

УДК 621.315.1, 621.372.2

*Р.Г. Минуллин, В.А. Касимов, Т.К. Филимонова, М.Р. Яруллин*

**ЛОКАЦИОННОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ГОЛОЛЕДА  
НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ.  
ЧАСТЬ 2. ПРЕДЕЛЬНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И ВЫБОР УСТАВОК**

*R.G. Minullin, V.A. Kasimov, T.K. Filimonova, M.R. Yarullin*

**LOCATION DETECTION OF GLAZE ICE  
ON OVERHEAD ELECTRIC POWER LINES.  
PART 2. NOISE-LIMITED SENSITIVITY  
AND OPERATION THRESHOLD SETTING  
IN DETECTING ICE ACCRETION BY LOCATION PROBING**

Исследованы стабильность амплитуды и запаздывания отраженных сигналов в штатных условиях при отсутствии гололеда и предельная чувствительность локационного метода обнаружения гололеда. В результате многолетних измерений на действующих линиях электропередачи (ЛЭП) обнаружены суточно-годовые вариации амплитуды и запаздывания отраженных сигналов. Показано, что эти вариации в совокупности со случайными флуктуациями в штатном режиме намного меньше изменений амплитуды и запаздывания сигналов при раннем появлении гололедных отложений. Даны рекомендации о выборе значений уставок (порогов срабатывания) по амплитуде и запаздыванию при обнаружении гололеда и повреждений на ЛЭП локационным методом.

ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ; ЛОКАЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ; АМПЛИТУДА И ЗАПАЗДЫВАНИЕ ОТРАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ; ОБНАРУЖЕНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ И ГОЛОЛЕДА НА ПРОВОДАХ; ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ЛОКАЦИОННОГО МЕТОДА; ВЫБОР ПОРОГА СРАБАТЫВАНИЯ (УСТАВКИ) ПО АМПЛИТУДЕ И ЗАПАЗДЫВАНИЮ.

The authors study the threshold sensitivity of detecting ice accretion by location probing and stability of amplitude and transmission delay of reflected signals in the normal operation mode in the absence of ice. Due to long-term investigations of the active power lines annual and daily variations were discovered in amplitude and transmission delay of reflected signals. It was shown that these variations as well as sporadic fluctuations in the normal operation mode are far less than the changes in signal amplitude and transmission delay at the early stage of ice accumulation. Guidelines to set operation threshold for detecting early ice accretion on electric power lines and wire breakage by amplitude and transmission delay are given.

ELECTRIC POWER LINES; LOCATION MONITORING; AMPLITUDE AND TRANSMISSION DELAY OF REFLECTED SIGNALS; DETECTING ICE ACCRETION AND WIRE BREAKAGE; LOCATION METHOD SENSITIVITY; SETTING OPERATION THRESHOLD FOR AMPLITUDE AND TRANSMISSION DELAY.

В первой части статьи описаны используемые в настоящее время способы обнаружения гололеда на проводах воздушных линий электропередачи, отмечены их достоинства и недостатки [1]. Среди них подробно рассмотрен локационный ме-

тод, как наиболее прогрессивный по своим возможностям [2]. В данной части статьи приводятся результаты многолетних экспериментальных исследований на действующих линиях электропередачи локационным методом флуктуаций амплитуды и запаз-

дывания отраженных сигналов в штатных условиях при отсутствии гололедных образований на проводах. Эти флуктуации определяют предельную чувствительность локационного метода при зондировании линий электропередачи с целью раннего обнаружения появления гололедных отложений на проводах. С учетом предела этих флюктуаций для каждой линии электропередачи определяются уставки (пороги срабатывания аппаратуры) для обнаружения и последующего отслеживания динамики образования появившихся гололедных отложений.

Показателем текущего состояния проводов ЛЭП является рефлектограмма – реакция линии во времени на зондирующий локационный импульс [3, 4]. При анализе рефлектограммы исследуются по отношению к эталонному сигналу изменения амплитуды  $U$  и запаздывания  $\Delta\tau$  отраженного импульсного сигнала (рис. 1), по которым определяются величина гололедных отложений на проводах линий электропередачи, а также их повреждения (обрыв, короткое замыкание) [3–6].

В статье описываются результаты исследований предельной чувствительности метода локационного зондирования и стабильности каналов высокочастотной (ВЧ) связи линий электропередачи путем анализа изменений амплитуды  $U$  и запаздывания  $\Delta\tau$  отраженных локационных импульсов во времени в штатных условиях при отсутствии гололеда на проводах и при отсутствии сигналов аппаратуры релейной защиты, противоаварийной автоматики,

телемеханики и связи в ВЧ тракте. Необходимо установить следующее: не окажутся ли из-за нестабильности рефлектограмм величины случайных вариаций  $U$  и  $\Delta\tau$  больше изменений этих параметров при появлении гололедных отложений на проводах ЛЭП и не будут ли они мешать обнаружению начала образования гололедной муфты и слежению за последующей динамикой ее увеличения.

Кроме того, флуктуации значений амплитуды  $\Delta U$  и запаздывания  $\Delta\tau$  импульсных сигналов, происходящие в штатных условиях, необходимо учитывать при выборе уставок (порога) для своевременного обнаружения гололеда и повреждений на проводах линий электропередачи.

Результаты исследований лежат в основе технологии локационного обнаружения раннего гололеда и повреждений на проводах ЛЭП.

Исследования особенностей применения локационного зондирования для обнаружения гололедных образований и повреждений на проводах воздушных ЛЭП ведутся сотрудниками Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ) более 15 лет и не имеют аналогов в мировой практике. С помощью изготовленного сотрудниками КГЭУ исследовательского локационного комплекса в течение четырех лет с 2009 по 2014 гг. осуществляется непрерывный мониторинг линий 110 кВ «Кутлу Букаш–Рыбная Слобода–Камская» и «Бугульма №14–Бугульма 500», а также линий 110 кВ «Кутлу Букаш–Кулуши», «Кутлу Букаш–Нырты», «Кутлу Букаш–

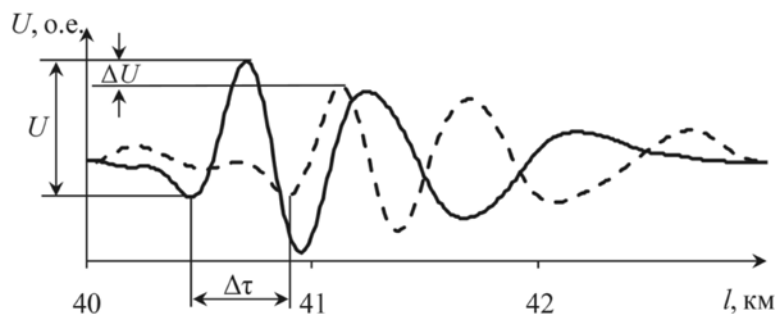


Рис. 1. Отсчеты уменьшения  $\Delta U$  амплитуды и увеличения запаздывания  $\Delta\tau$  отраженного локационного сигнала (-----) по отношению к эталонному сигналу (—)

Богатые Сабы» (ОАО «Сетевая компания») и др. [3–8].

Рефлектограммы регистрируются в круглосуточном режиме через 30 мин, при этом отсчитываются величины изменений амплитуды  $\Delta U$  и дополнительного запаздывания  $\Delta t$  отраженных сигналов локационного зондирования. За время наблюдений было снято свыше 50 000 рефлектограмм при различных временных и погодных условиях.

Гололедные отложения при локационном зондировании ЛЭП обнаруживаются по дополнительному уменьшению амплитуды  $\Delta U$  и дополнительному увеличению времени прихода  $\Delta t$  (запаздыванию) отраженного импульсного сигнала по отношению к эталонному, как это показано на рис. 1.

$\Delta U$  и  $\Delta t$  – это критерии обнаружения образования гололедных отложений. Уменьшение амплитуды импульса  $\Delta U$  обусловлено потерями энергии импульса в несовершенном диэлектрике, каковым является образовавшееся гололедное покрытие. Запаздывание  $\Delta t$  импульса возникает из-за увеличения времени прохождения сигнала в контролируемой ЛЭП за счет уменьшения скорости его распространения при появлении гололедного образования. Изменения амплитуды  $\Delta U$  и времени распространения  $\Delta t$  импульсного сигнала определяются путем сравнения текущей рефлектограммы линии с ее эталонным аналогом, который хранится в памяти компьютера (см. рис. 1) [5–8].

В штатной ситуации при отсутствии го-

лоледа на проводах ЛЭП нестабильности  $U$  и  $\Delta t$  зависят от механического удлинения проводов ЛЭП под влиянием увеличения температуры окружающей среды, солнечного нагрева, существующей нагрузки ЛЭП, порывов ветра. На нестабильность параметров  $U$  и  $\Delta t$  влияют погодные условия в виде тумана, мороси, дождя и снега. Кроме того, флуктуации отсчетов значений  $U$  и  $\Delta t$  возникают под влиянием шумов и помех, постоянно присутствующих в ВЧ канале ЛЭП [9].

В настоящее время нет расчетных методик, учитывающих временные изменения значений  $U$  и  $\Delta t$  для отраженных локационных импульсов, распространяющихся в ВЧ тракте ЛЭП. Поэтому нестабильность этих параметров определим экспериментально.

На рис. 2 показаны суточные вариации параметров отраженных импульсных сигналов, измеренные в штатном режиме через 30 мин в течение трех суток с 21 по 23 июля 2011 г. на линии «Кутлу Букаш–Богатые Сабы»: *a* – амплитуды  $U$  в относительных единицах (о. е.); *b* – запаздывания  $\Delta t$  в мкс.

На приведенных графиках хорошо видны периодические суточные изменения (тренд) текущих значений  $U(t)$  и  $\Delta t(t)$ : в полдень значения  $U$  минимальны, а  $\Delta t$  – максимальны, в полночь – наоборот. Эти полуденные уменьшения  $U$  обусловлены, видимо, увеличением сопротивления проводов, а увеличения  $\Delta t$  – удлинением проводов при увеличении температуры окружающей среды, что имеет место в полдень. На линии «Кутлу Букаш–Богатые

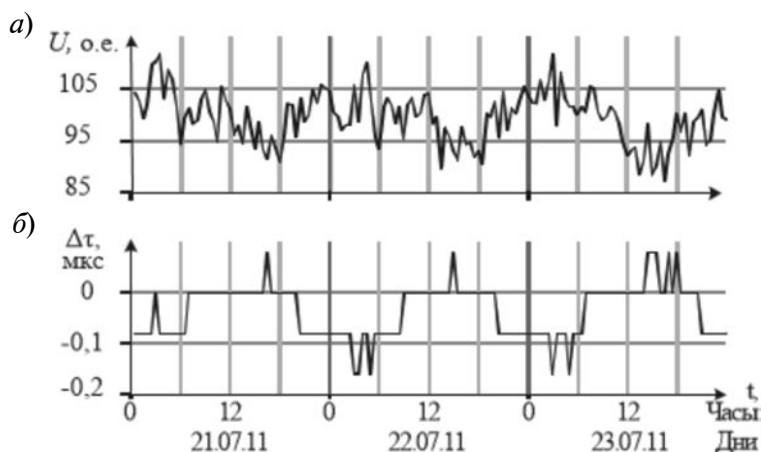


Рис. 2. Суточные изменения амплитуды  $U(t)$  (а) и запаздывания  $\Delta t(t)$  (б) отраженных сигналов

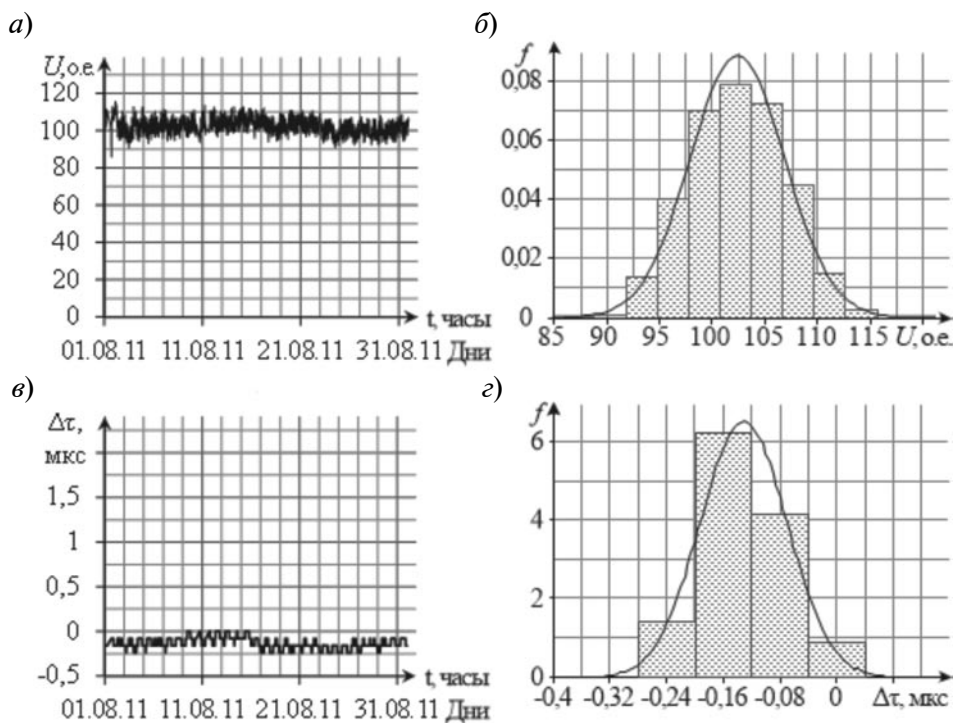


Рис. 3. Текущие значения амплитуд  $U(t)$  (а) и запаздываний  $\Delta\tau(t)$  (в) отраженных сигналов и соответствующие им гистограммы распределений плотностей вероятностей  $f_3(U)$  (б) и  $f_3(\Delta\tau)$  (г)

Сабы» максимальный разброс суточных изменений  $U$  от штатного состояния составил примерно  $\pm 10\%$ , а  $\Delta\tau$  изменялось в пределах  $\pm 0,08$  мкс (шаг квантования).

На суточный тренд  $U(t)$  и  $\Delta\tau(t)$  накладываются хаотические флуктуации этих значений, которые, видимо, обусловлены шумами и помехами, постоянно присутствующими в ВЧ тракте ЛЭП. Поэтому случайные флуктуации  $U(t)$  и  $\Delta\tau(t)$  отраженных сигналов, вероятно, подчиняются, подобно белому шуму, закону Гаусса или близки к этому.

Для проверки этого положения исследовались месячные массивы текущих значений  $U$  и  $\Delta\tau$ , измеренных через полчаса за три года наблюдений с 2010 по 2012 гг. на четырех упомянутых выше линиях подстанции «Кутлу Букаш». В качестве примера графики таких сигналов  $U(t)$  и  $\Delta\tau(t)$  за август 2011 г. для линии 110 кВ «Кутлу Букаш–Рыбная Слобода» показаны на рис. 3 а и в соответственно.

Месячные массивы текущих значений  $U$  и  $\Delta\tau$  представлены в виде дифференциаль-

ных распределений  $P(U)$  и  $P(\Delta\tau)$ . Примеры экспериментальных распределений плотностей вероятностей  $f_3(U)$  и  $f_3(\Delta\tau)$  в виде гистограмм за август 2011 г. для линии «Кутлу Букаш–Рыбная Слобода» приведены на рис. 3 б и г соответственно, где сплошной линией нанесены Гауссовские распределения плотностей вероятностей  $f_p(U)$  и  $f_p(\Delta\tau)$ , рассчитанные с использованием математического ожидания  $U_{cp}$  и  $\Delta\tau_{cp}$ , а также среднеквадратических значений  $\sigma_U$  и  $\sigma_{\Delta\tau}$  соответствующих гистограмм.

Эмпирические распределения  $P(U)$  и  $P(\Delta\tau)$  были подвергнуты детальной статистической обработке с использованием пакета STATISTICA [10] для установления вида закона распределения. Для месячных распределений  $P(U)$  и  $P(\Delta\tau)$  были подсчитаны средние значения  $U_{cp}$  и  $\Delta\tau_{cp}$ , среднеквадратические значения  $\sigma_U$  и  $\sigma_{\Delta\tau}$ , коэффициенты асимметрии  $A_U$  и  $A_{\Delta\tau}$ , коэффициенты эксцесса  $E_U$  и  $E_{\Delta\tau}$ , а также  $\sigma_A$ ,  $\sigma_E$  и отношения  $\frac{|A|}{\sigma_A}$ . Если  $A < 0,5$  и  $\frac{|A|}{\sigma_A} < 3$ , то можно считать,

что распределение соответствует Гауссовскому закону.

Выполненная оценка показателей  $A$  и  $E$  для эмпирических распределений  $P(U)$  и  $P(\Delta\tau)$  с использованием пакета STATISTICA [10] и статистическая проверка  $P(U)$  и  $P(\Delta\tau)$  с помощью критериев согласия Пирсона ( $\chi^2$ ) и Колмогорова–Смирнова [11] всего массива данных, полученных на четырех линиях подстанции «Кутлу Букаш», позволяют сделать вывод, что 80 % распределений  $P(U)$  и  $P(\Delta\tau)$  соответствуют закону Гаусса, а остальная часть близка к нему. Поэтому с большой степенью достоверности можно считать, что 99,7 % флуктуаций значений  $U$  и  $\Delta\tau$  в штатных условиях при отсутствии гололедных отложений на проводах ЛЭП находятся в пределах доверительных интервалов, соответствующих уровню  $\pm 3\sigma$  относительно среднего значения.

Конечные результаты исследования распределений  $P(U)$  и  $P(\Delta\tau)$  сведены в таблицу, где представлены средние и среднеквадратические значения для амплитуд и запаздываний отраженных сигналов, усредненные за интервал наблюдений на четырех линиях подстанции «Кутлу Букаш».

Согласно анализу экспериментальных данных значения  $U$  и  $\Delta\tau$  в штатных условиях при отсутствии гололеда имеют достаточно высокую стабильность: флуктуации амплитуды  $U$  находятся в пределах примерно  $\pm 10\%$  от среднего значения при вероятности 0,997, флуктуации  $\Delta\tau$  в среднем не превышают примерно  $\pm 0,2$  мкс ( $\pm 30$  м) также при вероятности 0,997.

Кроме того, локационный метод измерений  $\Delta\tau$  обладает высокой чувствительностью, т. к. измерения осуществляются с погрешностью, не превышающей  $\pm 0,08$  мкс, (интервал квантования АЦП равен 0,08 мкс), что соответствует при локационном зондировании изменению длины линии на  $\pm 12$  м ( $\pm 0,03\%$ ), это в несколько раз меньше длины пролета ЛЭП.

Значения  $U_{cp}$  и  $\Delta\tau_{cp}$ , а также  $\sigma_U$  и  $\sigma_{\Delta\tau}$  для разных воздушных линий близки друг к другу, как это видно из таблицы, и мало зависят от года измерений. Эти значения можно брать как стабильные исходные параметры отраженных сигналов локационного зондирования ВЧ трактов ЛЭП при определении уставок по амплитуде и запаздыванию для обнаружения гололедных отложений на проводах ЛЭП.

При появлении гололедных отложений текущие значения  $U$  уменьшаются на десятки процентов, а  $\Delta\tau$  увеличиваются во много раз и надежно обнаруживаются на фоне случайных флуктуаций данных параметров.

Изменения значений  $U$  и  $\Delta\tau$  отраженных сигналов в течение суток имеют периодический характер, как это видно на рис. 2. Если эти изменения  $U$  и  $\Delta\tau$  обусловлены удлинением проводов при повышении температуры окружающей среды в полдень, то следует ожидать, что они будут иметь и периодические годовые вариации в сумме с вариациями, которые будут обусловлены периодическими ветровыми нагрузками.

**Параметры амплитуд и запаздываний отраженных сигналов с усреднением за указанные в таблице периоды измерений для воздушных линий разной длины**

Воздушная линия	Длина линии, м	Период измерений	$U_{cp}$ , о.е.	$\pm 3\sigma_U$ , о.е.	$\Delta\tau_{cp}$ , мкс	$\pm 3\sigma_{\Delta\tau}$ , мкс
Кутлу Букаш–Кулуши	16 000	07–10. 2011	96,5	12,6	–0,04	0,15
Кутлу Букаш–Нырты	37 800	07–10. 2011	102,8	8,1	–0,09	0,12
Кутлу Букаш–Рыбная Слобода	40 000	02–12. 2010	100,5	10,8	0,19	0,21
		01–12. 2011	104,4	13,8	0,04	0,18
		01–11. 2012	101,5	12,3	0,02	0,24
Кутлу Букаш–Богатые Сабы	45 700	07–10. 2011	109,5	14,1	–0,09	0,18
Усредненное значение			102,5	11,9	–0,01	018

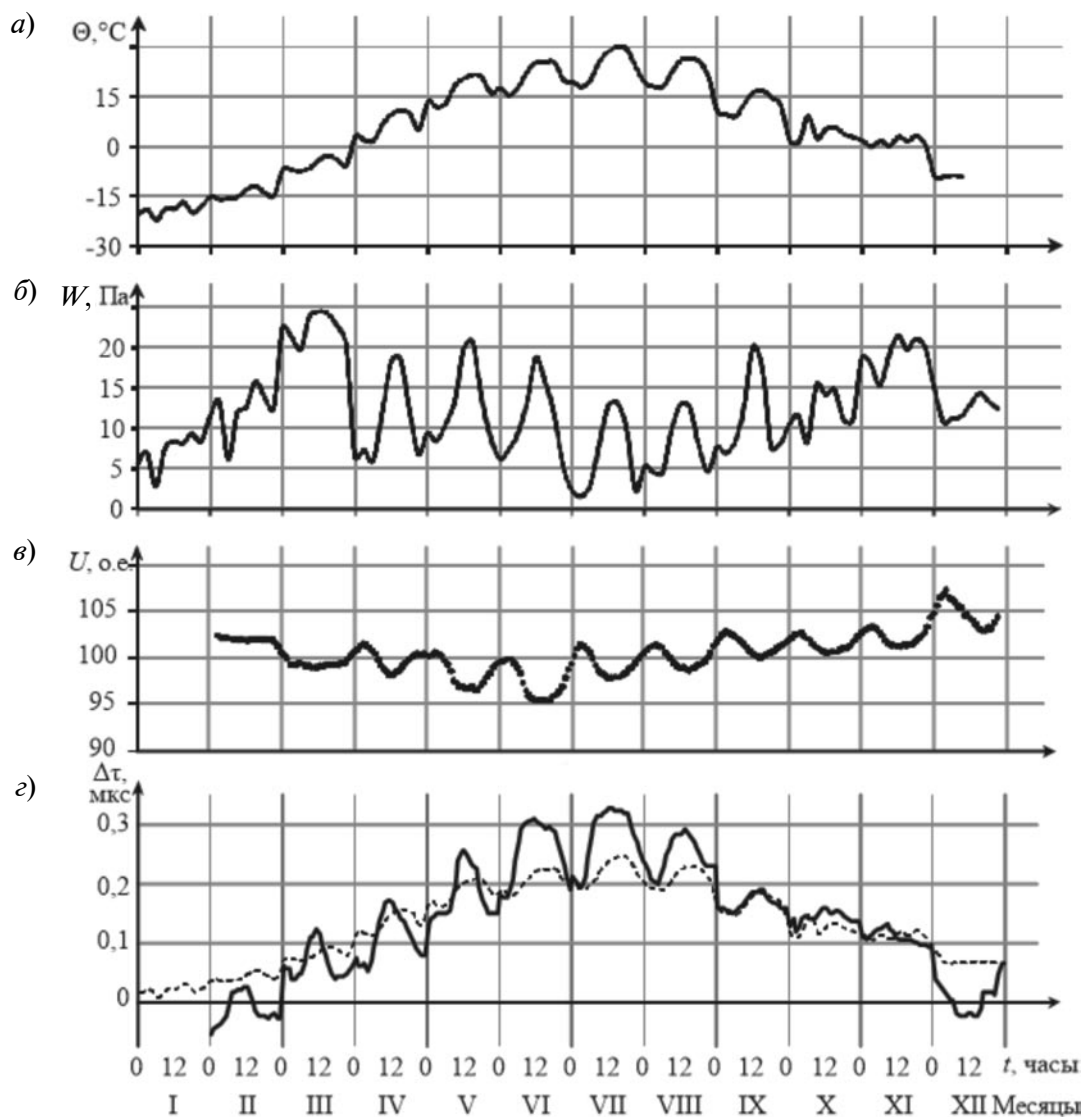


Рис. 4. Суточно-годовые вариации усредненных за месяц часовых значений температуры  $\theta$  окружающей среды (а), ветрового давления  $W$  (б), измеренных амплитуд  $U$  (в), измеренных (—) и расчетных (•••••) запаздываний  $\Delta\tau$  (г) отраженных сигналов

На рис. 4 в качестве примера показаны измеренные в 2010 г. суточно-годовые вариации усредненных за месяц часовых значений температуры  $\theta(t)$  окружающей среды (а) и ветрового давления  $W(t)$  (б) в районе подстанции «Кутлу Букаш», а также суточно-годовые вариации усредненных за месяц часовых значений амплитуд  $U(t)$  (в) и запаздываний  $\Delta\tau(t)$  (г – сплошная линия) сигналов, измеренных на линии 110 кВ «Кутлу Букаш–Рыбная Слобода». Ко всем графикам рис. 4 применено скользящее усреднение по шести часовым значениям.

Как видно на рис. 4 в, суточные вариации  $\theta(t)$  и  $W(t)$ , а также  $U(t)$  и  $\Delta\tau(t)$  наиболее ярко выражены в летнее время.

На рис. 4 в явно проявляется годовой тренд значений  $U(t)$ : в полдень и летом амплитуды из-за увеличения затухания сигналов минимальны, а в полночь – максимальны, разность между ними составляет 2–5 % от штатного значения амплитуды. Изменения в течение суток усредненных за месяц часовых значений амплитуд хотя и незначительны, но явно обнаруживаются на всех месячных графиках  $U(t)$ : летом они

достигают 7 о.е.; зимой – 4 о.е.; годовые изменения составляют 8 о.е., при этом  $U_{cp}$  примерно равно 100 о.е.

Согласно рис 4  $z$  измеренные значения запаздывания  $\Delta t$  (сплошная линия) в полдень и летом, видимо, из-за удлинения проводов увеличиваются, а в полночь и зимой уменьшаются, при этом хорошо просматривается годовой тренд этих значений. Изменения в течение суток усредненных за месяц часовых значений запаздываний  $\Delta t$  на линии «Кутлу Букаш–Рыбная Слобода» летом достигают 0,12 мкс, зимой – 0,05 мкс; годовые изменения составляют 0,35 мкс.

Для линии «Кутлу Букаш–Рыбная Слобода» были рассчитаны суточно-годовые вариации часовых значений запаздывания  $\Delta t(t)$  по методу допустимых напряжений (объемные нагрузки расчетные, а не нормативные) [12]. Результаты расчета  $\Delta t(t)$  с учетом изменения температуры  $\theta$  и ветрового давления  $W$  по данным рис. 4  $a$  и  $b$  представлены на рис. 4  $z$  (пунктирная линия). Коэффициент взаимной корреляции между расчетными и измеренными значениями  $\Delta t(t)$  равен 0,8; некоторое расхождение между ними можно объяснить тем, что при расчете не учтены удлинения проводов под влиянием нагрузочного тока.

Максимальное удлинение проводов в течение года на линии «Кутлу Букаш–Рыбная Слобода» длиной 40 000 м в спокойных условиях равно 53 м (0,35 мкс), при учете максимально возможного ветрового давления в 300 Па удлинение увеличивается до 56 м (0,37 мкс), т. е. на 0,14 %. Такие изменения длины проводов под влиянием ветрового давления при выборе уставки по  $\Delta t$  не существенны и в реальной ситуации их можно не учитывать.

Анализ пределов флуктуаций амплитуд  $U(t)$  и запаздываний  $\Delta t(t)$  отраженных сигналов в штатных условиях при отсутствии гололеда выполнен на линии «Кутлу Букаш–Рыбная Слобода» с использованием массива измерений за 2010–2012 гг., а также на линиях «Кутлу Букаш–Кулуши», «Кутлу Букаш–Нырты» и «Кутлу Букаш–Богатые Сабы» за 2011 г.

В качестве примера на рис. 5 показаны для линии «Кутлу Букаш–Рыбная Слобода»

да» за 2010 г. графики годовых изменений среднемесячных значений  $U$  ( $a$ ) и  $\Delta t$  ( $b$ ) с доверительными интервалами  $\pm 3\sigma$ , а также годовых изменений сглаженных часовых с усреднением за месяц значений температуры окружающей среды. Как и ранее, на рис. 5  $a$  обнаруживается обратная связь между годовыми изменениями значений  $U$  и  $\theta$  ( $r = -0,7$ ) и прямая связь между годовыми изменениями значений  $\Delta t$  и  $\theta$  ( $r = 0,8$ ).

Такие же взаимосвязи между  $U$  и  $\theta$ , а также  $\Delta t$  и  $\theta$  были обнаружены на линии «Кутлу Букаш–Рыбная Слобода» в 2011–2012 гг., а также на линиях «Кутлу Букаш–Кулуши», «Кутлу Букаш–Нырты» и «Кутлу Букаш–Богатые Сабы» в 2011 г.

В результате анализа всего массива измерений  $U$  за трехгодичный цикл установлено, что существуют устойчивые годовые уменьшения среднемесячных значений

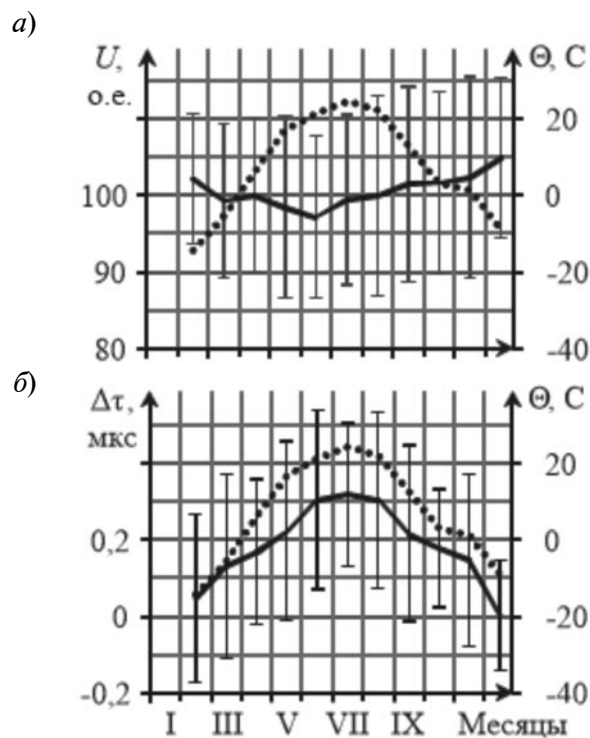


Рис. 5. Графики изменений в 2010 г. среднемесячных значений амплитуд  $U$  ( $a$ ) и запаздываний  $\Delta t$  ( $b$ ) отраженных сигналов (—) с доверительными интервалами  $\pm 3\sigma$  (вертикальные линии) для линии «Кутлу Букаш–Рыбная Слобода» и среднечасовых с усреднением за месяц значений температуры  $\theta$  (-----) окружающей среды

амплитуд  $U$  сигнала, достигающих 10 % от величины амплитуды штатного сигнала в зимнее время. Кроме того, имеют место случайные флуктуации текущих значений амплитуд  $U$  в доверительных границах  $\pm 15$  % относительно среднемесячного значения с вероятностью 0,997. При этом погрешность измерения амплитуды отраженных сигналов не превышала  $\pm 1$  %.

Также установлено, что при измерениях запаздывания  $\Delta t$  для линий длиной около 40 000 м годовой тренд среднемесячных значений не превышает 0,3 мкс, суточные случайные вариации  $\Delta t$  находятся в пределах  $\pm 0,25$  мкс с вероятностью 0,997. При этом погрешность измерения запаздывания  $\Delta t$  отраженных импульсов определяется дискретностью отсчетов АЦП, которая равна 0,08 мкс. Можно утверждать, что среди причин, определяющих запаздывание  $\Delta t$  отраженных импульсных сигналов, температурные влияния являются превалирующими.

При выборе уставок по амплитуде  $U$  и запаздыванию  $\Delta t$  для раннего обнаружения гололеда с целью реализации потенциально высокой чувствительности и большой стабильности локационного метода можно учитывать суточно-годовые изменения этих параметров в виде устойчивых вариаций и в виде случайных отклонений.

Проведены исследования зависимости величины запаздываний  $\Delta t$  от длины воздушных линий. С использованием [12, 13] рассчитаны в зависимости от температуры

окружающей среды среднесуточные часовые значения  $\Delta t$  за каждый месяц 2010 г. для четырех контролируемых линий «Кутлу Букаш–Кулуши», «Кутлу Букаш–Нырты», «Кутлу Букаш–Рыбная Слобода» и «Кутлу Букаш–Богатые Сабы» с последующим скользящим усреднением по 9 значениям (рис. 6). Таким образом, удалось выделить годовой тренд значений  $\Delta t$ , исключив их суточные вариации. Наименьшие годовые отклонения  $\Delta t$  в штатных условиях без гололеда (0,08 мкс) имеют место на короткой линии «Кутлу Букаш–Кулуши» (16 000 м) и наибольшие (0,22 мкс) – на длинной линии «Кутлу Букаш–Богатые Сабы» (45 700 м). Эти особенности необходимо учитывать при определении уставок локационного зондирования.

Для выявления статистической зависимости изменений амплитуды  $U$  от изменения температуры  $\theta$  окружающей среды (за счет увеличения длины проводов и повышения их сопротивления из-за нагрева) найдена корреляционная зависимость  $U = f(\theta)$  для линии «Кутлу Букаш–Рыбная Слобода» за 2010–2012 гг. с использованием 42 000 измерений в виде  $U = 99,8 - 0,09 \theta$ .

Наблюдается слабая связь между изменениями текущей амплитуды отраженного импульса и температурой окружающей среды (коэффициент взаимной корреляции меньше 0,5), т. к. эта связь маскируется влиянием других причин, рассмотренных выше. Полученную зависимость можно использовать для уточнения величины устав-

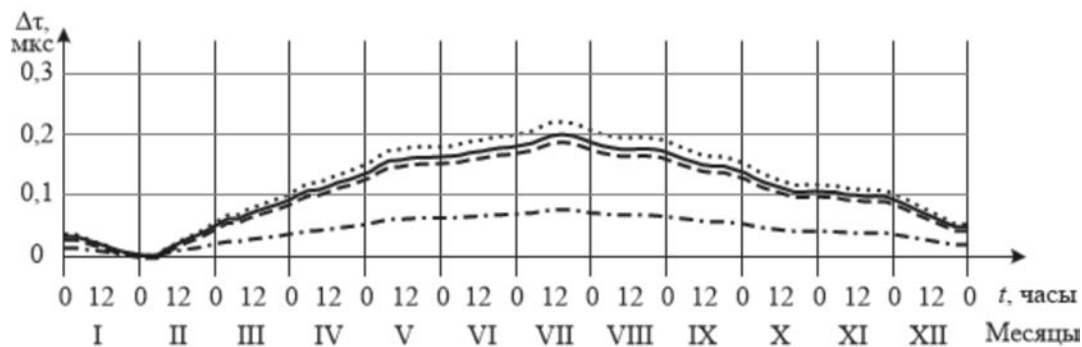


Рис. 6. Расчетные суточно-годовые изменения сглаженных (в интервале 9 ч) усредненных за месяц часовых значений запаздывания  $\Delta t$  отраженных сигналов на линиях «Кутлу Букаш–Кулуши» (---), «Кутлу Букаш–Нырты» (-·-·-), «Кутлу Букаш–Рыбная Слобода» (—), «Кутлу Букаш–Богатые Сабы» (· · · · ·) в течение 2010 г.



ки по амплитуде с целью обнаружения гололедных отложений.

Для подтверждения температурной зависимости запаздываний  $\Delta t$  исследованы корреляционные взаимосвязи текущих полчасовых значений  $\Delta t$  и соответствующих значений температуры  $\theta$  окружающего воздуха на линиях «Кутлу Букаш–Рыбная Слобода», «Кутлу Букаш–Нырты» и «Кутлу Букаш–Богатые Сабы». Для данных линий получены коэффициенты взаимной корреляции  $r$  в пределах 0,69–0,91.

На рис. 7 в качестве примера представлена корреляционная зависимость измеренных среднесуточных значений  $\Delta t$  от изменения среднесуточной температуры  $\theta$  окружающей среды на линии «Кутлу Букаш–Рыбная Слобода» за период с февраля по декабрь 2010 г. При этом использовано 11 000 измерений текущих значений  $\Delta t$ . Уравнение регрессии (аппроксимирующая зависимость) имеет вид  $\Delta t = 0,103 + 0,005 \theta$ , при коэффициенте корреляции  $r = 0,85$ .

Найденные значения коэффициентов взаимной корреляции между  $\Delta t$  и  $\theta$  близки к единице, поэтому они подтверждают высокую статистическую взаимосвязь этих параметров. Проверка коэффициентов  $r$  по  $t$ -критерию Стьюдента показала, что с доверительной вероятностью  $P = 0,99$  они значимы для анализируемых воздушных линий, поэтому зависимость между изменениями запаздывания  $\Delta t$  и изменениями суточной температуры  $\theta$  является существенной. Проверка

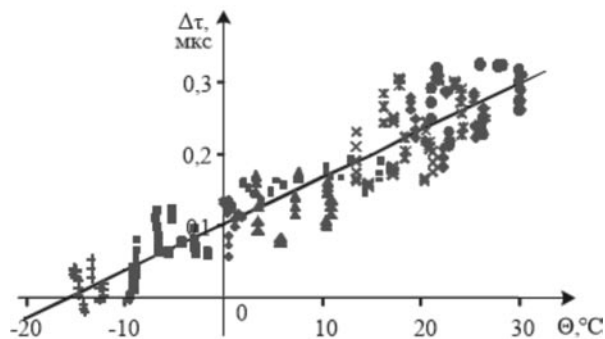


Рис. 7. Корреляционная зависимость измеренных среднесуточных значений  $\Delta t$  от изменения среднесуточной температуры  $\theta$  окружающей среды (—) – аппроксимирующая зависимость

адекватности полученных уравнений тренда  $\Delta t = f(\theta)$  по  $F$ -критерию Фишера показала, что все уравнения статистически значимы с вероятностью  $P = 0,95$  и пригодны для практического применения.

В результате выполненного анализа можно утверждать, что локационный метод зондирования имеет высокую чувствительность, обеспечивающую обнаружение запаздывания  $\Delta t$  отраженных сигналов из-за температурных изменений длины проводов ЛЭП в течение суток и года.

Также был определен коэффициент взаимной корреляции случайных флуктуаций амплитуды  $U$  и запаздывания  $\Delta t$  за одинаковые моменты времени в штатных условиях при отсутствии гололеда: он равен  $-0,37$ . Поэтому можно утверждать, что взаимосвязь параметров  $U$  и  $\Delta t$  является не очень устойчивой в штатных условиях работы линии, т. к. изменения текущих параметров  $U$  и  $\Delta t$  обусловлены разными физическими причинами, как было показано выше.

Но при обнаружении гололедообразования для повышения его достоверности необходимо использовать оба параметра  $U$  и  $\Delta t$ , которые изменяются при этом синхронно и являются надежными и эффективными критериями появления гололедных отложений на проводах воздушных линий.

Предельная чувствительность обнаружения в штатном режиме (при отсутствии гололедных образований) уменьшения амплитуды отраженных локационных сигналов составляет  $U = 5$  о.е. или 5 % от штатного значения амплитуды, а увеличения запаздывания составляет 0,08 мкс.

Эксперименты показывают, что даже при появлении слабой изморози на проводах воздушных линий уменьшения амплитуды отраженного сигнала составляют 50–60 % от штатного режима, а запаздывания достигают 1 мкс и выше, что намного больше температурных изменений этих параметров. Поэтому небольшие (менее 15 %) случайные флуктуации амплитуды и незначительные (менее 0,2 мкс) изменения запаздывания сигнала в штатных условиях не будут маскировать обнаружение гололеда на проводах ЛЭП.



Итак, приведенные данные характеризуют высокую чувствительность локационного метода и достаточную стабильность высокочастотного канала линии электропередачи при регистрации амплитуды  $U$  и запаздываний  $\Delta t$  отраженного сигнала. При выборе значений уставок по этим параметрам можно учесть их суточные и годовые тренды, что еще больше повысит чувствительность системы локационного мониторинга воздушных линий электропередачи. Флуктуационные изменения параметров  $U$  и  $\Delta t$ , а также их суточные и годовые вариации в штатных условиях из-за незначительной величины не будут мешать обнаружению повреждений

и гололедных образований на проводах ЛЭП. В некоторых случаях при определении уставок по  $U$  и  $\Delta t$  для обнаружения гололеда можно пренебречь их суточными вариациями и флуктуационными изменениями в виду их малости по величине

Авторы выражают благодарность Э.И. Лукину, Р.Г. Мустафину, Ю.В. Писковацкому, Э.Ф. Хакимзянову, С.Г. Ведерникову, И.С. Лаврентьеву, В.Л. Соболевой и А.Я. Латыповой за помощь в проведении измерений.

Исследования и разработки аппаратуры обнаружения гололеда на линиях электропередачи выполнены при финансовой поддержке ОАО «Сетевая компания» (Татарстан), АН Республики Татарстан и ОАО «ФСК ЕЭС».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Минуллин Р.Г., Касимов В.А., Яруллин М.Р., Филимонова Т.К. Локационное обнаружение гололеда на воздушных линиях электропередачи. Часть 1. Способы обнаружения гололеда // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2014. № 2 (193). С. 61–73.
2. Шалыт Г.М. Определение мест поврежденных линий электропередачи импульсным методом. М.: Энергия, 1968. 216 с.
3. Минуллин Р.Г., Закамский Е.В., Андреев В.В. Исследования условий отражения импульсных сигналов в распределительных электрических сетях с древовидной топологией // Электротехника. 2003. № 10. С. 39–44.
4. Минуллин Р.Г., Фардиев И.Ш. Локационная диагностика воздушных линий электропередачи. Казань: Изд-во КГЭУ, 2008. 202 с.
5. Минуллин Р.Г., Фардиев И.Ш., Петрущенко Ю.Я., Мезиков А.К., Коровин А.В. и др. Локационный способ обнаружения появления гололеда на проводах линии электропередачи // Электротехника. 2007. № 12. С. 17–23.
6. Минуллин Р.Г. и др. Обнаружение гололедных образований на линиях электропередачи локационным зондированием. Казань: Изд-во

КГЭУ, 2010. 207 с.

7. Минуллин Р.Г. Обнаружение гололеда и повреждений на воздушных линиях электропередачи локационным методом // Энергетика Татарстана. 2011. № 2 (22). С. 15–17.

8. Минуллин Р.Г., Лукин Э.И., Сухомяткин М.О. и др. Особенности обнаружения гололедных отложений на проводах линий электропередачи локационным зондированием // Электротехника. 2011. № 5. С. 6–12.

9. Минуллин Р.Г., Касимов В.А., Яруллин М.Р., Филимонова Т.К. Исследование параметров высокочастотного тракта линии электропередачи локационным методом в штатных условиях при отсутствии гололеда // Энергетика Татарстана. 2012. № 4 (28). С. 44–50.

10. Боровиков В. Statistica. Искусство анализа данных на компьютере. СПб.: Питер, 2001. 656 с.

11. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высш. школа, 2007. 479 с.

12. Правила устройства электроустановок. 7-е издание. СПб., 2005.

13. Кессельман Л.М. Основы механики воздушных линий электропередачи. М.: Энергоатомиздат, 1992. 352 с.

#### REFERENCES

1. Minullin R.G., Kasimov V.A., Yarullin M.R., Filimonova T.K. Lokatsionnoe obnaruzhenie gololeda na vozdushnykh liniyakh elektroperedachi. Chast 1. Sposoby obnaruzheniya gololeda [Location detection of glaze ice on overhead electric power lines. Part 1. Methods of glaze ice detection], *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekomunikatsii. Upravleniye* [St. Petersburg State Polytechnical University Journal.

*Computer Science. Telecommunications and Control System*], St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2014, No. 2(193), Pp. 61–73. (rus)

2. Shalyt G.M. *Opredeleniye mest povrezhdeniy liniy elektroperedachi impulsnym metodom*. Moscow: Energiya Publ., 1968, 216 p. (rus)

3. Minullin R.G., Zakamskiy Ye.V., Andreyev V.V. *Issledovaniya usloviy otrazheniya impulsnykh signalov v raspredelitelnykh elektricheskikh setyakh*

s drevovidnoy topologiyey, *Elektrotehnika*, 2003, No. 10, Pp. 39–44. (rus)

4. **Minullin R.G., Fardiyev I.Sh.** *Lokatsionnaya diagnostika vozdushnykh liniy elektroperedachi*. Kazan: KGEU Publ., 2008, 202 p. (rus)

5. **Minullin R.G., Fardiyev I.Sh., Petrushenko Yu.Ya., Mezikov A.K., Korovin A.V. i dr.** Lokatsionnyy sposob obnaruzheniya poyavleniya gololeda na provodakh linii elektroperedachi, *Elektrotehnika*, 2007, No. 12, Pp. 17–23. (rus)

6. **Minullin R.G. i dr.** *Obnaruzheniye gololednykh obrazovaniy na liniyakh elektroperedachi lokatsionnym zondirovaniyem*, Kazan: KGEU Publ., 2010. 207 p. (rus)

7. **Minullin R.G.** Obnaruzheniye gololeda i povrezhdeniy na vozdushnykh liniyakh elektroperedachi lokatsionnym metodom, *Energetika Tatarstana*, 2011, No. 2 (22), Pp. 15–17. (rus)

8. **Minullin R.G., Lukin E.I., Sukhomyatkin M.O. i dr.** Osobennosti obnaruzheniya gololednykh

otlozheniy na provodakh liniy elektroperedachi lokatsionnym zondirovaniyem, *Elektrotehnika*, 2011, No. 5, Pp. 6–12. (rus)

9. **Minullin R.G., Kasimov V.A., Yarullin M.R., Filimonova T.K.** Issledovaniye parametrov vysokochastotnogo trakta linii elektroperedachi lokatsionnym metodom v shtatnykh usloviyakh pri otsutstviy gololeda, *Energetika Tatarstana*, 2012, No. 4 (28), Pp. 44–50. (rus)

10. **Borovikov V.** *Statistika; Iskusstvo analiza dannykh na kompyutere*, St. Petersburg: Piter Publ., 2001, 656 p. (rus)

11. **Gmurman V.Ye.** *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika*, Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2007, 479 p. (rus)

12. *Pravila ustroystva elektroustanovok*. St. Petersburg, 2005. (rus)

13. **Kesselman L.M.** *Osnovy mekhaniki vozdushnykh liniy elektroperedachi*. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1992, 352 p. (rus)

**МИНУЛЛИН Ренат Гизатуллович** — заведующий научно-исследовательской лабораторией локационной диагностики состояния линий электропередачи Казанского государственного энергетического университета.

420066, Россия, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51.

E-mail: Minullin@mail.ru

**MINULLIN, Renat G.** *Kazan State Power Engineering University.*

420066, Krasnoselskaya Str. 51, Kazan, Russia.

E-mail: Minullin@mail.ru

**КАСИМОВ Василь Амирович** — аспирант научно-исследовательской лаборатории локационной диагностики состояния линий электропередачи Казанского государственного энергетического университета.

420066, Россия, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51.

E-mail: VasilKasimov@yandex.ru

**KASIMOV, Vasil A.** *Kazan State Power Engineering University.*

420066, Krasnoselskaya Str. 51, Kazan, Russia.

E-mail: VasilKasimov@yandex.ru

**ФИЛИМОНОВА Тамара Константиновна** — доцент кафедры инженерной кибернетики Института экономики и информационных технологий Казанского государственного энергетического университета.

420066, Россия, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51.

E-mail: Filimonova.Tamara@bk.ru

**FILIMONOVA, Tamara K.** *Kazan State Power Engineering University.*

420066, Krasnoselskaya Str. 51, Kazan, Russia.

E-mail: Filimonova.Tamara@bk.ru

**ЯРУЛЛИН Марсель Рашитович** — аспирант научно-исследовательской лаборатории локационной диагностики состояния линий электропередачи Казанского государственного энергетического университета.

420066, Россия, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51.

E-mail: Marsel.Jarullin@gmail.com

**YARULLIN, Marsel R.** *Kazan State Power Engineering University.*

420066, Krasnoselskaya Str. 51, Kazan, Russia.

E-mail: Marsel.Jarullin@gmail.com