r_{12} \cdot r_{23} \cdot r_{31}}}{r \sqrt[3]{r_{12}' \cdot r_{23}' \cdot r_{31}'}} \right]},$$

где h_1, h_2, h_3 – расстояния от поверхности земли до каждого из проводов ЛЭП; r_{12}, r_{23}, r_{31} – расстояния между проводами ЛЭП; $r_{12}', r_{23}', r_{31}'$ – расстояния между проводами ЛЭП и их зеркальными отображениями.

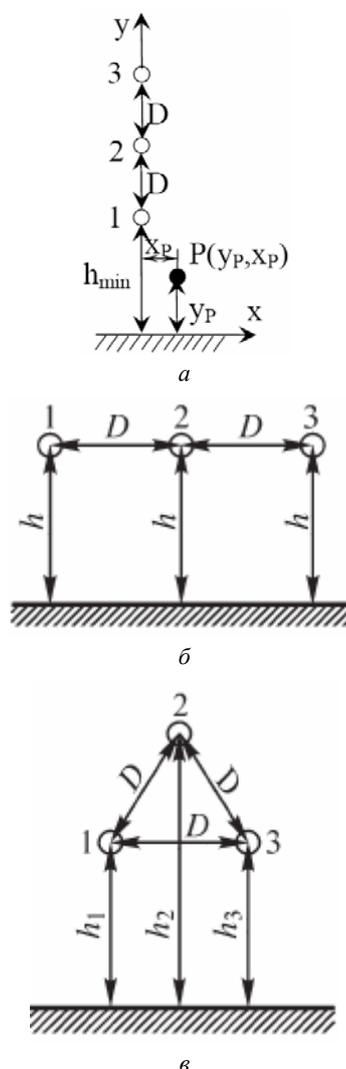


Рис. 1. Типовые случаи расположения проводов ЛЭП

В случае вертикального расположения проводов ЛЭП, как показано на рис. 1,а, емкость ЛЭП на единицу длины рассчитывается по формуле:

$$C_S = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\ln \left[\frac{2D\sqrt[3]{2}}{r} \cdot \sqrt[3]{\frac{h_{\min} \cdot (h_{\min} + D) \cdot (h_{\min} + 2D)}{(2h_{\min} + D) \cdot (2h_{\min} + 2D) \cdot (2h_{\min} + 3D)}} \right]}$$

где D – расстояние между проводами ЛЭП [м]; h_{\min} – минимальное расстояние проводов ЛЭП до земли ($h_{\min} = \min\{h_1, h_2, h_3\}$) [м]; ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость среды (воздух), в котором находятся провода ЛЭП; $\epsilon_0 = 0.885 \cdot 10^{-9}$ Ф/м – электрическая постоянная.

В случае горизонтального расположения проводов ЛЭП, как показано на рис. 1,б, емкость ЛЭП на единицу длины рассчитывается по формуле [10, с. 96]:

$$C_S = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\ln \left[\frac{2h_{\min} \cdot D}{r \cdot \sqrt[3]{(4h_{\min}^2 + D^2) \cdot \sqrt{h_{\min}^2 + D^2}}} \right]}$$

В случае расположения проводов ЛЭП в вершинах равностороннего треугольника, как показано на рис. 1,в, емкость ЛЭП на единицу длины рассчитывается по формуле:

$$C_S = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\ln \left[\frac{2D}{r} \cdot \sqrt[3]{\frac{h_{\min}^2 \cdot (h_{\min} + D\sqrt{3}/2)}{\sqrt{(4h_{\min}^2 + D^2) \cdot [(2h_{\min} + D\sqrt{3}/2)^2 + D^2/4]}}} \right]}$$

Комплексные величины азимутальной и аксиальной компонент напряженности ЭП ЛЭП в точке $P(x_p, y_p)$ (рис. 1,а) рассчитываются по формулам [9, с. 68]:

$$\dot{E}_x(x_p, y_p) = \frac{U_{ph} \cdot C_S}{2\pi\epsilon_r\epsilon_0} \times$$

$$\left[- \left[\frac{x_1 - x_p}{(x_1 - x_p)^2 + (h_1 + y_p)^2} - \frac{x_1 - x_p}{(x_1 - x_p)^2 + (h_1 - y_p)^2} \right] + \right. \\ \times \left[\frac{1 + j\sqrt{3}}{2} \cdot \left[\frac{x_2 - x_p}{(x_2 - x_p)^2 + (h_2 + y_p)^2} - \frac{x_2 - x_p}{(x_2 - x_p)^2 + (h_2 - y_p)^2} \right] + \right. \\ \left. \left. + \frac{1 - j\sqrt{3}}{2} \cdot \left[\frac{x_3 - x_p}{(x_3 - x_p)^2 + (h_3 + y_p)^2} - \frac{x_3 - x_p}{(x_3 - x_p)^2 + (h_3 - y_p)^2} \right] \right]$$

$$\dot{E}_y(x_p, y_p) = \frac{U_{ph} \cdot C_S}{2\pi\epsilon_r\epsilon_0} \times$$

$$\left[- \left[\frac{h_1 + y_p}{(x_1 - x_p)^2 + (h_1 + y_p)^2} + \frac{h_1 - y_p}{(x_1 - x_p)^2 + (h_1 - y_p)^2} \right] + \right. \\ \times \left[\frac{1 + j\sqrt{3}}{2} \cdot \left[\frac{h_2 + y_p}{(x_2 - x_p)^2 + (h_2 + y_p)^2} + \frac{h_2 - y_p}{(x_2 - x_p)^2 + (h_2 - y_p)^2} \right] + \right. \\ \left. \left. + \frac{1 - j\sqrt{3}}{2} \cdot \left[\frac{h_3 + y_p}{(x_3 - x_p)^2 + (h_3 + y_p)^2} + \frac{h_3 - y_p}{(x_3 - x_p)^2 + (h_3 - y_p)^2} \right] \right]$$

Действующее значение напряженности электрического поля в точке $P(x_p, y_p)$ рассчитывается по формуле:

$$E(x_p, y_p) = \sqrt{|\dot{E}_x(x_p, y_p)|^2 + |\dot{E}_y(x_p, y_p)|^2},$$

где $|\dot{E}_x(x_p, y_p)|$, $|\dot{E}_y(x_p, y_p)|$ – модули комплексных величин азимутальной и аксиальной компонент напряженности ЭП ЛЭП в точке $P(x_p, y_p)$.

На основе данных формул было разработано программное обеспечение, позволяющее рассчитать напряженности ЭП в окрестности ЛЭП. Сравнение распределений действующих значений напряженности ЭП

ЛЭП, рассчитанных с помощью данного программного обеспечения, с данными [11], приведены на рис. 2,а, 3,а и 2,б, 3,б соответственно. На рис. 4,а и 4,б показано такое же сравнение с данными [12].

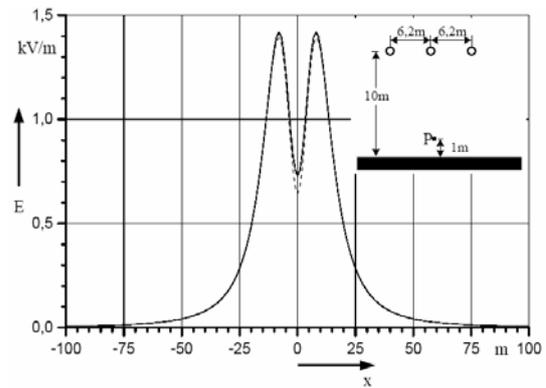
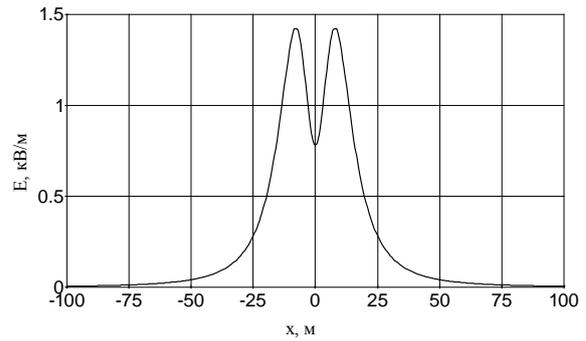


Рис. 2. Рассчитанные зависимости напряженности ЭП в сечении, перпендикулярном проводам ЛЭП 150 кВ на расстоянии 1 м от поверхности земли

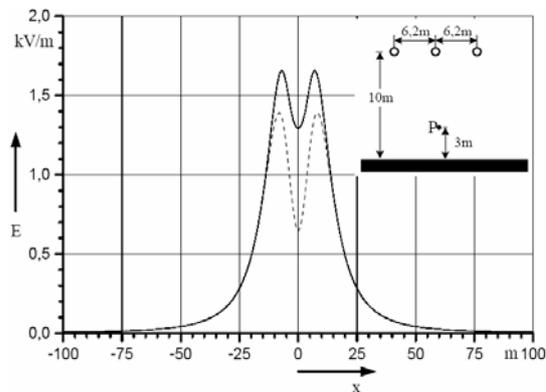
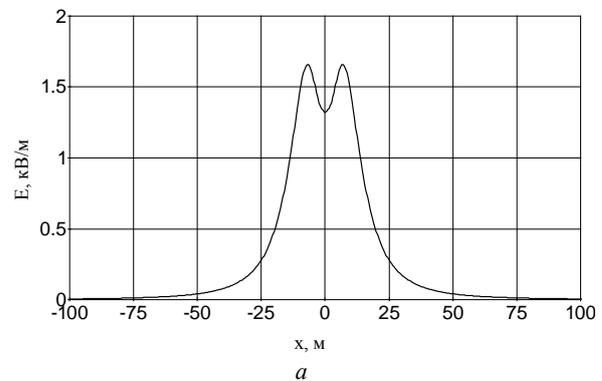


Рис. 3. Рассчитанные зависимости напряженности ЭП в сечении, перпендикулярном проводам ЛЭП на расстоянии 3 м от поверхности земли

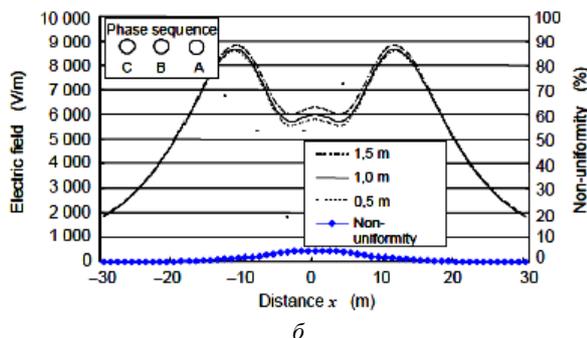
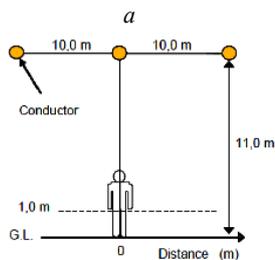
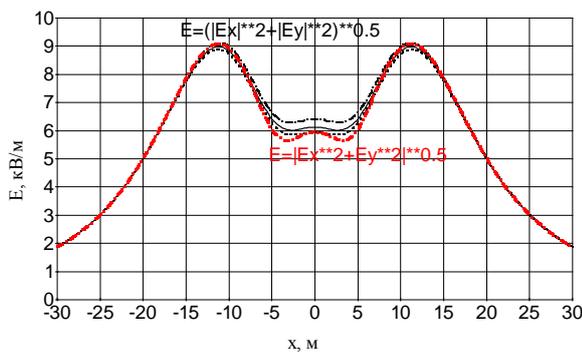


Рис. 4. Рассчитанные зависимости напряженности ЭП в сечении, перпендикулярном проводам ЛЭП 500 кВ на расстояниях 0.5 м, 1 м, 1.5 м от поверхности земли

Выводы.

1. Предложена методика комплексного автоматизированного мониторинга ЛЭП и высоковольтных подстанций, представляющих собой ключевые элементы системы энергоснабжения Украины.
2. Разработано и протестировано программное обеспечение, предназначенное для расчета ЭП в окрестности ЛЭП. Данное программное обеспечение необходимо для навигации БПЛА – основного элемента описанной системы мониторинга, а также для оценки электрических параметров исследуемых энергетических объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арбузов Р.С., Овсянников А.Г. Современные методы диагностики воздушных линий электропередачи. Новосибирск: Наука, 2009. – 136 с.
2. Skarbek L., Zak A., Ambroziak D. Damage detection strategies in structural health monitoring of overhead power transmission system // 7th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM), July 8-11, 2014. La Cité, Nantes, France. pp. 663-670.
3. Li L. The UAV intelligent inspection of transmission lines // Proceedings of the 2015 International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics, 2015. pp. 1542-1545. doi: 10.2991/ameii-15.2015.285.
4. Geraldo J. Adabo. Unmanned aircraft system for high voltage power transmission lines of Brazilian electrical system //

- AUVSI Unmanned Systems. – vol.1. – pp. 1556-1563. 12-15 August 2013, Washington, DC, USA. ISBN 78-1-62993-324-5.
5. Патент РФ № 2421746, МПК G01R31/08. Способ диагностики высоковольтной линии электропередачи / Качесов В.Е., Лебедев Д.Е. – БИ № 17, 2011.
6. Патент РФ № 2483314, МПК G01R31/08. Способ аэродиagnостики высоковольтной линии электропередачи / Качесов В.Е., Лебедев Д.Е. – БИ № 15, 2013.
7. Щерба А.А., Резинкина М.М. Моделирование и анализ электрических полей энергетических объектов. – К.: Наукова думка, 2008. – 248 с.
8. Резинкина М.М. Методика расчета прогнозируемого числа поражений молнией протяженных объектов // Журнал технической физики. – 2008. – Т.78. – №5. – С. 1-7.
9. Бессонов В.А. Электромагнитная совместимость: Учебное пособие. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2000. – 80 с.
10. Демирчян К.С., Нейман Л. Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. Т.3. – М.: Изд-во «Питер», 2006. – 377 с.
11. Tzinevrakis A.E., Tsanakas D.K., Mimos E.I. Analytical Calculation of the Electric Field Produced by Single-Circuit Power Lines // IEEE Transactions on Power Delivery. – vol.23. – no.3. – pp. 1495-1505. doi: 10.1109/tpwrd.2008.916748.
12. Anamarija Juhas, Miodrag Milutinov, Neda Pekarić-Nad. Primena Monte Karlo metode za procenu merne nesigurnosti proračuna električnog i magnetskog polja nadzemnih i podzemnih vodova. [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://deet.ftn.uns.ac.rs/files/tehres/TR_2012_Juhas_Milutinov_Pekaric.pdf.

REFERENCES

1. Arбузов R.S., Ovsyannikov A.G. *Sovremennye metody diagnostiki vozdukhnykh linii elektroperedachi* [Modern methods of diagnostics of overhead power lines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2009. 136 p. (Rus).
2. Skarbek L., Zak A., Ambroziak D. Damage detection strategies in structural health monitoring of overhead power transmission system. 7th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM), July 8-11, 2014. La Cité, Nantes, France. pp. 663-670.
3. Li L. The UAV intelligent inspection of transmission lines. Proceedings of the 2015 International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics, 2015. pp. 1542-1545. doi: 10.2991/ameii-15.2015.285.
4. Geraldo J. Adabo. Unmanned aircraft system for high voltage power transmission lines of Brazilian electrical system. AUVSI Unmanned Systems, vol.1, pp. 1556-1563, 12-15 August 2013, Washington, DC, USA. ISBN 78-1-62993-324-5.
5. Kachesov V.E., Lebedev D.E. *Sposob diagnostiki vyisokovoltnoy linii elektroperedachi* [A method for diagnosing a high-voltage power lines]. Patent Russian Federation, no. 2421746, 2011. (Rus).
6. Kachesov V.E., Lebedev D.E. *Sposob aerodiagnostiki vyisokovoltnoy linii elektroperedachi* [Air diagnostic method of high voltage transmission lines]. Patent Russian Federation, no. 2483314, 2013. (Rus).
7. Shcherba A.A., Rezinkina M.M. *Modelirovanie i analiz elektricheskikh poley energeticheskikh ob'ektov* [Modeling and analysis of electric field energy facilities]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 2008. 248 p. (Rus).
8. Rezinkina M.M. Technique for predicting the number of lightning strokes to extended objects. *Technical physics*, 2008, vol.53, no.5, pp. 533-539. doi: 10.1134/s1063784208050010.
9. Bessonov V.A. *Elektromagnitnaya sovmetimost* [Electromagnetic compatibility]. Khabarovsk, DVGUPS Publishing house, 2000. 80 p. (Rus).
10. Demirchian K.S., Neiman L.R., Korovkin N.V., Chечурин V.L. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Tom 3* [Theoretical foundations of electrical engineering. Vol. 3]. Moscoe, Piter Publ., 2006. 377 p. (Rus).

11. Tzinevrakis A.E., Tsanakas D.K., Mimos E.I. Analytical Calculation of the Electric Field Produced by Single-Circuit Power Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.23, no.3, pp. 1495-1505. doi: 10.1109/tpwr.2008.916748.

12. Anamarija Juhas, Miodrag Milutinov, Neda Pekarić-Nadž. Primena Monte Karlo metode za procenu merne nesigurnosti proračuna električnog i magnetskog polja nadzemnih i podzemnih vodova. Available at: http://deet.ftn.uns.ac.rs/files/tehres/TR_2012_Juhas_Milutinov_Pekaric.pdf (Accessed 12 September 2013). (Srb).

Поступила (received) 16.10.2015

Сокол Евгений Иванович¹, д.т.н., проф., член-корр. НАНУ,
Резинкина Марина Михайловна², д.т.н., в.н.с.,
Гриб Олег Герасимович¹, д.т.н., проф.,
Васильченко Владимир Иванович³, начальник управления
технических средств управления,

Зуев Андрей Александрович¹, к.т.н., доц.,
Бортников Александр Викторович¹, инженер,
Сосина Елена Владимировна¹, аспирант,

¹ Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,
e-mail: elenasosina09@gmail.com

² Государственное учреждение «Институт технических
проблем магнетизма Национальной академии наук Украины»,
61106, Харьков, ул. Индустриальная, 19,
e-mail: marinar2@mail.ru

³ ГП «НЭК «Укрэнерго»,
01032, Киев, ул. С. Петлюры, 25,
тел/phone +38 044 2383015, e-mail: kanc@nec.energy.gov.ua

E.I. Sokol¹, M.M. Rezinkina², O.G. Gryb¹, V.I. Vasilchenko³,
A.A. Zuev¹, A.V. Bortnikov¹, E.V. Sosina¹

¹ National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

² State Institution «Institute of Technical Problems
of Magnetism of the NAS of Ukraine»,
19, Industrialna Str., Kharkiv, 61106, Ukraine.

³ NPC «Ukrenergo»,
25, Symona Petliury Str, Kyiv, 01032, Ukraine.

A method of complex automated monitoring of Ukrainian power energy system objects to increase its operation safety.

The paper describes an algorithm of the complex automated monitoring of Ukraine's power energy system, aimed at ensuring safety of its personnel and equipment. This monitoring involves usage of unmanned aerial vehicles (UAVs) for planned and unplanned registration status of power transmission lines (PTL) and high-voltage substations (HVS). It is assumed that unscheduled overflights will be made in emergency situations on power lines. With the help of the UAV, pictures of transmission and HVS will be recorded from the air in the optical and infrared ranges, as well as strength of electric (EF) and magnetic (MF) fields will be measured along the route of flight. Usage specially developed software allows to compare the recorded pictures with pre-UAV etalon patterns corresponding to normal operation of investigated transmission lines and the HVSs. Such reference pattern together with the experimentally obtained maps of HVS's protective grounding will be summarized in a single document – a passport of HVS and PTL. This passport must also contain the measured and calculated values of strength levels of EF and MF in the places where staff of power facilities stay as well as layout of equipment, the most vulnerable to the effects of electromagnetic interference. If necessary, as part of ongoing monitoring, recommendations will be given on the design and location of electromagnetic screens, reducing the levels of electromagnetic interference as well as on location of lightning rods, reducing probability lightning attachment to the objects. The paper presents analytic expressions, which formed the basis of the developed software for calculation of the EF strength in the vicinity of power lines. This software will be used as a base at UAV navigation along the transmission lines, as well as to detect violations in the transmission lines operation. Comparison of distributions of EF strength calculated with the help of the elaborated software with the known literature data has been presented also. The difference between the proposed method of monitoring and the existing methods is full automation of the complex control of a number of parameters characterizing the state of the external power grid facilities, as well as its basic electrical parameters. This will be possible due to usage of specially developed software for recognition of optical and infrared images, as well as pictures of lines of equal EF and MF strength. References 12, figures 4.

Key words: power line, electric and magnetic fields, automated monitoring, unmanned aerial vehicles.