

УДК 004.942

РАЗРАБОТКА МЕТОДА БЕСКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ МОЩНОСТНЫХ РЕЖИМОВ ДЛИННОЙ ЛИНИИ

Горошков В.А. (ИТМО)

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Гришенцев А.Ю. (ИТМО)

Введение. Совершенствование технических средств измерения индукции магнитного поля и методов обработки результатов измерений позволяет проводить бесконтактные измерения токов для исследования мощностных режимов работы систем электроснабжения.

Проводимые в области электроэнергетики, машинного обучения и обработки данных исследования привели к разработке методов неинтрузивного мониторинга нагрузки (англ. NILM - Nonintrusive load monitoring), отличительной особенностью которых является возможность разделения совокупной нагрузки исследуемого объекта на нагрузки отдельных, входящих в его состав, устройств. В период с 2010 г. рядом исследователей [1-5] подтверждена возможность обнаружения сигнатур отдельных устройств-потребителей и получения информации о режимах их работы при помощи анализа данных измерения силы тока и напряжения в одной точке исследуемой распределительной электрической сети. В исследованиях G. Kalogridis, H. Wang, S. Shaham возможность получения данной информации рассматривается как угроза нарушения конфиденциальности данных [2-4].

Организация электроснабжения промышленных предприятий с размещением приборов учета и трансформаторных подстанций на контролируемой территории затрудняют возможность несанкционированного применения методов разделения нагрузок. Реализация методов бесконтактного измерения мощностных режимов длинной линии позволяет проводить анализ генерации и потребления электроэнергии различными объектами со стороны питающих линий высокого напряжения. Поскольку результаты работы методов бесконтактных методов измерения и разделения (деагрегации) нагрузок могут привести к возникновению новых угроз и каналов утечки информации исследование области применения данных методов является актуальной проблемой для информационной безопасности.

Основная часть. В ходе исследования была проведена разработка метода бесконтактного измерения мощностных режимов длинной линии и проведена оценка дальности регистрации электротехнического [6] сигнала для типовых конструкций одноцепных воздушных линий электропередачи (ЛЭП). Работа метода основана на решении обратной задачи вычисления токов в проводниках длинной линии по данным измерения индукции магнитного поля в поперечном сечении линии [7]. Для решения данной задачи вычисляется взаимное расположение датчиков магнитного поля (x_p, y_p) и проводников (x_q, y_q) ЛЭП на основе измерения расстояний между ними методом лазерно-оптической дальнометрии. На основе закона Био-Савара-Лапласа с применением метода наложения определяются выражения для вычисления величины вектора индукции магнитного поля \mathbf{V} в точках расположения датчиков (x_p, y_p) согласно выражению 1:

$$\mathbf{V}_{q,p}(t) = \mu i_q(t) \frac{(x \cos \theta_{q,p} + y \sin \theta_{q,p})}{2\pi \left(\sqrt{(x_p - x_q)^2 + (y_p - y_q)^2} \right)}, \quad (1)$$

где $\mu = \mu_1 \mu_0$ – абсолютная магнитная проницаемость среды; μ_1 – относительная магнитная проницаемость среды; μ_0 – магнитная постоянная; $q, p = 1 \dots Q$ – целочисленные индексы; $\theta_{q,p}$ – полярный угол характеризующий положение (x_p, y_p) относительно (x_q, y_q) , причём (x_q, y_q) принимается за точку, через которую проходит полярная ось; \mathbf{x}, \mathbf{y} – направляющие векторы по осям Ox и Oy соответственно.

На основе выражения (1) возможно составить систему линейных алгебраических уравнений для вычисления значений токов $i_q(t)$ в отдельных проводниках Q -проводной

ЛЭП, запись которой целесообразно проводить в матричной форме: $\mathbf{AI} = \mathbf{B}$. Тогда выражение для решения обратной задачи примет вид (2):

$$\mathbf{I} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B} \quad (2)$$

Возможность решения прямой и обратной задач была подтверждена в ходе исследования математической модели, основанной на выражениях 1-2 [7]. При этом применение разработанного метода для обработки результатов измерений неизбежно сопряжено с неточностью измерения физических величин. В целях оценки возможности решения обратной задачи по данным измерений физических величин и оценки дистанции регистрации электротехнического сигнала проведен анализ величин относительных погрешностей исходных данных ($\delta(\mathbf{B}), \delta(x), \delta(y)$) и значений числа обусловленности матрицы коэффициентов (\mathbf{A}) СЛАУ (2).

В результате анализа определена зависимость значения относительной погрешности решения СЛАУ $\delta(\mathbf{I})$ от воздействий следующих факторов: координат расположения точек проведения измерений вектора \mathbf{B} , относительной погрешности измерения $\delta(\mathbf{B})$, параметров выборки и обработки результатов измерения в частотной области. Сопоставление полученной величины погрешности $\delta(\mathbf{I})$ с заданными значениями позволило подтвердить возможность регистрации электротехнического сигнала одноцепных ЛЭП с ошибкой измерений не превышающей 25% от истинного значения, при условии взаимного расположения датчиков под ЛЭП на расстояниях, превышающих высоту подвеса проводников ЛЭП над уровнем поверхности земли.

Выводы. Исследование границ применимости разработанного метода подтвердило возможность его применения для бесконтактного измерения объемов мощности, передаваемой при помощи воздушных ЛЭП. Совместное использование результатов работы и известных методов неинтрузивного мониторинга нагрузки создают возможность детального исследования режимов потребления и генерации объектов, подключенных к сетям высокого напряжения, что может привести к возникновению новых каналов утечки информации из систем и сетей электроснабжения посредством бесконтактной регистрации электротехнического сигнала.

Список использованных источников:

1. Hart, G.W. (1989). Residential energy monitoring and computerized surveillance via utility power flows. *IEEE Technology and Society Magazine*, 8, 12-16.
2. Kalogridis, G., Efthymiou, C., Denic, S.Z., Lewis, T.A., & Cepeda, R. (2010). Privacy for Smart Meters: Towards Undetectable Appliance Load Signatures. *2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications*, 232-237.
3. Wang, H., Zhang, J., Lu, C., & Wu, C. (2020). Privacy Preserving in Non-Intrusive Load Monitoring: A Differential Privacy Perspective. *2021 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, 01-01.
4. Shaham, S., Ghinita, G., Krishnamachari, B., & Shahabi, C. (2024). Differentially Private Publication of Electricity Time Series Data in Smart Grids. *ArXiv, abs/2408.16017*.
5. Кузьмин П.С. (2019). Неинтрузивный мониторинг нагрузки: эффекты внедрения и перспективы распространения // Стратегические решения и риск-менеджмент. Т. 10. № 4. С. 306–319. doi:10.17747/2618-947X-2019-4-306-319
6. Коровкин Н.В., Грицутенко С.С. Введение понятия «низкоэнтропийный сигнал» // Электричество. 2020. № 10. С. 33–43. doi:10.24160/0013-5380-2020-10-33-43
7. Грищенко А.Ю., Арустамов С.А., Кармановский Н.С., Горошков В.А., Чернов Р.И. Методы бесконтактной регистрации информационных сигналов для аудита информационной безопасности систем и сетей электроснабжения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 6. С. 1233–1241. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-6-1233-1241