

Асанова С.М., Айдарова А.Р., Калматов У.А.

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОЙ
ДИАГНОСТИКИ ОБРЫВА ПРОВОДА ВЛ 6-35 кВ**

S.M. Asanova, A.R. Aidarova, U.A. Kalmatov

**DESIGN AND MODELING OF THE SYSTEM OF REMOTE DIAGNOSTICS WIRE
BREAK 6-35 KVOTL**

УДК.: 001.891.54.001.63:621.316.962

Разработан действенный способ проектирования системы дистанционной и оперативной диагностики обрыва провода на участках воздушных линий распределительных электрических сетей напряжением 6-35 кв.

Instrumental method of the distant and operational diagnostics projecting system of the wire break was worked out in the areas of the overhead wires that is spread with the voltage of 6-35 kilowatt (kv)

Введение. На современном этапе, одной из важнейших задач экономики Кыргызской Республики является повышение эффективности работы электроэнергетики. Этого можно достичь, решив множество задач, возникающих при проектировании и эксплуатации электроэнергетической системы.

На сегодняшний день, весьма важной является задача диагностики проводов воздушных линий (ВЛ), т.к., исходя из статистики, в сетях среднего напряжения годовое количество повреждений исчисляется сотнями, а в питающихся от нее абонентских сетях – тысячами, причем некоторые ВЛ проходят по районам, передвижение по которым сильно затруднено. Такая ситуация сложилась в сетях КР из-за морального и физического износа ее элементов. При этом, определение места повреждения и восстановление поврежденных участков ВЛ сети являются наиболее сложными и длительными технологическими операциями. Особо остро эта проблема стоит для ВЛ напряжением 6-35 кВ. Затруднения возникают из-за того, что в РЭС применяется режим изолированной нейтрали, кроме того, они имеют разветвленную древовидную топологию. Поэтому методы диагностики, успешно используемые для ВЛ напряжением 110 кВ и выше, имеющих глухо заземленную нейтраль, в данном случае неприменимы.

Анализ информации из советско-российской и зарубежной технической литературы показал, что ни в России, ни в странах СНГ, ни за рубежом проблема оперативной диагностики состояния РЭС в настоящее время до конца не решена [1, 2]. Отсутствие в этом направлении прогрессивных методов с использованием последних достижений науки и техники затрудняет оперативное обнаружение повреждений ВЛ.

Поэтому так важны исследовательские работы, направленные на поиск действенных методов

диагностики состояния ВЛ РЭС 6-35 кВ; при этом необходимо, чтобы методы были дистанционными, оперативными, универсальными и многофункциональными.

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 (рис. 2), 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 ΔI ;

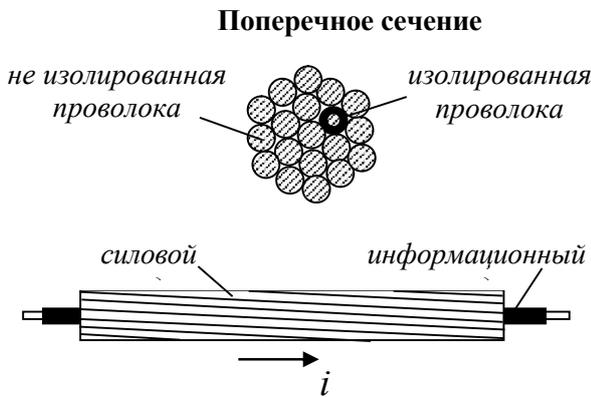


Рис. 1. Токпроводящая жила многофункционального провода

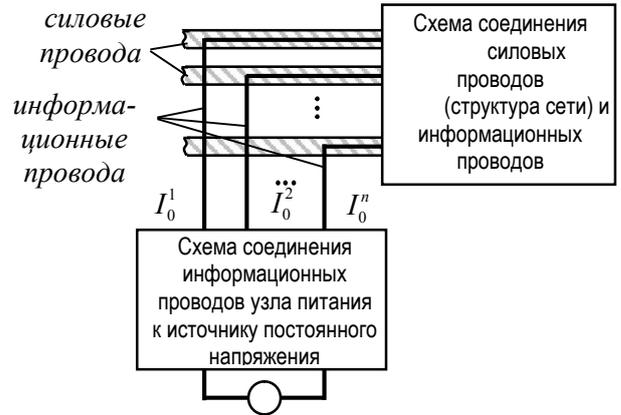


Рис. 2. Структура распределительной электрической системы

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.

Таким образом, разработаны методика проектирования систем распознавания обрывов проводов участков двухпроводных РЭС.

Описание данного способа сопровождается примером РЭС, схема которой представлена в виде ориентированного графа (дерева), показанного на рис. 3.

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, Γ) , где L - множество узлов сети (вершин графа); Γ - 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 $i \in L$; Γ_i - множество дуг (i, j) , у которых начальной вершиной является i ; $L_0 \subset L$ - множество конечных вершин графа сети (L, Γ) .

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 измерительный прибор (мА) к источнику постоянного напряжения U_0 .

Шаг 3. Производится расчет внутренних сопротивлений R_{i_1, i_2} информационных проводов всех участков сети, в результате чего каждому участку сети соответствует электрическая схема замещения, показанная на

рис.4, где: I_{i_2} – ток настраиваемого сопротивления R_{i_2} , установленного в узле i_2 между фазами $a=1$ и $a=2$ информационных проводов; U_{i_1} , U_{i_2} – напряжения между фазами информационных проводов; $K_{i_2} \in \{0, 1\}$ – состояние условного ключа: при $K_{i_2} = 0$ настраиваемое сопротивление R_{i_2} в узле i_2 не установлено, а при $K_{i_2} = 1$ – установлено (условный ключ K_{i_2} присутствует только в схеме замещения участка (i_1, i_2) , с разветвлением в узле i_2 ; причина станет ясна ниже, при описании алгоритма расчета желаемого распределения токов по информационным проводам участков сети).

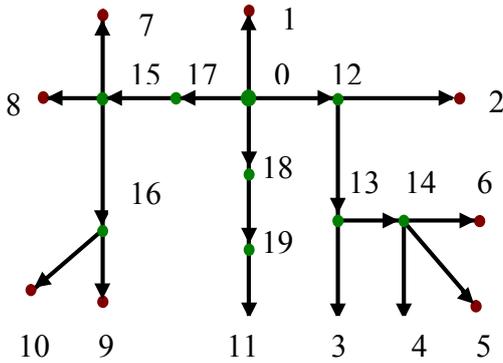


Рис. 3. Граф распределительной сети

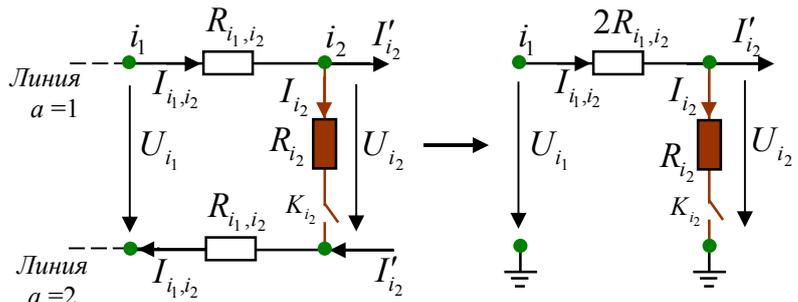


Рис. 4. Эквивалентная схема замещения информационных проводов участка (i_1, i_2)

2-й этап проектирования. На данном этапе, при расчете желаемого распределения токов по информационным проводам участков, исходный граф РЭС (рис.3) и соответствующая ей эквивалентная электрическая схема соединения информационных проводов распределительной системы (см. шаг 3) представляются как многоуровневые иерархические схемы (рис.5 и 6), которые эквивалентны по структуре соединения вершин к исходному графу (рис. 3).

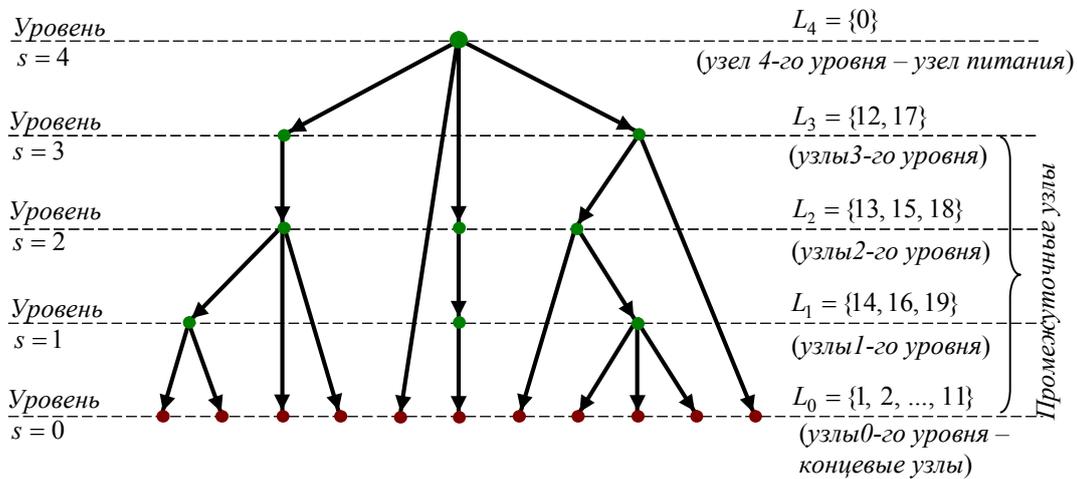


Рис. 5. Многоуровневая иерархическая схема графа РЭС

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 ΔI . 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.5 и 6); $\{I(i) \mid i \in L_0\}$ - заданное множество, где $I(i)$ является длиной пути от узла питания (вершины 0) до конечной вершины $i \in L_0$.

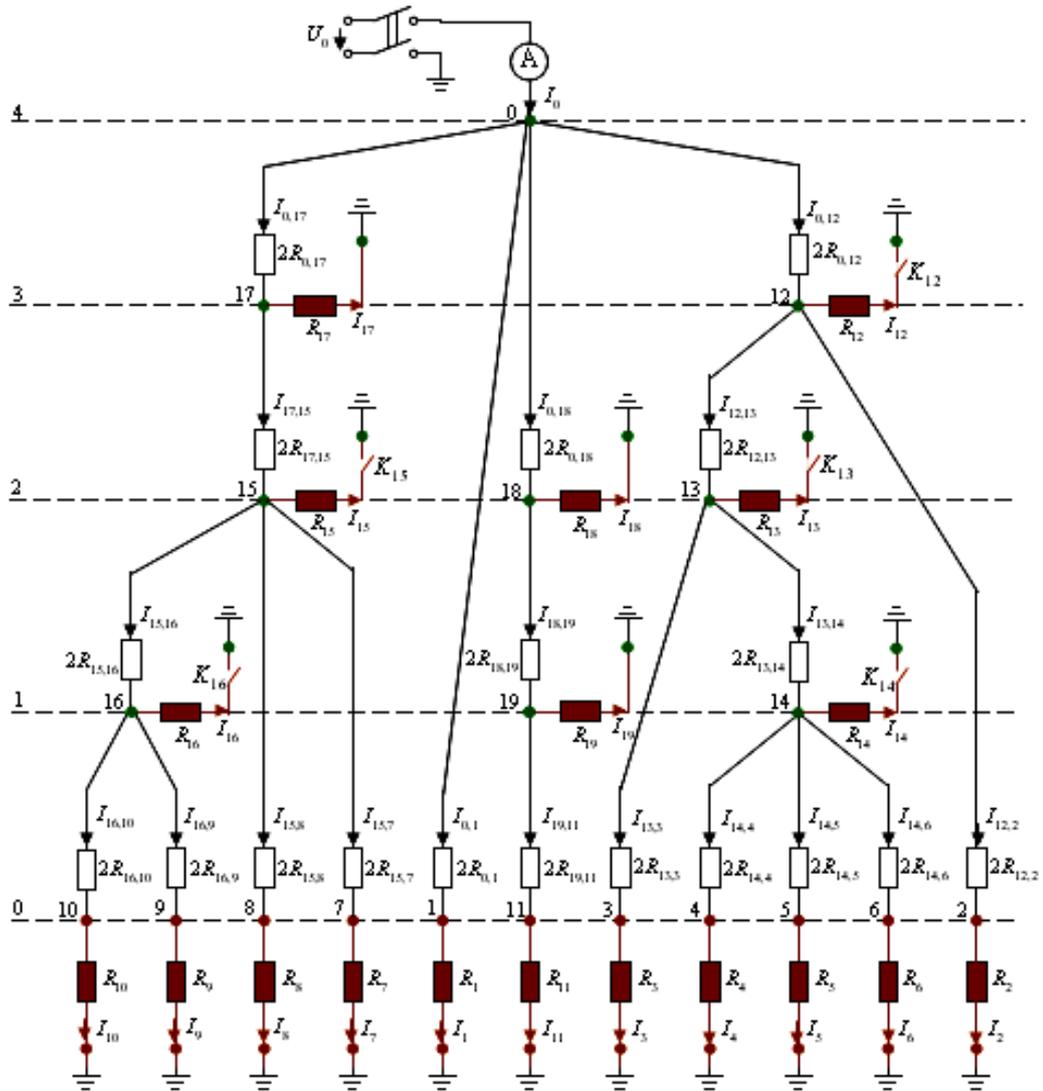


Рис. 6. Эквивалентная схема соединения информационных проводов распределительной системы

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:

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

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.5 и 6):

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

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

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

и формировать множество $\{I'_i \mid i \in L_1\}$. 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 $\{(i_1, i_2) \in \Gamma \mid i_2 \notin L_0\}$ сети и различающихся по значениям не менее, чем на ΔI . 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 $k=|L_0|$; $\{I'_i \mid i \in L_1\}$ - 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 $\{I'_i \mid i \in L(k)\}$, т.е. $i_2 \in L(k): [I'_{i_2} = \min \{I'_i \mid i \in L(k)\}]$.

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

$$\text{условного ключа } K_{i_2} \text{ (рис. 5 и 6): } I_{i_2} = I_{i_1, i_2} - I'_{i_2}, K_{i_2} = \begin{cases} 0, & \text{при } I_{i_2} = 0, \\ 1, & \text{при } I_{i_2} > 0. \end{cases}$$

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_1} , $i_1 \in L_{s+1}$

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

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. 3) 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:

$$L'_{s+1} = \Gamma(L'_s) \setminus L_0, \text{ где } \Gamma(L'_s) = L'(k+1), \text{ при } L(k+1) = \emptyset \text{ (см. (д), (е)).}$$

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 (рис. 7), полученной на шаге 6, 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) .

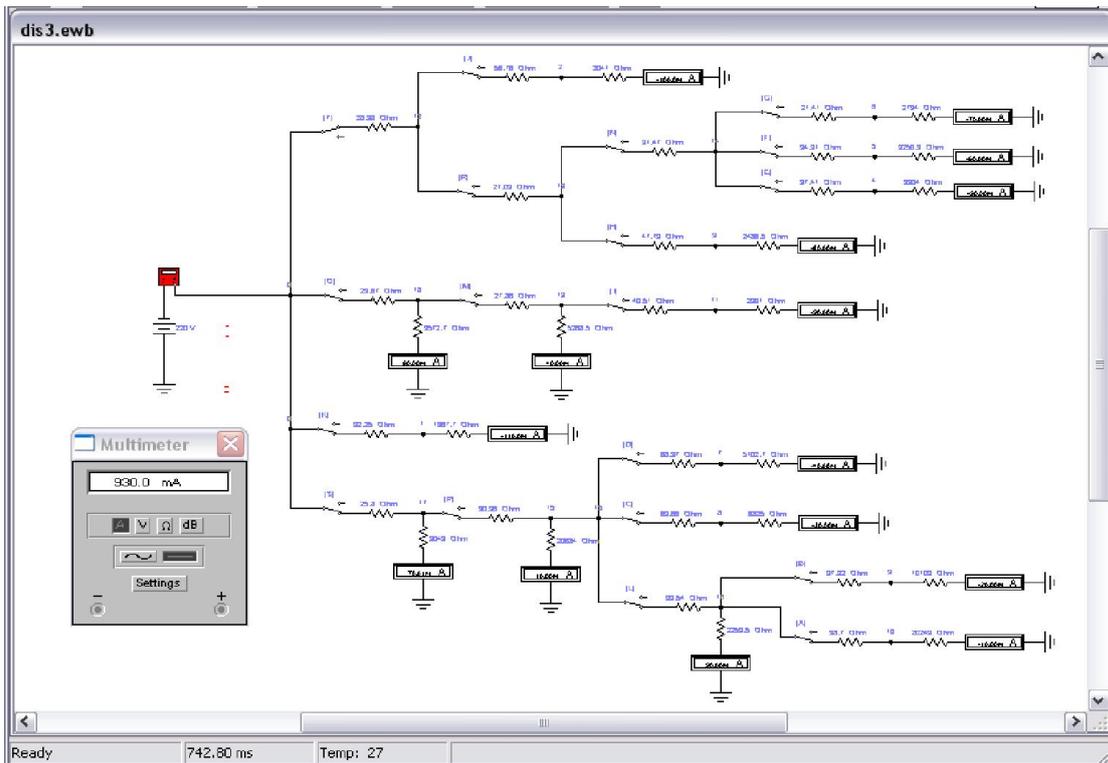


Рис. 7. Моделирование РЭС при обрывах провода на определенных участках

Результаты экспериментального моделирования в программе ElectronicsWorkbench (рис.7) при обрывах провода на участках РЭС приведены в таблице (обрыв провода имитируется с помощью коммутационных аппаратов).

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)
I_0, mA	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)
I_0, mA	835	822	815	803	758	742	734	675	662	572

Заключение. Таким образом разработан действенный способ проектирования системы диагностики состояния проводов на участках ВЛ РЭС напряжением 6-35 кВ. Этот способ позволяет оперативно и дистанционно обнаруживать участок повреждения провода ВЛ.

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 г. С. 189-196.
3. Сатаркулов К.А., Асанова С.М. и др. Токпроводящая жила проводов и кабелей. Патент KG № 1187. 2009 г.

Рецензент: к.т.н. Сатаркулов К.А.