УДК 621.311.22 DOI10.18635/2071-2219-2021-2-41-45

Математическая модель модуля дистанционного мониторинга проводов по каналам измерения механических воздействий на провод воздушной линии

В. О. Акуличев,
ПАО «МРСК Центра и Приволжья»,
первый заместитель генерального директора, директор по развитию

В. Ю. Непомнящий,
ПАО «МРСК Центра и Приволжья», филиал «Тулэнерго»,
первый заместитель директора – главный инженер

С. Г. Висич,
ПАО «МРСК Центра и Приволжья»,
ведущий инженер

М. В. Панарин,
ООО «СервисСофт Инжиниринг»,
директор, кандидат технических наук

А. А. Маслова,
Тульский государственный университет,
доктор технических наук, доцент кафедры охраны труда и окружающей среды

Рассмотрена математическая модель модуля дистанционного мониторинга проводов по каналам измерения механических воздействий на провод воздушной линии, которая включает в себя модель измерения угла стрелы провеса воздушной линии, модель фиксации обрыва провода воздушной линии, модель измерения вибрации провода и модель «пляски» проводов при условии формирования одной полуволны колебаний на пролете воздушной линии. Математическая модель реализуется на модуле и на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании.

Ключевые слова: *дистанционная диагностика, воздушная линия электропередачи, электрический ток, механическое воздействие, диспетчерский пункт.*

В настоящее время происходит цифровая трансформация бизнес-процессов и бизнес-моделей. Ключевым направлением в цифровой экономике и промышленности, которое интегрирует робототехнику, промышленный интернет, искусственный интеллект и т. д., становятся цифровые двойники. Сообразно этой тенденции ООО «СервисСофт» и филиалом «Тулэнерго» ПАО «МРСК Центра и Приволжья»разрабатывается серия модулей интеллектуальной диагностики воздушных линий электропередачи 6–220 кВ. В том числе ведется разработка комплекса математических моделей дистанционного мониторинга проводов по каналам измерения механических воздействий на провод ВЛ, включая модель измерения угла стрелы провеса ВЛ, модель фиксации обрыва провода, модель измерения вибрации провода и модель «пляски» проводов.

В математической модели модуля дистанционного мониторинга проводов по каналам измерения механических воздействий на провод ВЛ последовательность измеренных значений ускорений при квантовании датчика акселерометра по осям x, y, z, м/с^2, определяется по формуле:

$$g_i(k),\ g_i(k-1),\ g_i(k-2),\ \ldots g_i(k-N+1),\ g_i(k-N), \quad (1)$$

где g_i – ускорение датчика акселерометра по вертикальной оси x, y, z, м/с^2;
k – порядок отсчета значений переменных при квантовании;
N – количество отсчетов значений ускорения датчика акселерометра при квантовании.

Математическая модель измерения угла стрелы провеса ВЛ по каналам механических воздействий на провод на базе модуля дистанционного мониторинга проводов ВЛ

Тангенс угла стрелы провеса определяется отклонением перпендикуляра к проводу от вертикали в вертикальной плоскости вдоль оси провода ВЛ,

соответственно угол стрелы провеса $\varphi(k)$, рад, равен [1–2]:

$$\varphi(k) = \arctan\frac{g_y(k)}{g_z(k)}. \quad (2)$$

Устанавливается предельное наименьшее значение угла стрелы провеса $\varphi(k)$ по конструктивным особенностям опоры, гирлянды изоляторов и крепления провода ВЛ равное, $\varphi(k)_{доп.min}$, и предельное наибольшее значение угла стрелы провеса $\varphi(k)_{доп.max}$.

Если для k отсчета соблюдается соотношение:

$\varphi(k)_{доп.min} < \varphi(k) < \varphi(k)_{доп.max}$, то $\varphi(k)_{мг.пр.} = \varphi(k)$,

где $\varphi_{пmin}$ – минимально допустимое значение функции отклонения перпендикуляра к проводу от вертикали и вдоль оси провода;

$\varphi_{п.\,max}$ – максимально допустимое значение функции отклонения перпендикуляра к проводу от вертикали и вдоль оси провода;

$\varphi(k)_{мг.пр.}$ – мгновенное значение угла стрелы провеса провода, рад.

В противном случае формируется сообщение об ошибке считывания и расчета значения угла стрелы провеса датчика акселерометра и запускается счетчик количества последовательно считанных ошибочных значений датчика.

Последовательность отсчетов значений углов стрелы провеса провода от последнего измеренного значения k:

$$\varphi(k),\ \varphi(k-1),\ \varphi(k-2),\ \ldots\ \varphi(2),\ \varphi(1). \quad (3)$$

Учитывая достаточно медленные динамические процессы изменения угла стрелы провеса провода ВЛ, необходимо применять фильтр в виде апериодического звена первого порядка с постоянной времени T_φ и коэффициентом передачи $К_\varphi$.

Процесс фильтрации значений угла стрелы провеса провода ВЛ представим выражением:

$$\varphi(k) = \frac{1}{T_\varphi}\varphi(k-1) + \frac{К_\varphi}{T_\varphi}\varphi(k)_{мг.\,пр.}. \quad (4)$$

Выбор постоянной времени T_φ и коэффициента передачи $К_\varphi$ фильтра производится с учетом динамики температурных изменений провода ВЛ.

В результате окончательно получаем сглаженную последовательность отсчетов значений углов стрелы провеса провода. Параметры последовательности отсчетов значений углов стрелы провеса провода передаются в диспетчерский пункт электросетевой компании с установленным периодом T.

Математическая модель фиксации обрыва провода ВЛ по каналам измерения механических воздействий на провод на базе модуля дистанционного мониторинга проводов ВЛ

Модель фиксации обрыва провода строится на основании данных датчика акселерометра по векторам, направленным по вертикали и вдоль оси провода ВЛ по последовательностям [3]. Последовательность измеренных значений ускорений при квантовании датчика акселерометра по осям y, z определяется по формуле (1). При обрыве провода скачкообразно меняется значение функции (2). Данная функция имеет два состояния, характеризующие провод ВЛ. Первое состояние – провод ВЛ исправен. Диапазон изменения значения функции при исправном состоянии провода находится в пределах:

$$\varphi_{п.\ min} \le \arctan\frac{g_y(k)}{g_z(k)} \le \varphi_{п.\ max}. \quad (5)$$

При соблюдении указанных диапазонов провод находится в допустимых предельных отклонениях от продольной оси, вертикали и обрыва провода ВЛ в контролируемом пролете нет.

При обрыве провода скачкообразно меняется значение функции, ее величина выходит за обозначенные диапазоны, то есть:

$$\varphi_{п.\ min} > \arctan\frac{g_y(k)}{g_z(k)} > \varphi_{п.\ max}. \quad (6)$$

При этом отклонения от вертикали перпендикуляра к проводу и вдоль оси провода меньше минимально допустимых значений и больше максимально допустимых значений. Такое условие говорит о выходе оси провода за установленные конструкцией пределы, что, вероятнее всего, связано с обрывом провода. При выполнении (6) для исключения отправки ошибочных сообщений производится оценка повторяемости данного соотношения. Для этого формируется счетчик исполнения соотношения (6), проводящий подсчет количества последовательно непрерывных исполнений при возрастании k.

Принимается N_φ как допустимое количество ошибочных значений фиксации обрыва провода ВЛ. Если

$$n_\varphi > N_\varphi, \quad (7)$$

то формируется сообщение об обрыве провода ВЛ на контролируем пролете.

Модуль интеллектуальной диагностики вырабатывает сигнал инициации и передает сообщение об обрыве провода ВЛ в диспетчерский пункт электросетевой компании с минимальным промежутком времени.

Математическая модель измерения вибрации провода по каналам измерения механических воздействий на базе модуля дистанционного мониторинга проводов ВЛ

Модель измерения вибрации провода ВЛ построена раздельно по осям x, y, z (1).

Для определения приоритетных частот вибрации провода ВЛ используется аппарат вычислений автокорреляционных функций:

$$f_i(L) = \sum_{k=0}^{N} g_i(k)\cdot g_i(k-L), \quad (8)$$

где $fi\,(L)$ – дискретная автокорреляционная функция ускорений по осям x, y, z;

(L) – лаг автокорреляционной функции;

N – количество обрабатываемых значений временного ряда ускорений.

Для вычисления периодических составляющих ускорений значения лага принимаем в пределах $2 \le L \le L_{max}$, где L_{max} – максимальное значение лага. Максимальный лаг не должен превышать четверти длины ряда.

Анализ частоты вибрации провода ВЛ обычно принимают в диапазоне: $f_{ВЛ\ вибр.min} \le f_{ВЛ\ вибр} \le f_{ВЛ\ вибр.max}$, при этом $f_{ВЛ\ вибр.max}$ и $f_{ВЛ\ вибр.min}$ – максимальное и минимальное значения частоты вибрации провода ВЛ [4].

Для обеспечения измерения максимального значения частоты вибрации провода ВЛ принимается $N = 4L_{max}$ и определяется по формуле:

$$N = T_{аф} / T_а, \tag{9}$$

где $T_{аф}$ – интервал времени, на котором вычисляется автокорреляционная функция, с;

$T_а$ – период квантования по времени данных с датчика акселерометра, с.

$$L_{max} = T_{аф} / 4T_а;$$
$$f_{ВЛ\ вибр.\ max} = L_{max} / T_а; \tag{10}$$
$$L_{max} = T_а \cdot f_{ВЛ\ вибр.\ max}.$$

Значение L_{max} округляется до ближайшего превышающего целого числа.

Данные соотношения определяют интервал времени, на котором вычисляется автокорреляционная функция и количество отсчетов во временном ряду [4–5].

Минимальное значение L_{min} определяется из соотношения:

$$L_{min} = T_а \cdot f_{ВЛ\ вибр.min}. \tag{11}$$

Значение L_{min} округляется до ближайшего наименьшего целого числа.

В результате имеем значения коррелограммы, соответствующие максимальным значениям амплитуд ускорений при вибрации на указанных частотах. Эти данные передаются в диспетчерский пункт электросетевой компании с установленным периодом T.

Математическая модель «пляски» проводов при условии формировании одной полуволны колебаний на пролете ВЛ

Составляющая амплитуды «пляски» провода при условии формировании одной полуволны колебаний на пролете определяется соотношением:

$$A_{пл_i} = \left(\frac{L_i}{1000}\right)\left(\frac{9{,}8L_{прл}}{16ld\, f^2_{ВЛ\ вибр.}}\right), \tag{12}$$

где $A_{пл_i}$ – амплитуды «пляски» провода в вертикальной или горизонтальной плоскости, м;

L_i – наименьшая периодическая составляющая автокорреляционной функции $f_z(L)$ в вертикальной плоскости;

$L_{прл}$ – длина пролета, м;

ld – расстояние крепления модуля дистанционной диагностики от точки схода провода, м.

Направление оси «пляски» провода относительно горизонтальной плоскости определяется следующим образом:

$$\varphi_{пл}(k) = \arctan\left(\frac{A_{пл_y}(k)}{A_{пл_z}(k)}\right), \tag{13}$$

где $\varphi_{пл}(k)$ – угол между направлением «пляски» провода и горизонтальной плоскостью, рад.

Следует отметить, что динамические элементы и устройства фильтрации в математической модели модуля дистанционного мониторинга проводов ВЛ представлены в виде апериодических динамических звеньев первого порядка с большими постоянными времени, что не приводит к потере устойчивости модели в целом.

Адекватность разработанной математической модели проверена посредством оценки соответствия выходных параметров математической модели и лабораторного макета модуля дистанционного мониторинга проводов ВЛ при одинаковых входных значениях, подаваемых на входы математической модели лабораторного макета модуля дистанционного мониторинга проводов ВЛ.

Результаты исследований показали соответствие математической модели лабораторному макету модуля дистанционного мониторинга проводов ВЛ, расхождение параметров соответствует заданным требованиям технического задания.

Математическая модель модуля дистанционной диагностики проводов по каналам измерения механических воздействий на провод воздушной линии реализуется на модуле и на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании МРСК Центра

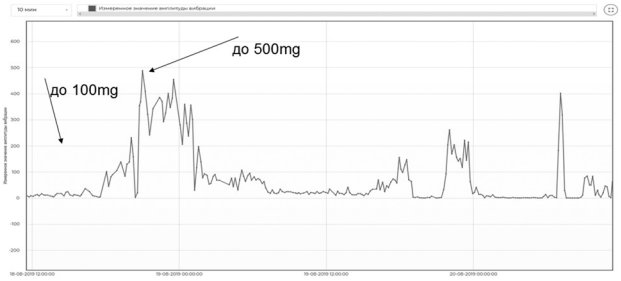

Рис. 1. Модуль дистанционной диагностики ВЛ «Звезда – Бегичево», опора № 279. Амплитуда вибрации: стандартные значения в интервале 100–150 мГ; 18 августа 2019 г. зафиксирована пляска проводов с амплитудой до 500 мГ

Fig. 1. Remote diagnostics module of the Zvezda–Begichevo overhead power line, pole #279. Standard vibration amplitude: 100–150 mg. Up to 500 mgconductor galloping recorded on August 18, 2019

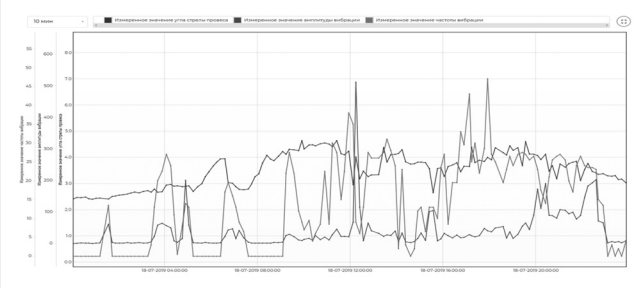

Рис. 2. Модуль дистанционной диагностики ВЛ «Звезда – Бегичево», опора № 279. Фиксация события нестандартного характера 18 июля 2019 г. по трем показателям (угол стрелы провеса, амплитуда и частота вибрации)

Fig. 2. Remote diagnostics module of the Zvezda–Begichevo overhead power line, pole #279. An incident recorded on July 18, 2019 according to the sag angle and vibration amplitude and frequency

и Приволжья. В частности, разработанные модели использовались при разработке модуля дистанционного мониторинга проводов по каналам измерения механических воздействий на провод ВЛ «Звезда – Бегичево», опора № 279.

На рис. 1 и 2 отражено фиксирование пляски проводов с амплитудой до 500 мГ и событий нестандартного характера по трем показателям: угол стрелы провеса, амплитуда и частота вибрации.

Итак, представленная математическая модель дистанционного мониторинга проводов ВЛ электропередачи по каналам измерения механических воздействий на провод воздушной линии содержит модели фиксации угла стрелы провеса провода, обрыва провода, вибрации и «пляски» проводов. Практическая ценность разработанной модели состоит в использовании полученных уравнений для построения алгоритмического и программного обеспечения, реализуемого в модулях дистанционной диагностики проводов ВЛ и сервере электросетевой компании. Разработан модуль дистанционной диагностики, монтируемый на проводе ВЛ для измерения механических воздействий на провод и фиксации угла стрелы провеса провода, обрыва, вибрации и «пляски» провода. Полученные теоретические и практические результаты и модуль дистанционной диагностики проводов находят применение в оперативных службах электросетевых компаний.

Литература

1. Соловей П. И., Лобов М. И., Переварюха А. Н., Чирва А. С., Белова А. А. Геодезический контроль стрелы провеса оттяжек мачтовых сооружений в условиях эксплуатации // Металлические конструкции. – 2019. – Т. 25. – № 1. – С. 17–24.

2. Дидюк А. Я., Низовой А. Н., Понькин В. А. Точность измерения стрелы провеса проводов и грозозащитных тросов воздушных линий электропередачи по 2D и 3D изображениям // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – Т. 6. – № 12. – С. 90–95.

3. Ершов А. М., Хлопова А. В., Сидоров А. И. Моделирование системы обеспечения электробезопасности при обрыве одной из фаз // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2018. – № 3. – С. 134–145. https://doi.org/10.5281/zenodo.1408246.

4. СТО 56947007-29.240.55.143–2013. Методика расчета предельных токовых нагрузок по условиям сохранения механической прочности проводов и допустимых габаритов воздушных линий.

5. СТО 56947007-29.240.55.111–2011. Методические указания по оценке технического состояния ВЛ и остаточного ресурса компонентов ВЛ.

Для цитирования:

Акуличев В. О., Непомнящий В. Ю., Висич С. Г., Панарин М. В., Маслова А. А. Математическая модель модуля дистанционного мониторинга проводов по каналам измерения механических воздействий на провод воздушной линии / / Энергобезопасность и энергосбережение. – 2021. – № 2. – С. 41–45. https://doi.org/10.18635/2071-2219-2021-2-41-45.

Cite this paper:

Akulichev, V. O., Nepomnyashchy, V. Yu., Visich, S. G., Panarin, M. V., Maslova, A. A. (2021). Mathematical model of a remote monitoring module by mechanical impact measuring channels on an overhead power line. *Energy Safety and Energy Economy*, 2, 41–45 (in Russian). https://doi.org/10.18635/2071-2219-2021-2-41-45.

Mathematical model of a remote monitoring module by mechanical impact measuring channels on an overhead power line

V. O. Akulichev,
Interregional Distribution Grid Company of Center and Volga Region, Russia, first deputy CEO, development director

V. Yu. Nepomnyashchy,
Interregional Distribution Grid Company of Center and Volga Region, Tulenergo, Russia, first deputy director, head engineer

S. G. Visich,
Interregional Distribution Grid Company of Center and Volga Region, Russia, lead engineer

M. V. Panarin,
ServiceSoft Engineering LLC, Russia, director, PhD

A. A. Maslova,
Tula State University, Russia, Doctor of Science

This paper focuses on developing a mathematical model of a remote monitoring module by mechanical impact measuring channels on an overhead power line.The mathematical model simulatessag angle monitoring,wire break, wire vibration, and conductor gallopingprovided that one half-wave is forming at one power line span. The proposedmathematical model has been implemented as part of control tools at an electric power supply company.

Keywords: *remote diagnostics, overhead power line, electric current, mechanical impact, control room.*

References

1. Solovej, P., Lobov, M., Perevarjuha, A., Chirva, A., Belova, A. (2019). Geodezicheskiy kontrol strely provesa ottyazhek machtovykh sooruzheniy v usloviyakh ekspluatatsii [Geodetic control ofa tower structureswire sag under operation conditions]. *Metallicheskie Konstruktsii, 25*(1), 17–24.

2. Didyuk, A.Ya., Nizovoj, A.N., Ponkin, V.A. (2010). Tochnost izmereniya strely provesa provodov i grozozaschitnykh trosov vozdushnykh liniy elektroperedachi po 2D i 3D izobrazheniyam [Accuracy of measurement of a sag of strings and ground wireson overhead power lines in 2D and 3D pictures]. *Proceedings of Voronezh State University, 6*(12), 90–95.

3. Ershov, A., Khlopova, A., Sidorov, A. (2018). Modelirovanie sistemy obespecheniya elektrobezopasnosti pri obryve odnoy iz faz [Modelling of the electrical safety system in case of a phase failure]. *The Far Eastern Federal University: School of Engineering Bulletin,* 3, 134–145. https://doi.org/10.5281/zenodo.1408246.

4. STO 56947007-29.240.55.143–2013. Calculation methodology for current limit loads for preserving mechanical strength of wires and acceptable dimensions of overhead power lines.

5. STO 56947007-29.240.55.111–2011. Methodological guidelines for assessing technical conditions of overhead power lines and residual time of overhead line components.