



УДК.:681.518.5.001.63:621.315.1

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ОБРЫВА ПРОВОДА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 6-35 кВ

АСАНОВА С.М., АСАНОВ М.С., САТАРКУЛОВ К.

КГТУ им. И.Раззакова

a\_sm07@mail.ru

*В данной работе предлагается способ проектирования системы дистанционной диагностики обрыва провода воздушных линий в сложных распределительных электрических сетях среднего напряжения с использованием многофункционального провода.*

*In the present work the author offers the projecting method of wire break distant diagnostics system of overhead transmission lines in complex distributional electrical networks of medium voltage with the use of multifunctional wire.*

**Введение.** Как известно, воздушные линии, имеют достаточно большую протяженность и являются наименее надежными элементами энергосистемы, так как в процессе эксплуатации активно подвергаются воздействию внешней среды, причем некоторые из них могут проходить по труднодоступным районам. В таких сетях, по статистике, годовое количество повреждений исчисляются сотнями, а в питающихся от них абонентских сетях – тысячами. В случае обрыва провода определение места повреждения и, соответственно, процесс его устранения иногда затягивается на много дней и требует значительных трудозатрат. Главным требованием при этом является скорейшее восстановление питания отключившихся токоприемников при минимизации затрат труда, времени и средств на осуществление поиска.

Анализ информации показал, что на сегодняшнее время проблема оперативной диагностики состояния провода воздушных линий до конца не решена [1-2]. Традиционно, обнаружение места повреждения в таких линиях выполняется топографическим способом, путем обхода трассы, с использованием переносных приборов, и визуального осмотра. Поэтому весьма важным является разработка способов именно дистанционной и оперативной диагностики обрыва провода воздушных линий.

**Постановка задачи.** В предлагаемом способе предполагается, что электрическая сеть выполнена с использованием многофункционального провода (МП), где одна из токопроводящих жил изолирована от остальных [3], как показано на рис.1.

Распределительная электрическая сеть, образованная путем соединения силовых составляющих МП участков сети, и электрическая цепь, образованная на основе информационных составляющих МП, образуют распределительную электрическую систему. Исходной информацией для проектирования системы диагностики, распознающей обрывы проводов на участках ВЛ, является структура РЭС. Предполагается, что анализируемая РЭС состоит из множества  $n$ -проводных участков, соединенных соответствующими узлами, и имеет разомкнутую структуру. Состояние каждого участка сети  $(i_1, i_2)$ , соединяющего узлы  $i_1$  и  $i_2$ , характеризуется переменной  $x_{i_1, i_2} \in \{0, I_{i_1, i_2}\}$ , где  $x_{i_1, i_2} = 0$  – обрыв;  $x_{i_1, i_2} = I_{i_1, i_2}$  – нет обрыва;  $I_{i_1, i_2}$  – ток участка сети. Задачей проектирования является разработка таких схем соединения информационных проводов участков сети и соединения информационных проводов в узлах питания к источнику постоянного напряжения  $U_0$ , при которых значение тока  $I_0$  однозначно отражало бы обрыв провода на соответствующем участке.

**Схема решения задачи** проектирования включает следующие этапы:

- 1) путем задания соответствующих схем соединения информационных проводов участков сети, строится схема электрической цепи постоянного тока, структура которой позволила бы организовать распределение токов по информационным проводам участков, различных по значениям, на величины не меньшие, чем  $\Delta I$ ;
- 2) производится расчет желаемого распределения токов по информационным проводам участков цепи постоянного тока, полученного на первом этапе;
- 3) производится расчет параметров цепи для получения желаемого распределения токов по информационным проводам участков сети;
- 4) моделирование электрической цепи постоянного тока с учетом обрывов участков сети, с целью получения таблицы соответствия значений тока узла питания  $I_0$  и обрывов проводов на участках данной сети.

Описание данного способа сопровождается примером РЭС, схема которой представлена в виде ориентированного графа, показанного на рис. 2.

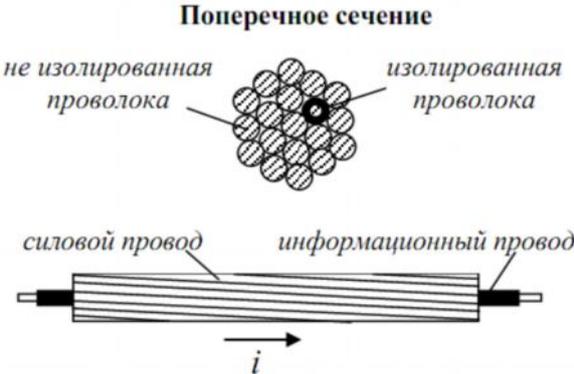


Рис. 1. Токпроводящая жила

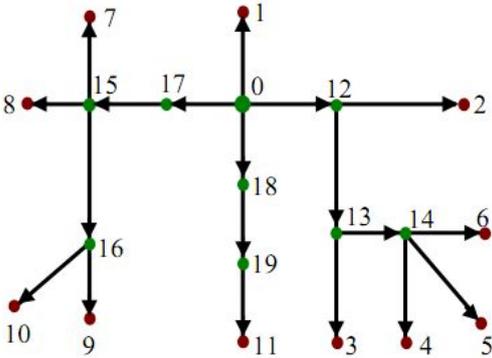


Рис. 2. Граф распределительной сети



многофункционального провода

*1-ый этап проектирования. Шаг 1.* Каждая ветвь схемы распределительной сети разбивается на один или несколько последовательно соединенных участков. Концы информационных проводов в узлах сети выводятся наружу из силовых проводов. Полученная, в результате такого разбиения, схема сети представляется в виде ориентированного графа  $(L, \Gamma)$ , где  $L$  - множество узлов сети (вершин графа);  $\Gamma$  - отображение множества  $L$  в  $L$ , показывающее, как между собой связаны узлы (вершины) из множества  $L$ , т.е.

$$\Gamma : L \rightarrow L, \quad \Gamma(i) \subseteq L, \quad \forall i \in L \setminus L_0, \quad \Gamma(i) = \emptyset, \quad \forall i \in L_0, \quad (1)$$

$$\Gamma \subseteq L \times L, \quad \Gamma_i = \{i\} \times \Gamma(i), \quad \forall i \in L \setminus L_0, \quad \Gamma_i = \emptyset, \quad \forall i \in L_0, \quad (2)$$

$$\Gamma = \bigcup_{i \in L \setminus L_0} \Gamma_i, \quad (3)$$

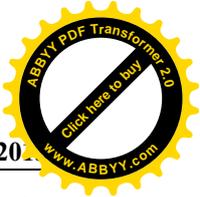
где  $\Gamma(i)$  - множество конечных вершин дуг (ориентированных ветвей), у которых начальной вершиной является  $i \in L$ ;  $\Gamma_i$  - множество дуг  $(i, j)$ , у которых начальной вершиной является  $i$ ;  $L_0 \subset L$  - множество конечных вершин графа сети  $(L, \Gamma)$ .

*Шаг 2.* Для получения структуры электрической цепи постоянного тока, позволяющей организовать распределение различных по значениям токов по информационным проводам, в конечных узлах  $i_2 \in L \setminus \{0\}$  ориентированных участков  $(i_1, i_2) \in \Gamma$  сети устанавливаются настраиваемые сопротивления  $R_{i_2}, i_2 \in L \setminus \{0\}$  между фазами  $a = 1$  и  $a = 2$  информационных проводов, а узел питания  $0$  присоединяется через миллиамперметр к источнику постоянного напряжения  $U_0$ .

*Шаг 3.* Производится расчет внутренних сопротивлений  $R_{i_1, i_2}$  информационных проводов всех участков сети.

*2-й этап проектирования.* На данном этапе, при расчете желаемого распределения токов по информационным проводам участков, исходный граф РЭС (рис.2) и соответствующая ей эквивалентная электрическая схема соединения информационных проводов распределительной системы (см. шаг 3) представляются как многоуровневые иерархические схемы (рис.3 и 4), которые эквивалентны по структуре соединения вершин к исходному графу (рис. 2).

*Шаг 4.* Производится расчет желаемого распределения токов, протекающих по информационным проводам множества конечных участков  $\{(i_1, i_2) \in \Gamma \mid i_2 \in L_0\}$  сети и различающихся по значениям не менее, чем на  $\Delta I$ . Сущность алгоритма расчета включает следующие процедуры:



а)  $s = 0; k = 1; I(k) = 0; L(k) = L_0$  - заданное множество конечных вершин (узлов) графа сети, являющееся множеством вершин  $s = 0$ -го уровня многоуровневой иерархической схемы (рис.3 и 4);  $\{l(i) | i \in L_0\}$  - заданное множество, где  $l(i)$  является длиной пути от узла питания (вершины 0) до конечной вершины  $i \in L_0$ .

б) выбрать такую вершину  $i_2$  из  $L(k)$ , которой соответствует максимальная длина пути  $l(i_2)$  от узла питания (вершины 0).

в) удалить  $i_2$  из множества  $L(k)$ :  $L(k+1) = L(k) \setminus \{i_2\}$ .

г) вычислить значение тока  $I_{i_1, i_2}$  участка  $(i_1, i_2) \in \Gamma$ , где  $i_1 = \Gamma^{-1}(i_2)$  - обратное отображение:

$$I_{i_1, i_2} = I_{i_2} = I(k) + \Delta I; I(k+1) = I_{i_1, i_2}; K_{i_2} = 1, \text{ т.к. } I_{i_2} > 0, \tag{4}$$

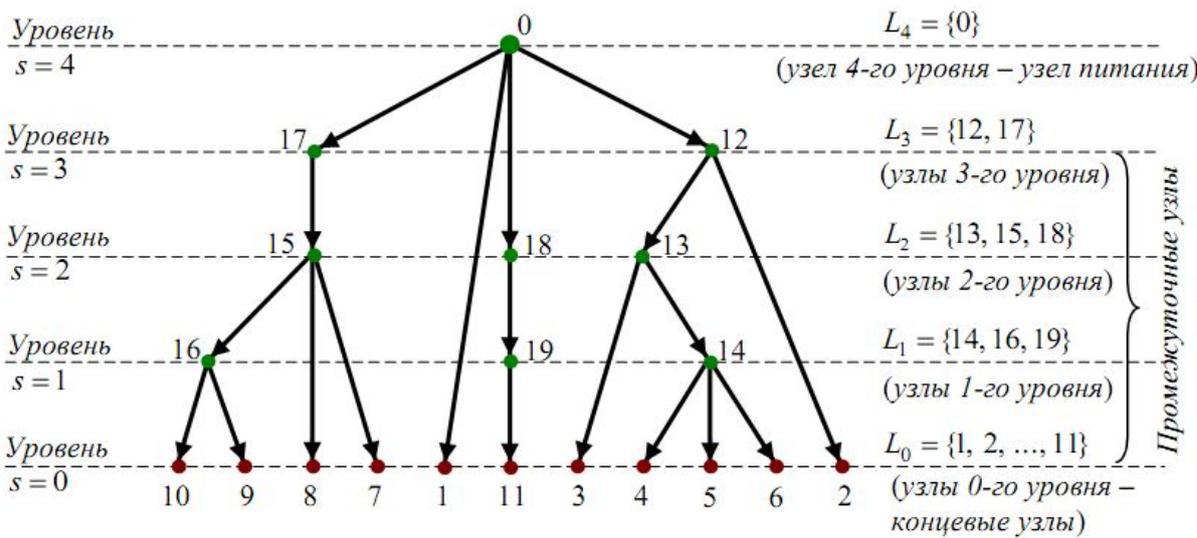


Рис. 3. Многоуровневая иерархическая схема графа РЭС

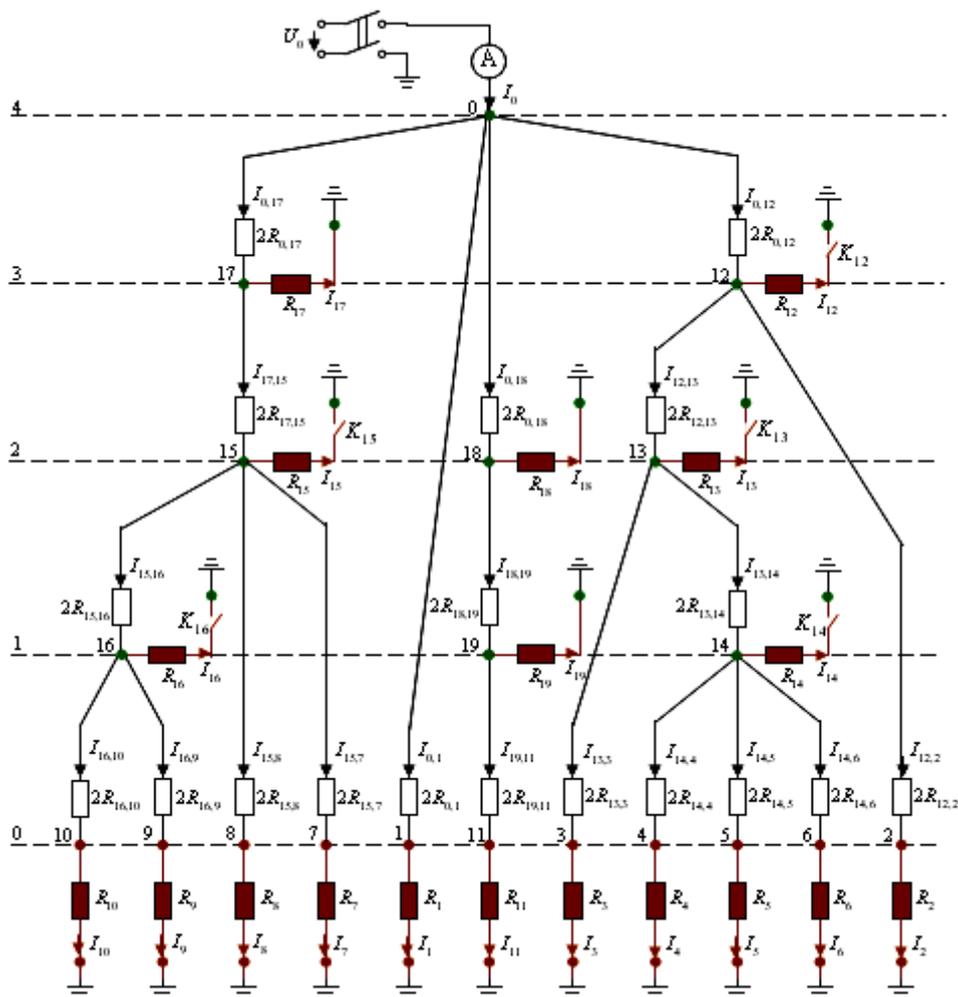


Рис. 4. Эквивалентная схема соединения информационных проводов распределительной системы

здесь  $I_{i_1, i_2} = I_{i_2}$ , поскольку конечные участки  $(i_1, i_2)$  и настраиваемые сопротивления  $R_{i_2}$  соединены последовательно.

д) если  $L(k+1) = \emptyset$  (или  $k = |L_0|$ ), то перейти к пункту (е) данного шага, иначе  $k = k+1$ , и перейти к пункту (б) данного шага.

е) формировать множество вершин (узлов)  $L_1$   $l$ -го уровня многоуровневой иерархической схемы (рис.3 и 4):

$$L_1 = \{i \in L \setminus L_0 \mid \Gamma(i) \subseteq L_0\}. \quad (5)$$

ж) вычислить значения токов  $I'_i$ ,  $i_1 \in L_1$ :



$$I'_i = \sum_{i_2 \in \Gamma(i)} I_{i_1, i_2}, \forall i_1 \in L_1 \quad (6)$$

и формировать множество  $\{I'_i | i \in L_1\}$ . Здесь:  $I(k)$  - искусственная переменная для хранения тока  $I_{i_1, i_2}$  (см.(5)) текущей ветви  $(i_1, i_2)$ , вычисленного по формуле (4) на текущем такте  $k$  (при  $k=1, I(1)=0$ );  $I'_i$  - суммарный ток, вытекающий из узла  $i_1$ ; процедура (б) совместно с (в) производит упорядоченный отбор  $i_2$  из множества  $L_0$  в порядке убывания  $I(i_2)$ ;  $\Gamma(i)$  - отображение (см. (1)-(3)).

*Шаг 5.* На основе полученных на шаге 4 множества узлов (вершин)  $L_1$  ( $s=1$ -го уровня многоуровневой иерархической схемы и соответствующих этим узлам токов  $I'_i, i \in L_1$  (6), производится расчет желаемого распределения токов, протекающих по информационным проводам множества промежуточных участков  $\{(i_1, i_2) \in \Gamma | i_2 \notin L_0\}$  сети и различающихся по значениям не менее, чем на  $\Delta I$ . Сущность алгоритма расчета включает следующие процедуры:

а)  $s=1; k=|L_0|+1; I(k)=I_{i_1, i_2}$  - ток, вычисленный на шаге 4 по формулам (4), (2) на последнем такте  $k=|L_0|; L(k)=L_1$  - множество узлов (вершин)  $s=1$ -го уровня, сформированное на шаге 4 по формуле (5) при  $k=|L_0|; \{I'_i | i \in L_1\}$  - множество токов, вычисленных на шаге 4 по формуле (6).

б) выбрать такую вершину  $i_2$  из  $L(k)$ , которой соответствует минимальный ток  $I'_{i_2}$  из  $\{I'_i | i \in L(k)\}$ , т.е.  $i_2 \in L(k) : [I'_{i_2} = \min \{I'_i | i \in L(k)\}]$ .

в) удалить  $i_2$  из множества  $L(k) : L(k+1) = L(k) \setminus \{i_2\}$ .

г) вычислить значение тока  $I_{i_1, i_2}$  участка  $(i_1, i_2) \in \Gamma$ , где  $i_1 = \Gamma^{-1}(i_2)$  - обратное

отображение: 
$$I_{i_1, i_2} = \begin{cases} I(k) + \Delta I, & \text{при } I'_{i_2} \leq I(k), \\ I'_{i_2}, & \text{при } I'_{i_2} > I(k), \end{cases} \quad I(k+1) = I_{i_1, i_2}.$$

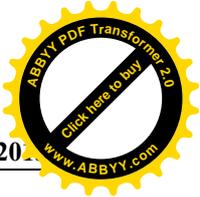
д) вычислить значение тока  $I_{i_2}$ , протекающего через настраиваемое сопротивление  $R_{i_2}$ , используя первый закон Кирхгофа, и определить состояние

условного ключа  $K_{i_2}$  (рис. 3 и 4): 
$$I_{i_2} = I_{i_1, i_2} - I'_{i_2}, \quad K_{i_2} = \begin{cases} 0, & \text{при } I_{i_2} = 0, \\ 1, & \text{при } I_{i_2} > 0. \end{cases}$$

е) если  $L(k+1) = \emptyset$  (или  $k = \sum_{j=0}^s |L_j|$ ), то перейти к пункту (ж) данного шага,

иначе  $k = k + 1$ , и перейти к пункту (б) данного шага.

ж) формировать множество вершин (узлов)  $L_{s+1}$  ( $s+1$ -го уровня:



$$L_{s+1} = \{i \in (L \setminus (\bigcup_{j=0}^s L_j)) \mid \Gamma(i) \subseteq \bigcup_{j=0}^s L_j\}.$$

з) вычислить значения токов  $I'_i, i_1 \in L_{s+1}$

$$I'_i = \sum_{i_2 \in \Gamma(i_1)} I_{i_1, i_2}, \quad \forall i_1 \in L_{s+1}; \tag{7}$$

и формировать множество  $\{I'_i \mid i \in L_{s+1}\}$ .

и) если  $L_{s+1} = \{0\}$ , то перейти к шагу 6, иначе  $L(k+1) = L_{s+1}, s = s + 1, k = k + 1$ , и перейти к пункту (б) данного шага.

*3-й этап проектирования.* На данном этапе, при расчете настраиваемых сопротивлений для получения желаемого распределения токов по информационным проводам сети, исходный граф РЭС (рис. 2) и соответствующая ей эквивалентная схема соединения информационных проводов распределительной системы (см. шаг 3) представляются как многоуровневые иерархические схемы, которые эквивалентны по структуре соединения вершин из  $L$  к исходному графу.

*Шаг 6.* Производится расчет настраиваемых сопротивлений  $\{R_i \mid i \in L \setminus \{0\}\}$  для реализации желаемого распределения токов по информационным проводам участков сети, рассчитанных на предыдущих шагах 4 и 5. Сущность алгоритма расчета включает следующие процедуры:

а)  $s = 0, k = 1, L(k) = L'_0 = \{0\}; L'(k) = \emptyset; \{I_{i_1, i_2} \mid (i_1, i_2) \in \Gamma\}$  - токи информационных проводов участков,  $\{I_i \mid i \in L \setminus \{0\}\}$  - токи настраиваемых сопротивлений,  $\{K_i \mid i \in L \setminus \{0\}\}$  - состояние условных ключей, рассчитанное на предыдущих шагах 4 и 5;  $U_0$  - постоянное напряжение узла 0 (узла питания).

б) выбрать любую вершину  $i_1$  из  $L(k)$ .

в) удалить  $i_1$  из множества  $L(k): L(k+1) = L(k) \setminus \{i_1\}$ .

г) вычислить значения напряжений  $U_{i_2}, \forall i_2 \in \Gamma(i_1)$  и значения настраиваемых сопротивлений  $R_{i_2}$  для всех таких узлов  $i_2 \in \Gamma(i_1)$ , для которых  $K_{i_2} = 1$ , т.е.:

$$U_{i_2} = U_{i_1} - 2 \cdot R_{i_1, i_2} \cdot I_{i_1, i_2}, \quad \forall i_2 \in \Gamma(i_1), \quad R_{i_2} = \frac{U_{i_2}}{I_{i_2}}, \quad \forall i_2 \in \Gamma(i_1): [K_{i_2} = 1].$$

д) формирование множества вершин (узлов)  $\Gamma(L'_s)$ , соответствующего  $(s + 1)$ -му уровню:  $L'(k+1) = L'(k) \cup \Gamma(i_1)$ .

е) если  $L(k+1) = \emptyset$ , то перейти к пункту (ж) данного шага, иначе  $k = k + 1$ , и перейти к пункту (б) данного шага.



ж) формировать множество вершин (узлов)  $L'_{s+1}$   $(s+1)$ -го уровня:  $L'_{s+1} = \Gamma(L'_s) \setminus L_0$ , где  $\Gamma(L'_s) = L'(k+1)$ , при  $L(k+1) = \emptyset$  (см. (д), (е)).

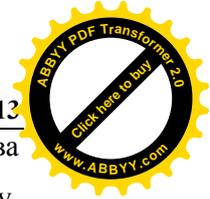
з) если  $L'_{s+1} = \emptyset$ , то перейти к шагу 7, иначе  $L(k+1) = L'_{s+1}$ ,  $L'(k+1) = \emptyset$ ,  $s = s+1$ ,  $k = k+1$ , и перейти к пункту (б).

4-й этап проектирования. Шаг 7. Производится моделирование электрической цепи постоянного тока, полученной на шаге 6 (рис. 4), с целью получения таблицы соответствия значений тока узла питания  $I_0 = I'_0$  (7) и обрывов проводов участков сети. Для этого эквивалентная электрическая схема соединения информационных проводов распределительной системы, полученная на шаге 6, преобразуется к виду, где каждому участку  $(i_1, i_2) \in \Gamma$  сопоставляется ключ  $K_{i_1, i_2} \in \{0, 1\}$ , моделирующий состояние  $x_{i_1, i_2} \in \{0, I_{i_1, i_2}\}$  рассматриваемого участка. При  $K_{i_1, i_2} = 0$ ,  $x_{i_1, i_2} = 0$  - обрыв участка  $(i_1, i_2)$ , а при  $K_{i_1, i_2} = 1$ ,  $x_{i_1, i_2} = I_{i_1, i_2}$  - нет обрыва на участке  $(i_1, i_2)$ .

Результаты экспериментального моделирования в программе Electronics Workbench при обрыве провода на участках РЭС приведены в таблице (обрыв провода имитируется с помощью коммутационных аппаратов), из которой видно, что при значении суммарного тока 930 мА – обрыва в сети нет, при значении тока 734 мА – обрыв на участке (17,15), и т.д.

**Таблица - Соответствие значений тока  $I_0$  и обрыва провода на участках сети**

	Обрыв на участке $(i_1, i_2)$									
	Обрыва нет	(16,10)	(16, 9)	(15, 8)	(15, 7)	(14, 4)	(14, 5)	(14, 6)	(13, 3)	(19,11)
<b><math>I_0</math>, mA</b>	930	922	913	903	894	886	876	867	857	844
	Обрыв на участке $(i_1, i_2)$									
	(12, 2)	(0, 1)	(15,16)	(18,19)	(13,14)	(0, 18)	(17,15)	(12,13)	(0, 17)	(0, 12)
<b><math>I_0</math>, mA</b>	835	822	815	803	758	742	734	675	662	572



**Заключение.** Таким образом, разработан действенный способ диагностики обрыва провода воздушных линий, использование которого позволит обслуживающему персоналу, находясь на подстанции, оперативно и дистанционно обнаруживать поврежденный участок, с тем, чтобы ремонтная бригада была направлена точно к месту повреждения.

### Литература

1. Минулин Р.Г., Петрушенко Ю.Я., Фардиев И.Ш. Локационная диагностика линии электропередач. – IX Симпозиум «Электротехника 2030», Российская Федерация. 2007 г. – С. 33-38.
2. Сарин Л.И., Шалин А.И., Ильиных М.В. и др. Определение места замыкания на землю на воздушных линиях 6 – 35 кВ. – Ограничение перенапряжений. Режимы заземления нейтрали. Электрооборудование сетей 6 – 35 кВ: тр. IV всероссийской НТК. – Новосибирск, 2006. С. 189–196.
3. Сатаркулов К.А., Асанова С.М. и др. Токопроводящая жила проводов и кабелей. – Патент КГ № 1187. 2009 г.