УДК 621.311.22 DOI 10.18635/2071-2219-2021-5-37-42

Математическая модель дистанционного мониторинга заземляющих устройств опор воздушных линий по каналу измерения величины сопротивления заземляющих устройств

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

С. Ю. Захаров,
ПАО «МРСК Центра и Приволжья», филиал «Тулэнерго»,
и. о. первого заместителя директора – главного инженера

И. А. Родионов,
ПАО «МРСК Центра и Приволжья», филиал «Тулэнерго»,
заместитель главного инженера по управлению производственными активами

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 заземляющих устройств опор воздушных линий по каналу измерения величины сопротивления заземляющих устройств, которая реализуется на модуле и на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании. Значения сопротивления заземления опоры воздушной линии передаются от модуля дистанционного мониторинга заземления опор на сервер диспетчерского пункта электросетевой компании с определенным периодом передачи данных.

Ключевые слова: *дистанционная диагностика, воздушная линия электропередачи, сопротивление, заземляющее устройство, диспетчерский пункт.*

Проведение мониторинга заземления опор воздушных линий электропередачи возможно путем определения величины сопротивления заземления посредством измерения токов и напряжений по соответствующей схеме в районе нахождения опоры воздушной ЛЭП. Для этой цеди используются шина заземления опоры и электроды, потенциальный и токовый, расположенные в установленных местах относительно опоры воздушной линии. В процессе определения величины сопротивления заземления опоры генератор прямоугольных импульсов тока регулируемой частоты и амплитуды модуля дистанционной диагностики заземления опор ВЛ подключен к шине заземления опоры и потенциальному электроду, помещенному в грунт на определенном расстоянии от опоры ВЛ. Измерение тока производится разъемным трансформатором тока, охватывающим шину заземления опоры ВЛ ниже точки подключения генератора тока по отношению к земле. Измерение напряжения производится относительно шины заземления опоры и потенциального электрода, размещенного на установленном расстоянии относительно опоры ВЛ [1–3].

Модуль дистанционного мониторинга заземления опор ВЛ генерирует прямоугольные импульсы тока установленной частоты и амплитуды, измеряет величину тока на землю через заземлитель и фиксирует величину напряжения между заземлителем и потенциальным электродом, проводит расчет сопротивления заземления опоры ВЛ и дистанционную передачу полученных данных в диспетчерский пункт электросетевой компании для проведения предиктивных действий для предотвращения проявления нештатных и аварийных ситуаций [4, 5]. Отключение грозозащитного троса не требуется.

Последовательность прямоугольных импульсов тока, генерируемых модулем дистанционного мониторинга опор ВЛ с периодом $T_{змд}$, представим в виде:

$$\begin{gathered} i_{змд}(k),\ i_{змд}(k-1),\ i_{змд}(k-2),\ i_{змд}(k-3),\ ..., \\ i_{змд}(k-N+1),\ i_{змд}(k-N) = -I_{змд}; \\ i_{змд}(k-N-1),\ i_{змд}(k-N-2),\ i_{змд}(k-N-3), \\ i_{змд}(k-2N+1),\ i_{змд}(k-2N) = +I_{змд}, \end{gathered} \quad (1)$$

где $i_{змд}(k)$ – мгновенное значение тока генератора модуля дистанционного мониторинга заземления опор ВЛ, А;

k – порядок отсчета значений переменных при квантовании;

$-I_{змд}$ – значение тока генератора модуля дистанционного мониторинга заземления опор ВЛ отрицательной полярности, А;

$+I_{змд}$ – значение тока генератора модуля дистанционного мониторинга заземления опор ВЛ положительной полярности, А;

N – количество отсчетов импульсов тока модуля дистанционного мониторинга опор ВЛ положительной или отрицательной полярности в периоде $T_{змд}$.

Значение N определяется соотношением:

$$N = \frac{T_{змд}}{T_{зоп}}, \quad (2)$$

где $T_{змд}$ – период генерации прямоугольных импульсов тока модулем дистанционного мониторинга заземления опор ВЛ, с;

$T_{зоп}$ – период квантования по времени измеряемых значений тока и напряжения, с.

Данная последовательность импульсов тока модуля дистанционного мониторинга заземления опор ВЛ приводит к появлению напряжения на потенциальном электроде относительно шины заземления опоры ВЛ.

Измеренные дискретные значения напряжения на потенциальном электроде в последовательности на интервале 0...2N представим в виде:

$$\begin{gathered} u_з(k),\ u_з(k-1),\ u_з(k-2),\ u_з(k-3),\ ..., \\ u_з(k-N),\ u_з(k-2N+1),\ u_з(k-2N), \end{gathered} \quad (3)$$

где $u_з$ – мгновенное значение напряжения на потенциальном электроде, В.

Измеренные дискретные значения тока заземления через заземлитель опоры ВЛ ниже точки подключения генератора тока по отношению к земле последовательности на интервале 0...2N имеют вид:

$$\begin{gathered} i_з(k),\ i_з(k-1),\ i_з(k-2),\ i_з k-3),\ ..., \\ i_з(k-N),\ i_з(k-2N+1),\ i_з(k-2N), \end{gathered} \quad (4)$$

где $i_з(k)$ – мгновенное значение тока заземления, А.

Интервал измерений выбран в диапазоне 0...2N для снятия последовательности мгновенных дискретных значений напряжения на потенциальном электроде и тока заземления на полном периоде $T_{змд}$ генерации прямоугольных импульсов тока модулем дистанционного мониторинга заземления опор ВЛ. В результате в модуле дистанционного мониторинга заземления опор ВЛ формируются последовательности, представляющие собой наборы отсчетов дискретных значений напряжений на потенциальном электроде и токов заземления через заземлитель опоры ВЛ.

На основании полученных мгновенных значений токов и напряжений определяется расчетное мгновенное значение сопротивления заземления:

$$r_{зт}(k) = u_з(k)/i_з(k), \quad (5)$$

где $r_{зт}(k)$ – расчетное мгновенное значение сопротивления заземления, Ом;

$i_з(k)$ – мгновенное значение сопротивления заземления, Ом; мгновенное значение тока заземления, А;

$u_з(k)$ – мгновенное значение напряжения на потенциальном электроде, В.

По мгновенным значениям напряжений и токов формируется последовательность расчетных мгновенных значений сопротивления вида:

$$\begin{gathered} r_{зт}(k),\ r_{зт}(k-1),\ r_{зт}(k-2),\ r_{зт}(k-3),\ ..., \\ r_{зт}(k-N),\ r_{зт}(k-2\mathrm{N}+1),\ r_{зт}(k-2\mathrm{N}). \end{gathered} \quad (6)$$

Все члены последовательности расчетных мгновенных значений сопротивления заземления являются положительными величинами. Это обеспечивается явлением синхронного детектирования при реализации уравнения (5).

За счет образования зоны коронирования вокруг заземлителя реальное сопротивление заземления опоры ВЛ будет меньше; оно корректируется коэффициентом импульса $К_и$, значение которого определяется эмпирически:

$$К_и = \sqrt{\frac{1500\sqrt{S}}{(\rho+320)(I_m+45)}}, \quad (7)$$

где S – площадь заземлителя, м^2;

ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м;

I_m – ток молнии, А.

На основании расчетных мгновенных значений сопротивлений определяется величина сопротивления заземления опоры ВЛ:

$$r_з(k) = К_и \cdot r_{зт}(k) \quad (8)$$

и формируется последовательность:

$$\begin{gathered} r_з(k),\ r_з(k-1),\ r_з(k-2),\ r_з(k-3),\ ..., \\ r_з(k-N),\ r_з(k-2N+1),\ r_з(k-2N), \end{gathered} \quad (9)$$

где $r_з$ – мгновенное значение сопротивления заземления, Ом.

В результате полученная последовательность представляет собой набор значений сопротивления заземления в дискретные моменты времени k.

Учитывая, что измерения проводятся без отключения грозозащитного троса на опоре ВЛ и модуль дистанционного мониторинга заземления опор ВЛ генерирует двухполярные прямоугольные импульсы тока установленной частоты и амплитуды, в начале каждого перехода через ноль возникают переходные процессы из-за наличия индуктивных и емкостных свойств грозозащитного троса, что приводит к появлению погрешностей в расчете мгновенных значений сопротивления заземления. Для устранения погрешностей, определяемых емкостными и индуктивными свойствами элементов в схеме измерения сопротивления заземления опоры ВЛ, в начале каждого прямоугольного импульса при переходе из одной полярности в другую часть измеренных значений, попадающих в период времени переходного процесса, исключается из последовательностей напряжений и токов [6–7].

В результате последовательность (3), представляющая собой наборы отсчетов дискретных значений напряжений на потенциальном электроде, примет вид:

$$u_з(k-kt),\ u_з(k-kt-1),\ u_з(k-kt-2),\ u_з(k-kt-3),\ ...,\ u_з(k+kt-N),\ u_з(k+kt-2N-1),\ u_з(k+kt-2N), \quad (10)$$

где $u_з$ – мгновенное значение напряжения на потенциальном электроде, В;

kt – коэффициент отсечки измеренных дискретных значений напряжения и тока на переходных процессах в схеме измерения сопротивления заземления опоры ВЛ.

Значение коэффициента отсечки измеренных дискретных значений напряжения и тока kt на переходных процессах в схеме измерения сопротивления заземления опоры ВЛ определяется соотношением:

$$kt = \frac{T_{пп}}{T_{зоп}}, \quad (11)$$

где $T_{пп}$ – длительность переходного процесса в схеме измерения сопротивления заземления опоры ВЛ, с;

$T_{зоп}$ – период квантования по времени измеряемых значений тока и напряжения, с.

В результате диапазон отсчетов последовательности, представляющей собой наборы отсчетов дискретных значений напряжений на потенциальном электроде, сократится с интервала 0...$2N$ на величину $2kt$ до интервала kt...$2N - kt$.

Аналогично последовательность (2), представляющая собой наборы отсчетов дискретных значений тока на токовом электроде, примет вид:

$$i_з(k-kt),\ i_з(k-kt-1),\ i_з(k-kt-2),\ i_з(k-kt-3),\ ...,\ i_з(k+kt-N),\ i_з(k+kt-2N-1),\ i_з(k+kt-2N), \quad (12)$$

где $i_з(k)$ – мгновенное значение тока заземления, А;

kt – коэффициент отсечки измеренных дискретных значений напряжения и тока на переходных процессах в схеме измерения сопротивления заземления опоры ВЛ.

В результате диапазон отсчетов последовательности, представляющей собой наборы отсчетов дискретных значений токов на токовом электроде, также сократится с интервала 0...$2N$ на величину $2kt$ до интервала kt...$2N - kt$. Длительность интервалов отсчетов последовательности дискретных значений напряжений на потенциальном электроде и отсчетов последовательности дискретных значений токов на токовом электроде одинакова и равна kt...$2N - kt$.

В результате в модуле дистанционного мониторинга заземления опор ВЛ формируются сокращенные на величину переходного процесса последовательности, представляющие собой наборы отсчетов дискретных значений напряжений на потенциальном электроде и токов заземления через заземлитель опоры ВЛ [8–9].

Аналогично на основании (5) определяется расчетное мгновенное значение сопротивления заземления и формируется последовательность расчетных мгновенных значений сопротивления вида:

$$r_{зт}(k-kt),\ r_{зт}(k-kt-1),\ r_{зт}(k-kt-2),\ r_{зт}(k-kt-3),\ ...,\ r_{зт}(k+kt-\mathrm{N}),\ r_{зт}(k+kt-2N+1),\ r_{зт}(k+kt-2N). \quad (13)$$

Последовательность дискретных значений сопротивлений заземления на интервале kt...$2N-kt$ примет вид:

$$r_з(k-kt),\ r_з(k-kt-1),\ r_з(k-kt-2),\ r_з(k-kt-3),\ ...,\ r_з(k+kt-N),\ r_з(k+kt-2N+1),\ r_з(k+kt-2N), \quad (14)$$

где $r_з$ – мгновенное значение сопротивления заземления, Ом.

В результате полученная последовательность представляет собой набор значений сопротивления заземления в дискретные моменты времени с отсечкой замеров сопротивлений на интервалах, соответствующих переходным процессам в измерительной цепи, обусловленных емкостными и индуктивными свойствами элементов схемы измерения.

Производится вычисление среднего значения сопротивления заземления опоры ВЛ на интервале измерений kt...$2N-kt$:

$$R_з = \frac{1}{2N-2kt}\sum_{k=kt}^{2N-kt} r_з(k), \quad (15)$$

где $R_з$ – сопротивление заземления опоры ВЛ, Ом.

Был разработан лабораторный образец модуля дистанционного мониторинга заземляющих устройств опор ВЛ, определены структура и принцип работы измерительных компонентов модуля и

элементы его конструкции. В ходе моделирования взаимодействия модуля с математической моделью цифрового двойника ВЛ эмулировались основные параметры мониторинга сопротивления заземляющих устройств опор ВЛ.

Моделирование взаимодействия лабораторного образца модуля дистанционного мониторинга заземляющих устройств опор ВЛ с математической моделью цифрового двойника проводилось в лабораторных условиях. Экспериментальная установка содержала непосредственно лабораторный образец модуля дистанционного мониторинга заземляющих устройств опор ВЛ и компьютер, на котором реализована математическая модель. Работа лабораторного образца модуля дистанционного мониторинга заземляющих устройств опор ВЛ проводилась в условиях эмуляции входных измеряемых параметров, используемых для определения сопротивления заземлителя опоры ВЛ. При моделировании взаимодействия модуля с математической моделью цифрового двойника ВЛ эмулировались следующие входные параметры:

– импульсы тока, подаваемого на заземлитель;

– величина тока, протекающего через заземлитель;

– величина напряжения на заземлителе.

При этом на экране компьютера с реализованной математической моделью фиксировались следующие параметры заземления:

– величина сопротивления заземления;

– относительное изменение сопротивления заземления в заданном интервале времени;

– динамика изменения сопротивления заземления в заданном интервале времени;

– отношение сопротивления заземления к заданному нормативно-допустимому значению в заданном интервале времени.

При моделировании использовали нормативно допустимое значение заземляющего устройства ВЛ, равное 30 Ом, и интервал между измерениями сопротивления заземления, равный 1 месяцу.

На рис. 1 показан лабораторный образец модуля дистанционного мониторинга заземляющих устройств ВЛ при проведении моделирования.

Пример результирующих параметров сопротивления заземления, отображаемых математической моделью лабораторного образца модуля дистанционного мониторинга заземляющих устройств, приведен на рис. 2.

Значения сопротивления заземления опоры ВЛ передаются от модуля дистанционного мониторинга заземления на сервер диспетчерского пункта электросетевой компании с периодом $T_{зд}$ передачи данных (время между соседними посылками от модуля дистанционного мониторинга заземления опор ВЛ на сервер диспетчерского пункта электросетевой компании при штатных параметрах мониторинга).

Разработанная математическая модель модуля дистанционного мониторинга заземляющих

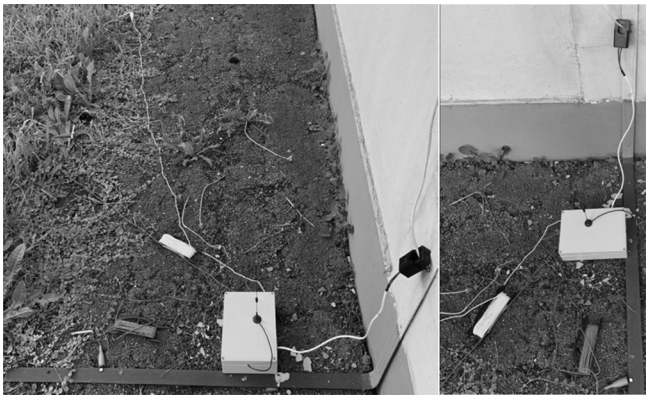

Рис. 1. Фото лабораторного образца модуля при проведении моделирования

Fig. 1. The lab-assembled module during the simulation process

Дата, дд.мм.гг	Сопротивление *Rз, Ом*	Коэфф. относительного изменения сопротивления *KRз*	Коэфф. динамики изменения сопротивления *DRз, Ом/мес*	Коэфф. отношения сопротивления к норм. доп. значению *Kзз*	Сообщение о превышении допустимого значения
01.01.21	23	1	0	0.77	
01.02.21	21	0.91	-2	0.70	
01.03.21	23	1.10	2	0.77	
01.04.21	25	1.09	2	0.83	
01.05.21	27	1.08	2	0.90	
01.06.21	31	1.15	4	1.03	ПРЕВЫШЕНИЕ!
Нормативно-допустимое значение сопротивления, Ом:				30	

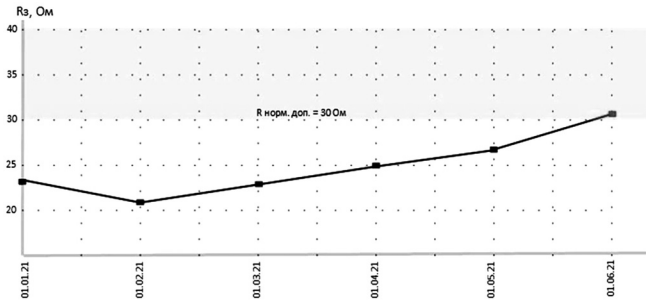

Рис. 2. Результирующие параметры сопротивления заземления, отображаемые математической моделью лабораторного образца модуля дистанционного мониторинга заземляющих устройств опор ВЛ

Fig. 2. Resulting parameters of ground resistance displayed by the mathematical model of the lab-assembled module for grounding device remote monitoring on overhead power line poles

устройств опор воздушных линий по каналу измерения величины сопротивления заземляющих устройств реализуется на модуле и на сервере диспетчерского пункта электросетевой компании. Значения сопротивления заземления опоры ВЛ с определенным периодом передаются от модуля дистанционного мониторинга заземления опор ВЛ на сервер диспетчерского пункта электросетевой компании. Практическая ценность разработанной модели состоит в использовании полученных уравнений при реализации системы дистанционного

мониторинга проводов ВЛ с использованием модулей дистанционной диагностики, монтируемых непосредственно на опорах ВЛ и передающих данные на сервер электросетевой компании. Полученные теоретические и практические результаты, как и сам модуль дистанционной диагностики проводов, находят применение в оперативных службах электросетевых компаний.

Литература

1. Колобов В. В., Баранник М. Б., Селиванов В. Н., Прокопчук П. И. Результаты полевых испытаний нового прибора для измерения сопротивления заземляющих устройств опор воздушных линий электропередачи импульсным методом / / Труды Кольского научного центра РАН. – 2017. – Т. 8. – № 1–14. – С. 12–30.
2. Колобов В. В., Баранник М. Б., Селиванов В. Н. Генератор импульсов с индуктивным накопителем энергии для измерения сопротивления заземляющих устройств опор воздушных линий электропередачи / / Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2018. – Т. 21. – № 4. – С. 596–606. https://doi.org/10.21443/1560-9278-2018-21-4-596-606.
3. Бородин М. В., Беликов Р. П., Шабанов И. В. Универсальный переключатель для измерений сопротивления заземляющего устройства опор ВЛ 110 КВ / / Промышленная энергетика. – 2021. – № 3. – С. 44–50. https://doi.org/10.34831/EP.2021.36.16.007.
4. Бессолицын А. В., Голговских А. В., Кутергина Н. А., Петров Н. В. Оценка возможности использования наводимой в грозозащитном тросе ЭДС для измерения сопротивления заземления опор воздушных линий / / Интеграция современных научных исследований в развитие общества. Материалы III Международной научно-практической конференции. – Кемерово, 2017. – С. 286–289.
5. Колобов В. В., Баранник М. Б., Селиванов В. Н., Ефимов Б. В. Измерения сопротивления опор воздушных линий электропередачи с грозотросом импульсным методом / / Энергетик. – 2017. – № 11. – С. 19–24.
6. Колиушко Д. Г., Руденко С. С., Пличко А. В., Щербинин В. И. Модернизация комплекса типа ИК-1У для измерения сопротивления заземляющего устройства молниеотводов и опор ЛЭП / / Электротехника и электромеханика. – 2019. – № 3. – С. 55–58. https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.3.09.
7. Ирха Д. А., Кучеренко Д. Е. Заземляющие устройства для опор воздушных линий электропередачи в сельской местности / / Актуальные проблемы энергетики АПК. Материалы V Международной научно-практической конференции. – Саратов, 2014. – С. 132–136.
8. Акуличев В. О., Непомнящий В. Ю., Дудин А. Д., Висич С. Г., Степанов В. М., Панарин М. В., Маслова А. А. Математическая модель измерения тока в системе дистанционной диагностики проводов ВЛ / / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 12. – С. 405–410.
9. 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.

Для цитирования:

Акуличев В. О., Захаров С. Ю., Родионов И. А., Висич С. Г., Панарин М. В., Маслова А. А. Математическая модель дистанционного мониторинга заземляющих устройств опор воздушных линий по каналу измерения величины сопротивления заземляющих устройств / / Энергобезопасность и энергосбережение. – 2021. – № 5. – С. 37–42. https://doi.org/10.18635/2071-2219-2021-5-37-42.

Cite this paper:

Akulichev, V. O., Zakharov, S. Yu., Rodionov, I. A., Visich, S. G., Panarin, M. V., Maslova, A. A. (2021). Mathematical model of remote monitoring for grounding devices on overhead power line poles by measuring grounding device resistance. *Energy Safety and Energy Economy*, 5, 37–42 (in Russian). https://doi.org/10.18635/2071-2219-2021-5-37-42.

Mathematical model of remote monitoring for grounding devices on overhead power line poles by measuring grounding device resistance

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

S. Yu. Zakharov,
Interregional Distribution Grid Company of Center and Volga Region, Tulenergo, Russia, acting first deputy director, head engineer

I. A. Rodionov,
Interregional Distribution Grid Company of Center and Volga Region, Tulenergo, Russia, deputy chief engineer for production asset management

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

We report that we have built a mathematical model of a remote monitoring module for the purpose of control grounding devices located on overhead power line poles. The invention is based on measuring grounding device resistance. Resistance measurements conducted by the said monitoring module go directly to a power company's control room. All measurements are being conducted and transferred to a control room with a specific frequency.

Keywords: *remote diagnostics, overhead power line, resistance, grounding device, control room.*

References

1. Kolobov, V. V., Barannik, M. B., Selivanov, V. N., Prokopchuk, P. I. (2017). Rezultaty polevykh ispytaniy novogo pribora dlya izmerenia soprotivlenia zazemliayuschikh ustroistv opor vozdushnykh liniy elektroperedachi impulsnym metodom [A pulse generator with inductive energy storage for measuring the grounding resistance of transmission line towers]. *Proceedings of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences,* 8(1–14), 12–30.

2. Kolobov, V. V., Barannik, M. B., Selivanov, V. N. (2018). Generator impulsov s induktivnym nakopitelem energii dlia izmerenia soprotivlenia zazemliayuschikh ustroistv opor vozdushnykh liniy elektroperedachi [A pulse generator with inductive energy storage for measuring the grounding resistance of transmission line towers]. *Proceedings of the Murmansk State Technical University,* 21(4), 596–606. https://doi.org/10.21443/1560-9278-2018-21-4-596-606.

3. Borodin, M. V., Belikov, R. P., Shabanov, I. V. (2021). Universalny pereklyuchatel dlia izmereniy soprotivlenia zazemliayuschego ustroistva opor VL 110 KV [All-purpose switch for measuring earthing resistance of 110 kV overhead poles]. *Promyshlennaya Energetika*, 3, 44–50. https://doi.org/10.34831/EP.2021.36.16.007.

4. Bessolitsyn, A. V., Golgovskikh, A. V., Kutergina, N. A., Petrov, N. V. (2017). Otsenka vozmozhnosti ispolzovania navodimoi v grozozaschitnom trose EDS dlia izmerenia soprotivlenia zazemlenia opor vozdushnykh liniy [Evaluation of possible use of EMF induced in a lightning protection conductor to measure grounding resistance of overhead line poles]. *Integratsia sovremennykh nauchnykh issledovaniy v razvitie obschestva, Proc. of the 3rd International Scientific and Practical Conference,* Kemerovo, Russia.

5. Kolobov, V. V., Barannik, M. B., Selivanov, V. N., Efimov, B. V. (2017). Izmerenia soprotivlenia opor vozdushnykh liniy elektroperedachi s grozotrosom impulsnym metodom [Ground resistance measurements on transmission towers with overhead ground wires by the impulse method]. Energetik, 11, 19–24.

6. Koliushko, D. G., Rudenko, S. S., Plichko, A. V., Scherbinin, V. I. (2019). Modernizatsia kompleksa tipa IK-1U dlia izmerenia soprotivlenia zazemliayuschego ustroistva molnieotvodov i opor LEP [Modernization of the complex type ik-1u for measuring the impedance of the grounding device of a lightning arrester and supports of transmission lines]. *Elektrotekhnika i Elektromekhanika,* 3, 55–58. https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.3.09.

7. Irha, D. A., Kucherenko, D. E. (2014). Zazemliayuschie ustroistva dlia opor vozdushnykh liniy elektroperedachi v selskoi mestnosti [Earthing devices for overhead power line poles in rural areas]. *Aktualnye problemy energetiki APK, Proc. of the 5th International Scientific and Practical Conference,* Saratov, Russia.

8. Akulichev, V. O., Nepomniaschi, V. Yu., Dudin, A. D., Visich, S. G., Stepanov, V. M., Panarin, M. V., Maslova, A. A. (2020). Matematicheskaya model izmerenia toka v sisteme distantsionnoi diagnostiki provodov VL [Mathematical model for measuring current in the system of remote diagnostics of overline wires]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie Nauki, 12,* 405–410.

9. 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. https://doi.org/10.18635/2071-2219-2021-2-41-45.