

УДК 681.518

DOI: 10.46548/21vek-2020-0950-0030

УДАЛЕННЫЕ МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

© 2020

Шамраев Анатолий Анатольевич, кандидат технических наук,
доцент кафедры информационных и робототехнических систем

Левченко Валентина Андреевна, аспирант кафедры информационных и робототехнических систем
Белгородский государственный национально-исследовательский университет
(308015, г. Белгород, ул. Победы, 85, e-mails: shamraev@bsu.edu.ru, 1078244@bsu.edu.ru)

Аннотация. Разработка эффективных методов выявления и прогнозирования повреждений воздушных линий электропередач является актуальной, поскольку ее успешное решение и последующее развитие вносят важный вклад в обеспечение надежности, долговечности и безопасности эксплуатации линий электропередач. Решение этой задачи создает условия для повышения эффективности использования капитальных вложений в строительство и ремонт существующих линий, помогает рационально планировать различные регламентные работы, а также приносить определенный социальный эффект. Целью настоящей статьи является обеспечение подробными сведениями о текущем состоянии воздушных высоковольтных линий электропередач для локализации аварийных сегментов, а также прогнозированию проблемных ситуаций путем разработки новой технологии получения дифференциальных поправок при фазовых измерениях глобальными спутниковыми системами. Освещены проблемы локализации участков повреждений воздушных линий электропередач (ЛЭП) распределительных сетей в период эксплуатации. Определены основные недостатки существующих методов диагностики ЛЭП, которые приводят к перебоям в работе, и обоснована необходимость совершенствования существующих и разработки новых методов обнаружения участков с повреждениями на основе технологий глобального спутникового позиционирования. Новизной отличается также мониторинг повреждения линий электропередач, в результате которого можно оценивать на месте в реальных погодных условиях характеристики вибрации линий электропередачи с различной конструкцией, натяжением проводов и техническим обеспечением, определять номинальный срок службы проводов, подвергающихся вибрации. В результате определена математическая модель для прогнозирования на ее основе состояний линий электропередач, позволяющая с помощью спутникового позиционирования определять точное место повреждения линий электропередач.

Ключевые слова: линии электропередач, мониторинг, повреждение.

REMOTE METHODS OF MONITORING ELECTRIC TRANSMISSION LINES

© 2020

Shamraev Anatolij Anatolevich, ph.D. in Technical Science,
associate professor Department of Information and Robotic Systems

Levchenko Valentina Andreevna, postgraduate student Department of Information and Robotic Systems
Belgorod National Research University
(308015, Belgorod, Pobedy str., 85, e-mails: shamraev@bsu.edu.ru, 1078244@bsu.edu.ru)

Abstract. The development of effective methods for detecting and predicting damage to overhead power lines is urgent, since its successful solution and subsequent development make an important contribution to ensuring the reliability, durability and safety of operation of power lines. This task creates conditions for increase of efficiency of use of capital investments in the construction and repair of existing lines, helps to efficiently manage various maintenance work and also bring certain social benefits. The purpose of this article is providing detailed information about the current status of air high-voltage transmission lines to locate emergency segments as well as forecasting of problem situations through the development of new techniques for obtaining differential corrections in the phase measurements, global satellite systems. The problems of locating sites of damage of overhead transmission lines (transmission lines) distribution networks during operation. Identifies the main shortcomings of existing methods of diagnostics of power lines, which lead to interruptions in the work, and the necessity of improving existing and developing new methods to detect areas with damages on the basis of technologies of global satellite positioning. Novelty is also monitoring damage to power lines, which can be evaluated on the spot in real weather conditions, the vibration characteristics of transmission lines with different design, the tension wires and technical support to determine the rated lifetime of wires exposed to vibration. As a result, define a mathematical model to predict on its basis the state of power lines that allow you to use satellite positioning to determine the exact location of the damage power lines.

Keywords: power lines, monitoring, damage.

Введение. Основной функцией линий электропередач является непрерывное снабжение потребителей электроэнергией. Учитывая современные способы строительства и эксплуатации воздушных линий, часто возникают чрезвычайные процессы,

которые приводят к повреждениям (воздействие стихии, несвоевременное выявление и устранение дефектов, несвоевременная вырубка деревьев, воздействие природы и посторонних лиц) (рис.1).

Из-за большой протяженности и влияния мно-

жества различных внешних воздействий наиболее ненадежным элементом схемы электрических соединений являются линии электропередачи. Наиболее частными повреждениями элементов электроэнергетической системы являются линии электропередач высокого напряжения (рис. 2). В городских

сетях около 85 % отключений приходится из-за них, а в сельских сетях – 90-95 %. Развитие данного направления электроэнергетики обуславливает поиск новых научных решений для удовлетворения потребностей на рынке электроэнергии с наименьшими эксплуатационными затратами.

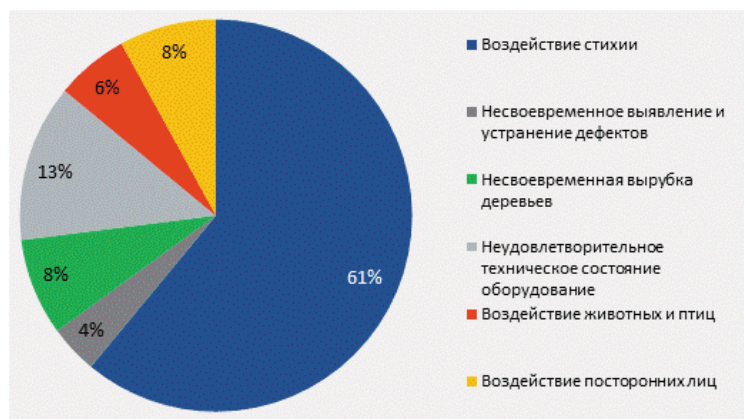


Рисунок 1 – Основные причины технологических нарушений в 2019 году по Белгородской области

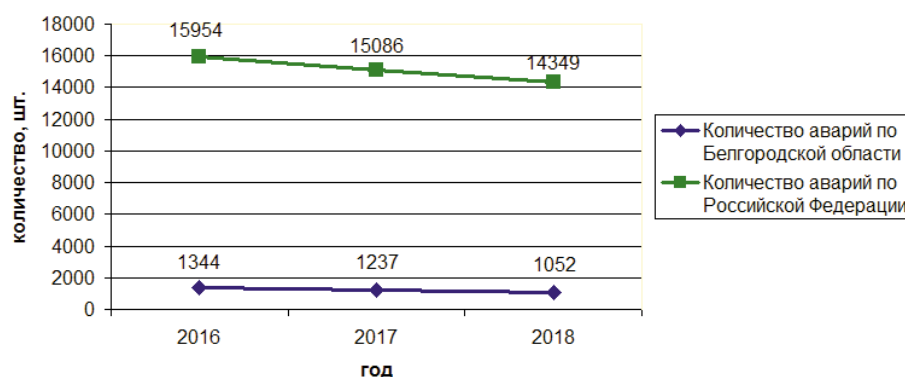


Рисунок 2 – Информация об аварийности в электросетях

Целью исследования является обеспечение сведениями о текущем состоянии воздушных высоковольтных линий электропередач для локализации аварийных сегментов, а также прогнозирование проблемных ситуаций путем разработки новой технологии получения дифференциальных поправок при фазовых измерениях глобальными спутниковыми системами.

Материалы и результаты исследования. Первоначально при разработке электрооборудования и строительства высоковольтных линий необходимо прорабатывать вопрос мониторинга повреждений линий электропередач. По завершению срока службы или в процессе эксплуатации оборудования встает вопрос о методах выполнения диагностических мероприятий определения повреждений. Обоснованный выбор методов мониторинга надежности эксплуатации линий электропередач является одной из ключевых проблем развития электроэнергетики, решению которой посвящены работы многих зарубежных и отечественных ученых.

Современные условия ставят задачу необходимости разработки алгоритма и прибора для определения

точного места повреждения высоковольтных линий. Использование результатов этой разработки во всей энергетической системы поможет оказать влияние на быстрое и своевременное решение проблем.

Повреждение линий воздушных электропередач приводит к нарушению привычного электроснабжения энергопотребителей и должно быть ликвидировано в самые быстрые сроки. На локализацию места повреждения линии электропередач приходится большая часть времени, затраченного на восстановления электроснабжения потребителей. Современные воздушные линии передач оснащены релейной автоматической защитой, однако, определить точное место повреждений без участия человека практически невозможно. Это обусловлено спецификой распределительных сетей, где не применяются регистраторы аварийных режимов и высокочастотная обработка линий. [1] Дополнительно, электрические сети имеют сложную структуру. На основании этого, широкое распространение получили методы локализации места повреждения переносными приборами, лазерное сканирование (воздушное и наземное), аэрофотосъемка и стереофотограмметрия,

спутниковый мониторинг, которые позволяют путем ряда последовательных измерений однозначно локализовать место повреждения.

Современная технология лазерного аэросканирования позволяет получить наиболее полную технологическую информацию о техническом состоянии ЛЭП. Точность измерения зависит от технологии съемки и установленного на борту навигационного оборудования. При применении лазерного аэросканирования, технологическая съемка позволяет измерять геометрические параметры ЛЭП с точностью около 15 см.

Для качественного обследования ЛЭП с помощью аэрокосмической съемки необходимо получать качественные снимки, что приводит к применению дорогостоящего оборудования, а также увеличению времени обработки изображения с помощью компьютерных комплексов.

При применении спутникового мониторинга ограничено разрешение снимков, что влияет на отображение многих элементов линий электропередач, например провода и грозозащитные тросы. Отсутствие четкости, облачности и контрастности влияет на получение верных и точных данных при спутниковом мониторинге, который хорошо подходит для обследования состояния охранной зоны ЛЭП. [2-7]

Изучив решения данной проблемы в зарубежных [8] и отечественных [9,10] источниках, можно прийти к выводу, что выявить дефекты дистанционно, в режиме реального времени большинство рассмотренных технических решений по определению мест повреждений линий электропередач не имеют возможности. Выявление механических повреждений линий электропередач возможно лишь при использовании глобальной системы позиционирования, позволяющей определить точное местоположение проводов и опор и локализовать участки с повреждениями.

Таким образом, для решения указанной задачи предлагаем разработать следующие мероприятия:

- разработать методы определения места аварийного отключения линий электропередач при технологических нарушениях;
- разработать систему, которая определяет повреждение дистанционно, с точностью до мм;
- разработать устройство, которое не должно быть восприимчиво к климатическим воздействиям;
- сформулировать системные требования для устройства;
- усовершенствовать метод дифференциального определения местоположения объекта с помощью GPS приемника;
- разработать устройство, которое не должно влиять на работоспособность ЛЭП;
- выполнить апробацию разработанной системы.

Точное определение местоположения объекта предполагает использование современных методов измерений, которые обеспечат собрать полную информацию о техническом состоянии ЛЭП. Уменьшить время определения места повреждения и снизить объем работ для обслуживающего персонала позволят мероприятия по дистанционному определению места повреждения участка ЛЭП.

Для определения места аварийного отключения линий электропередач в режиме «реального времени» предлагаем использовать глобальную систему позиционирования. Координаты приемников будем измерять относительно вектора базы – режим *DGPS* (*differential global positioning system*). Использование данного метода позволит создать прибор с необходимой точностью измерений. Для этого будем использовать фазовые двухчастотные приемники и фазовые измерения.

Уравнения фазы несущей при измерениях с некоторого пункта *A* на спутник *i*, часто записывают в виде:

$$\Phi_A^i(t) = p_A^i(t, t - \tau_A^i) - I_A^i + T_A^i + \delta m_A^i + c[dt_A(t) - dt^i(t - \tau_A^i)] + c[\delta_A(t) + \delta^i(t - \tau_Z^i)] + \lambda[\phi_A(t_0) - \phi^i(t_0)] + \lambda N_A^i + \varepsilon_A^i$$

где $p_A^i(t, t - \tau_A^i)$ - геометрическая дальность, то есть истинное расстояние между приёмником в момент приёма сигнала и спутником в момент выхода сигнала,

I_A^i - ионосферная задержка,

T_A^i - тропосферная задержка,

δm_A^i - влияние многопутности на фазовые измерения,

dt_A, dt^i - поправки часов соответственно для пункта и для спутника,

δ_A, δ^i - запаздывания сигналов в цепях измерения фазы в приемнике и на спутнике,

ϕ_A, ϕ^i - начальные фазы генераторов спутника и приемника,

τ_A^i - время прохождения сигнала,

N_A^i - целочисленная начальная неоднозначность фазы, - длина несущей волны,

ε_A^i - шумы измерения фазы.

Наблюдение фазы взаимосвязано с остальными измерениями спутника и должно производиться непрерывно.

При сохранении постоянного захвата сигнала спутника появляется возможность производить высокоточные кинематические измерения. Все наблюдения фазы для одного спутника Φ_A^i содержат одну и ту же начальную целочисленную неоднозначность N_A^i .

Для исключения разности ошибок получим разности между результатами измерений с двух пунктов *A* и *B* на двух спутниках *i* и *j*, относящихся к эпохам:

$$\Phi_{AB}^{ij} = p_{AB}^{ij} - I_{AB}^{ij} + T_{AB}^{ij} + \lambda N_{AB}^{ij} + dm_{AB}^{ji} + \varepsilon_{AB}^{ij}$$

Обработка отдельной базовой линии по фазовым данным будет строиться на решении по тройным разностям:

$$\Phi_{AB}^{ij}(t_1, t_2) = p_{AB}^{ij}(t_1, t_2) - I_{AB}^{ij}(t_1, t_2) + T_{AB}^{ij}(t_1, t_2) + \lambda N_{AB}^{ij} + \varepsilon_{AB}^{ij}(t_1, t_2)$$

При этом уравнение поправок имеет вид:

$$-dR_B(\lambda_B^{ji}(t_1, t_2)) + I_{AB}^{ji}(t_1, t_2) = v_{AB}^{ji}(t_1, t_2)$$

где

$$\lambda_B^{ji}(t_1, t_2) = (u_B^i(t_2) - u_B^j(t_2)) - (u_B^i(t_1) - u_B^j(t_1))$$

$$I_{AB}^{ij}(t_1, t_2) = (p_{AB}^{ij}(t_2))^0 - (p_{AB}^{ij}(t_1))^0 - I_{AB}^{ij}(t_2) + I_{AB}^{ij}(t_1) + T_{AB}^{ij}(t_2) - T_{AB}^{ij}(t_1) - \Phi_{AB}^{ij}(t_1, t_2)$$

Для вычисления будут разработаны математические модели ионосферы и тропосферы, которые на основе комплексной обработки навигационных данных обеспечивают повышение точности расчета.

Общее выражение для тропосферной задержки имеет вид:

$$T_A = \frac{0,002277 \left[P + \left(0,05 + \frac{1255}{T} \right) e^{-tg2Z} \right]}{\cos Z}$$

где

P – давление, Па;

T – температура, К;

Z – зенитное расстояние, градусы.

Общее выражение для ионосферной задержки имеет вид:

$$I_A^i = 40,4 \cdot I_v \cdot f^{-2} [\cos ec(\delta^i + 20,32)]^{1/2}$$

$$I_v = \int N_e dr$$

Где I_v – вертикальная интегральная электронная концентрация TEC (Total Electron Content) в эл/м²;

f – частота в герцах;

d – угол места КА в градусах.

N_e – число электронов в м³.

Заключение. Разработка и развитие технологий определения местоположения является приоритетным направлением. Различные методы и технологии определения координат открывают новые возможности для непрерывного мониторинга линий электропередач, а также прогнозирование их изменения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Полуянова М. С., Соколов Д. С., Баева Л. В., Киселёв Г. Ю. Дистанционные методы обследования линий электропередач // Молодой ученый. – 2017. – №22. – С. 68 – 70.
2. Катеров Ф.В., Ремесник Д.В. Дистанционное определение места повреждения линии методом стоячих волн // International scientific review, 2016. №13 (23). С. 24 – 25.
3. Куликов А.Л., Петрухин А.А., Кудрявцев Д.М. Анализ подходов к дистанционному определению нарушений изоляции магистральных линий электропередач // Проблемы энергетики, 2007, №9-10. С. 52 – 62.
4. Дистанционное определение мест повреждений ЛЭП методами активного зондирования: монография / А. Л. Куликов. - Москва : Энергоатомиздат, 2006. – 147 с.
5. Белотелое А.К., Саухатас А.-С.С., Иванов М.В., Любарский Д. Р. Алгоритмы функционирования и опыт эксплуатации микропроцессорных устройств определения мест повреждения линий электропередачи // Электрические станции. 1997. – № 12. – С. 7 – 12.
6. Радкевич В.У., Ничипорович Л.В. Исследование методов оптимизации процесса поиска повреждения в городских

сетях 6-10 кВ // Энергетика. – 1977. – № 1. – С. 107 – 109.

7. Солдатов В.А. Расчетные и экспериментальные исследования методов расчета и определения места возникновения аварийных режимов в электрических сетях 35 кВ. / В.А. Солдатов, А.С. Яблоков // Труды Костромской государственной сельскохозяйственной академии. – Кострома: Костромская ГСХА, 2017. – Выпуск 86. – С. 139 – 143.

8. Chareonsriksam S., Anantavanich K., Prungkhunmuang S., Suwanasri T. Enhancement of substation reliability by retrofitting existing bus configuration applying hybrid switchgear: B3-206. CIGRE – 2012. – P. 9.

9. Гук Ю.Б. Анализ надёжности электроэнергетических установок. Л: Энергоавтомиздат. Ленингр. Отд-ние 1988. – 244с.

10. Тошходжаева М.И. Анализ повреждений воздушных линий электропередач 35-220 кВ на примере Согдийской электрической сети // Вестник Чувашского университета. – 2016. – № 1. – С. 105 – 111.

11. The Automatic Precise Point Positioning Service of the Global Differential GPS System [Электронный ресурс]. – Jet Propulsion Laboratory. – Режим доступа: <http://apps.gdgps.net/>.

12. Takagi T., Yamakosi Y., Yamura M. et al. Development of a New Type Fault Locator using the One-Terminal Voltage and Current Data // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101. – 1982. - № 8. – P. 2892 – 2898.

13. Аким Э.Л., Тучин Д.А. Апостериорная оценка точности определения вектора состояния земного наблюдателя по измерениям дальности и скорости системы космической навигации GPS, препринт Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Редакционно-издательская группа. – 2001– № 36. –24с.

14. Тошходжаева, М.И. Повышение надежности ВЛЭП-110 кВ на стадии проектирования и эксплуатации / М.И. Тошходжаева, О.С.Рахимов, А.А.Ходжиев // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2017. – № 3. – С. 47 – 49.

15. Шалыт Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях: учеб. Для вузов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 312с.

16. Ztoupis, I.N. Uncertainty evaluation in the measurement of power frequency electric and magnetic fields from AC overhead power lines / I.N. Ztoupis, I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos // Radiation Protection Dosimetry, Athens, Greece, 2003. – P. 1-11.

17. Shi J. Precise Point Positioning Integer Ambiguity Resolution with Decoupled Clocks. University of Calgary, 2012. – 192 p.

18. Куприянов А.О. Глобальные навигационные спутниковые системы: Учебное пособие. – М.: МИИГАиК, 2017, – 76 с.

19. Валайтите А.А., Никитин Д.П., Садовская Е.В. Исследование влияния ошибки на точность определения параметров сигналов ГНСС (Глобальных навигационных спутниковых систем) при помощи имитатора навигационного поля // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2014. №77. – С. 1 – 22.

20. Laurichesse D. The CNES Real-time PPP with undifferenced integer ambiguity resolution demonstrator, ION GNSS 2011.

Статья поступила в редакцию 10.05.2020

Статья принята к публикации 10.06.2020