

УДК.: 004.73:681.518.001.63:621.315.1

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ ПЕТРИ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ОБРЫВА ПРОВОДА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ РЭС 6-35 кВ

АСАНОВА С.М.

КГТУ им. И.Раззакова

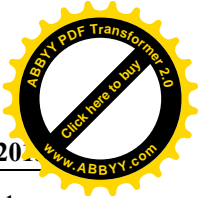
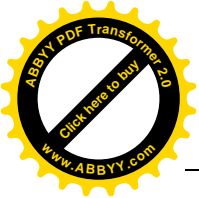
a_sm07@mail.ru

В данной работе разработан самоорганизующийся, многокомпонентный, структурно-подобный вычислительный алгоритм для проектирования системы дистанционной диагностики обрыва провода воздушных линий в распределительных электрических сетях среднего напряжения с использованием многофункционального провода.

In the present work the author developed self-organizing, multicomponent, structure-like computational algorithm for projecting of wire break distant diagnostics system of overhead transmission lines in distributional electrical networks of medium voltage with the use of multifunctional wire.

Введение. В работе [1] разработан эффективный способ проектирования системы дистанционной диагностики обрыва провода на участках воздушной линии РЭС 6-35 кВ, в котором предполагается, что электрическая сеть выполнена с использованием многофункционального провода, где одна из токопроводящих жил изолирована от остальных. Описанные в работе [1] алгоритмы расчета желаемого распределения токов по информационным проводам участков сети и расчета настраиваемых сопротивлений имеют классическую структуру организации вычислительных процессов, где с трудом проглядывается структура самой проектируемой системы, что приводит к определенным трудностям при их понимании, реализации на ЭВМ и анализе полученных результатов. Указанные трудности многократно повышаются при увеличении размерности и усложнении структуры проектируемой системы. Удобным средством для построения структурноподобных вычислительных алгоритмов является аппарат вычислительных сетей Петри (ВСП) [2]. Ниже описывается ВСП, реализующая структурноподобный вычислительный алгоритм проектирования системы дистанционного и оперативного обнаружения обрыва провода ВЛ.

Постановка задачи и схема ее решения описана в работе [1]. С целью использования аппарата ВСП при проектировании данной системы, представим процедуры анализа топологии сети, расчета желаемого распределения токов по информационным проводам участков сети и расчета настраиваемых сопротивлений цепи для получения желаемого распределения токов, как



управляемый дискретный динамический процесс движения информационных маркеров на графах сети и их соответствующего преобразования. ВСП_{Гр}, реализующая процесс проектирования, состоит из ВСП_I и ВСП_П, взаимосвязанных через соответствующие позиции, где ВСП_I предназначена для реализации вычислительного алгоритма анализа топологии и расчета желаемого распределения токов по информационным проводам путем управляемого движения и преобразования информационных маркеров, начиная с конечных узлов (вершин) в направлении узла питания (начальной вершины) графа сети, а ВСП_П – алгоритма расчета настраиваемых сопротивлений цепи для получения желаемого распределения токов путем движения и преобразования информационных маркеров, начиная от узла питания, в направлении конечных узлов.

Функциональная схема ВСП_I имеет двухуровневую структуру и является объединением схем вычислительных блоков нижнего ВСП_{Гр} и верхнего ВСП_{Упр} уровней:

$$ВСП_I = ВСП_{Гр} \cup ВСП_{Упр} \quad (1)$$

При функционировании ВСП_{Гр} формируется многоуровневая иерархическая схема графа цепи информационных проводов (см. рис. 1) путем разбиения множества узлов исходного графа на уровни иерархии и, по мере такого разбиения, производится, под управлением ВСП_{Упр}, расчет желаемого распределения токов по информационным проводам. ВСП_{Гр} является объединением схем (графов) вычислительных блоков и модулей, показанных на рис. 2:

$$ВСП_{Гр} = \left(\bigcup_{i_2 \in L_0} ВСП_{i_2}^0 \right) \cup \left(\bigcup_{i_2 \in (L \setminus L_0) \setminus \{0\}} ВСП_{i_2}^s \right) \cup \left(\bigcup_{i_i \in L_0} ВСП_{Г(i_i)} \right), \quad (1')$$

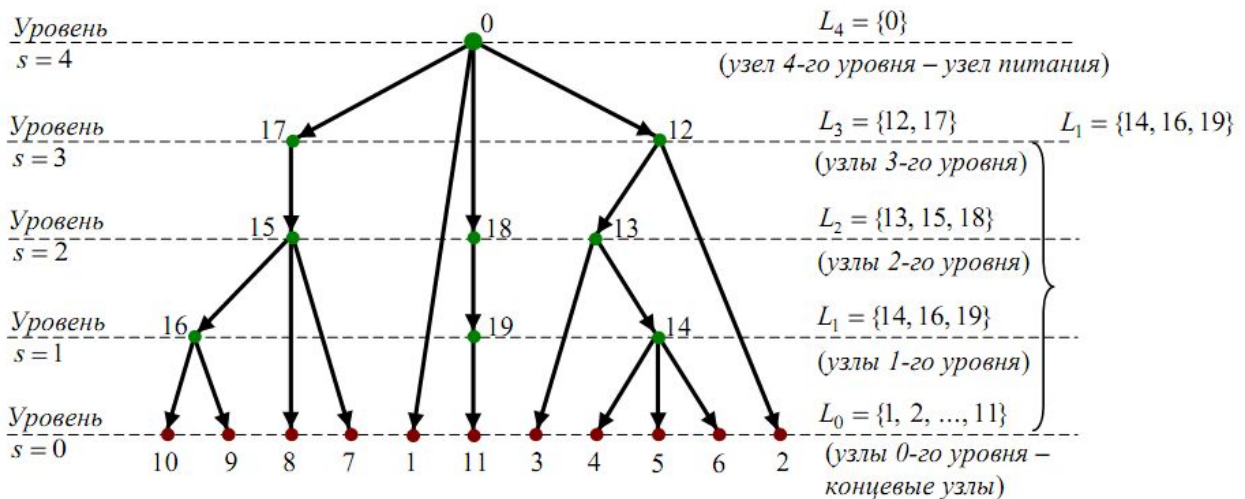
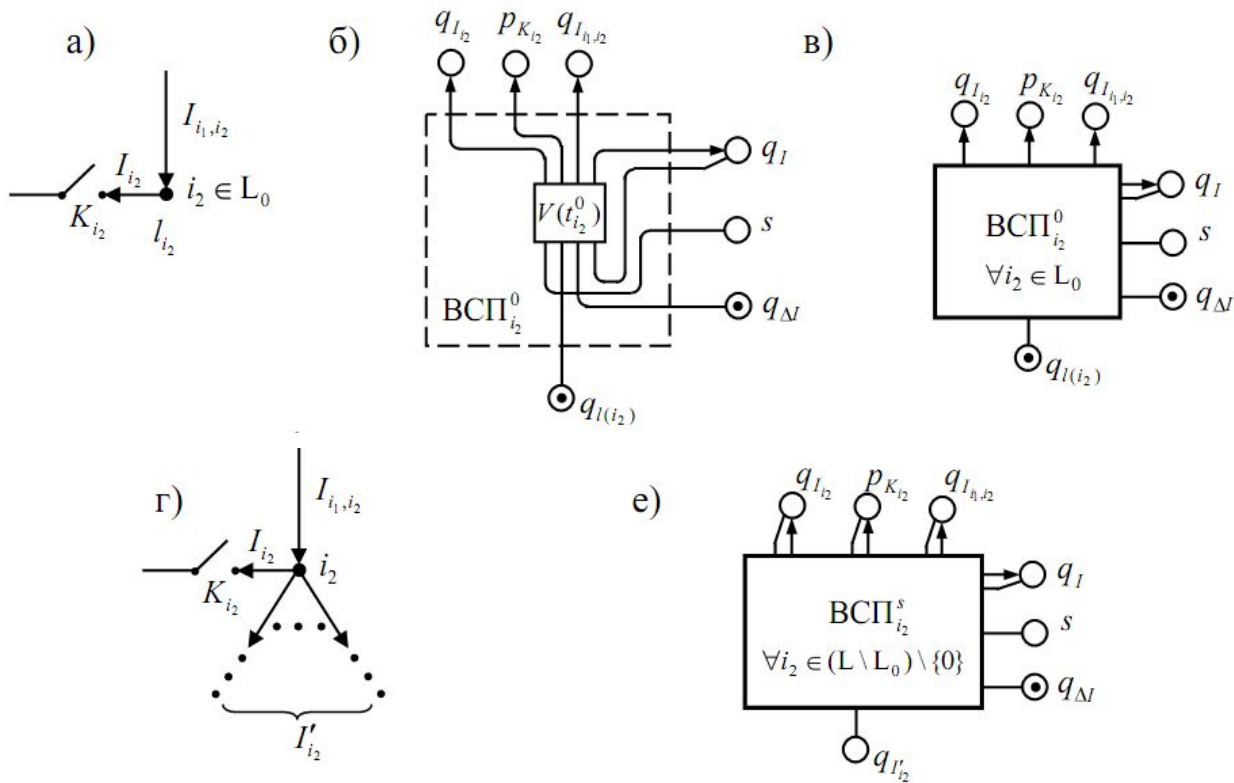


Рис. 1. Многоуровневая иерархическая схема графа РЭС

где $ВСП_{i_2}^0, \forall i_2 \in L_0$ - вычислительный блок конечного узла $i_2 \in L_0$, предназначенный для вычисления токов I_{i_1, i_2}, I_{i_2} и состояния условного ключа K_{i_2} ; каждый блок $ВСП_{i_2}^0$ состоит из

одного вычислительного модуля (ВМ) $V(t_{i_2}^0)$ перехода $t_{i_2}^0$ (рис. 2, а,б,в); $ВСП_{i_2}^0$, $\forall i_2 \in (L \setminus L_0) \setminus \{0\}$ - вычислительный блок промежуточного узла $i_2 \in (L \setminus L_0) \setminus \{0\}$, предназначенный для вычисления токов I_{i_1,i_2} , I_{i_2} и состояния условного ключа K_{i_2} ; каждый блок $ВСП_{i_2}^0$ состоит из трех взаимосвязанных ВМ $V(t_{i_2}^1)$, $V(t_{i_2}^2)$, $V(t_{i_2}^3)$ переходов соответственно $t_{i_2}^1$, $t_{i_2}^2$, $t_{i_2}^3$ (рис. 2, з,д,е); $ВСП_{\Gamma(i_1)}$, $\forall i_1 \in L \setminus L_0$ - вычислительный блок, предназначенный для вычисления суммарного тока I'_{i_1} , вытекающего из узла i_1 по множеству ориентированных ветвей, начальными вершинами которых является i_1 , а конечными - вершины из множества $\Gamma(i_1)$, и участвующий в разбиении множества узлов (вершин) исходного графа сети на уровни иерархии; каждый блок $ВСП_{\Gamma(i_1)}$ состоит из одного ВМ $V(t_{\Gamma(i_1)})$ перехода $t_{\Gamma(i_1)}$ (рис.2, ж,з,и).



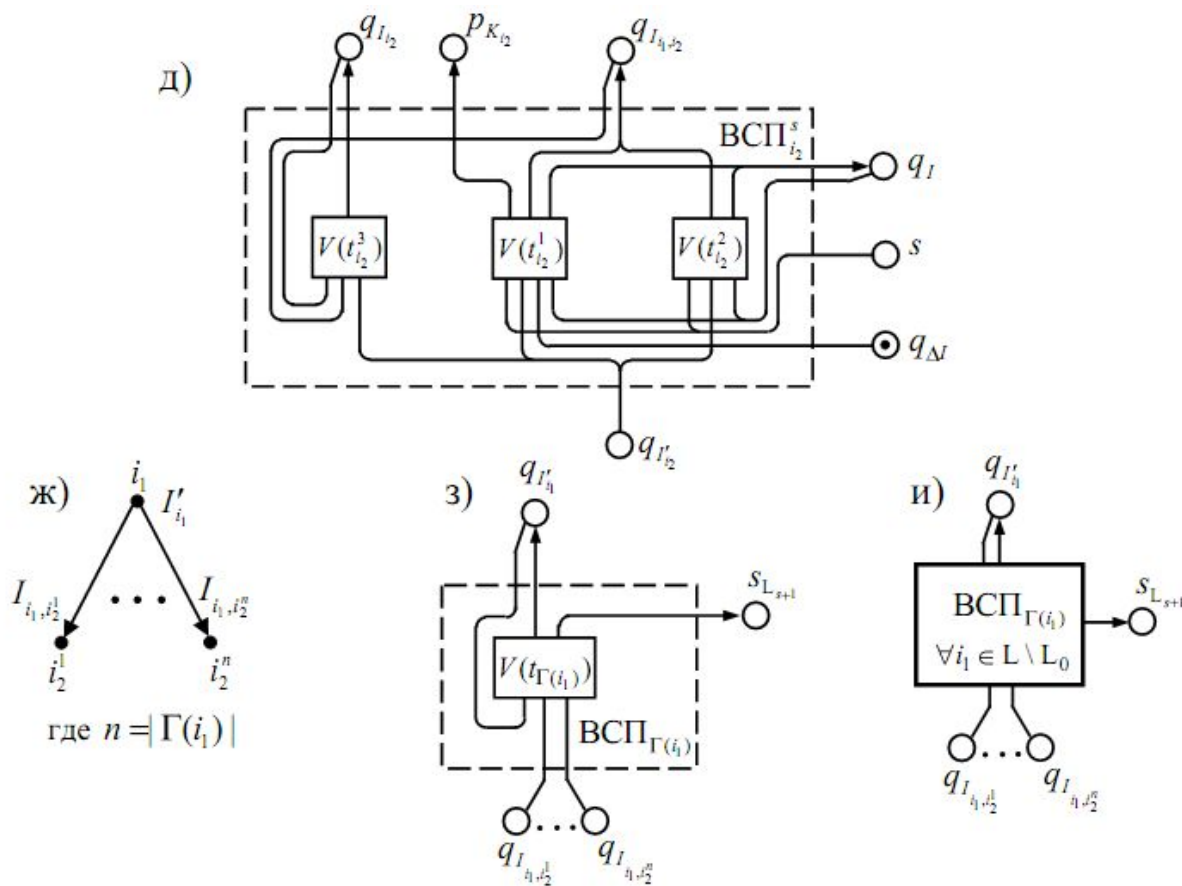


Рис. 2. ВСП узлов (вершин) графа электрической цепи информационных проводов

Функциональная схема ВСП_{упр} в виде взаимосвязанных ВМ $V(t_0^y), \dots, V(t_5^y)$, переходов, соответственно, t_0^y, \dots, t_5^y , показана на рис. 3. В схеме ВСП₁ предусмотрены позиции $\{q_{l(i)} \mid i \in L_0\}$, q_{Δ} , s_0 , q_U , для хранения исходных данных решаемой задачи. При наличии в них исходных данных (информационных маркеров), их состояние:

$$\mu(q_{l(i)}) = l(i), \forall i \in L_0; \quad \mu(q_{\Delta}) = \Delta I; \quad \mu(s_0) = q_{I'_0}; \quad \mu(q_U) = U_0. \quad (2)$$

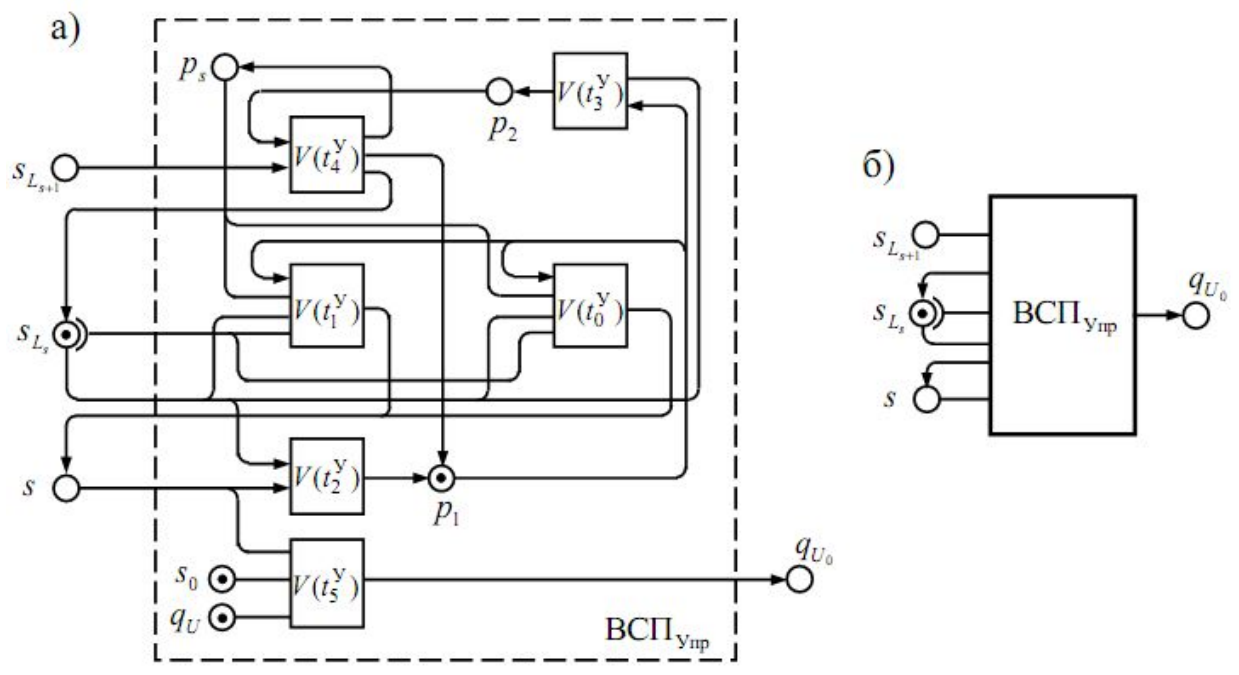


Рис. 3. ВСП для управления последовательностью срабатывания ВСП узлов (вершин) графа электрической цепи информационных проводов

Состояние процесса функционирования ВСП_i характеризуется состоянием позиций

$$q_{I_{i_1, i_2}}, \forall (i_1, i_2) \in \Gamma, q_{I_i}, p_{K_i}, \forall i \in L \setminus \{0\},$$

$$q_{I_i}, \forall i \in L \setminus L_0, q_I, s_{L_{s+1}}, s_{L_s}, s, p_1, p_2, p_s$$
(3)

При наличии в них информационных маркеров, их состояние:

$$\mu(q_{I_{i_1, i_2}}) = I_{i_1, i_2}, \forall (i_1, i_2) \in \Gamma; \tag{4}$$

$$\mu(q_{I_i}) = I_i, \mu(p_{K_i}) = K_i = 1, \forall i \in L \setminus \{0\}; \tag{5}$$

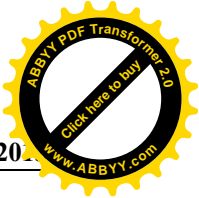
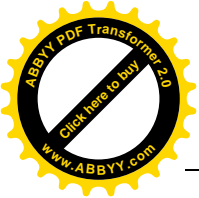
$$\mu(q_{I_i}') = I_i', \forall i \in L \setminus L_0; \mu(q_I) = I; \tag{6}$$

$$\mu(s_{L_{s+1}}) \subseteq \{q_{I_i}' \mid i \in L_{s+1}\}; \tag{7}$$

$$\mu(s_{L_s}) \subseteq \begin{cases} \{q_{I_{(i)}} \mid i \in L_0\}, & \text{при рассмотрении } s = 0 - \text{го} \\ & \text{уровня иерархии,} \\ \{q_{I_i}' \mid i \in L_s\}, & \text{при рассмотрении } s > 0 - \text{го} \\ & \text{уровня иерархии,} \end{cases} \tag{8}$$

$$\mu(s) \in \mu(s_{L_s}), \mu(p_1) = \mu(p_2) = 1, \mu(p_s) = 1, 2, 3, \dots \tag{9}$$

Здесь: позиции q_I, s, q_{Δ} являются общими для вычислительных блоков ВСП_i⁰, $\forall i \in L_0$ и ВСП_i^s, $\forall i \in (L \setminus L_0) \setminus \{0\}$ (рис. 2, a-e), а позиция $s_{L_{s+1}}$ - общим для вычислительных



блоков $ВСП_{\Gamma(i)}$, $\forall i \in L \setminus L_0$ (рис. 2, ж-и); через позиции $s_{L_{s+1}}$, s и указателя $\& s_{L_s}$ осуществляется обмен информацией между вычислительными блоками нижнего $ВСП_{\Gamma_p}$ и верхнего $ВСП_{y_{np}}$ уровнями.

По завершении функционирования $ВСП_I$, вычислительный блок верхнего уровня $ВСП_{y_{np}}$ преобразует состояние позиции q_{U_0} из $\mu(q_{U_0}) = 0$ в $\mu(q_{U_0}) = U_0$, в результате чего запускается $ВСП_{II}$.

Вычислительный алгоритм, реализуемый при функционировании $ВСП_I$. Позиции, необходимые для хранения информационных маркеров при функционировании $ВСП_I$, определены в (3)-(8). Исходными данными для функционирования $ВСП_I$ являются состояния позиций из (2). Начальное состояние позиций s_{L_s} , p_1 из набора (3): $\mu(s_{L_s}) = \{q_{l(i)} \mid i \in L_0\}$; $\mu(p_1) = 1$. Остальные же позиции из данного набора (3) пустые, т.е. в них маркеры отсутствуют. Маркированные позиции на рис. 2 и 3 изображены как кружочки с фишками. Вычислительный алгоритм, заложенный в $ВСП_I$ (1), включает вычислительные процедуры, реализуемые при функционировании $ВСП_{y_{np}}$ и $ВСП_{\Gamma_p}$, взаимосвязанных через позиции $s_{L_{s+1}}$, s и указатель $\& s_{L_s}$.

1. Процедуры, реализуемые при функционировании $ВСП_{y_{np}}$ (рис. 2):

а) при $(\mu(p_s) = 0) \& (\mu(p_1) = 1) \& (\mu(s_{L_s}) \neq "")$, переход t_0^y - активный. Срабатывает $V(t_0^y)$, в результате чего $\mu(s) = q_{l(i)} \in \mu(s_{L_s})$ такое, что

$$\mu(q_{l(i)}) = \max \mu(\& s_{L_s}) = \max_{x \in \mu(s_{L_s})} \mu(x), \quad \mu(p_1) = 0; \tag{10}$$

б) при $(\mu(p_s) > 0) \& (\mu(p_1) = 1) \& (\mu(s_{L_s}) \neq "")$, переход t_1^y - активный. Срабатывает $V(t_1^y)$, в результате чего $\mu(s) = q_{l_i} \in \mu(s_{L_s})$ такое, что

$$\mu(q_{l_i}) = \min \mu(\& s_{L_s}) = \min_{x \in \mu(s_{L_s})} \mu(x), \quad \mu(p_1) = 0; \tag{11}$$

в) при $\mu(s) \neq ""$, переход t_2^y - активный. Срабатывает $V(t_2^y)$, в результате чего $\mu'(s_{L_s}) = \mu(s_{L_s}) \setminus \mu(s)$, $\mu(s) = ""$, $\mu(p_1) = 1$;

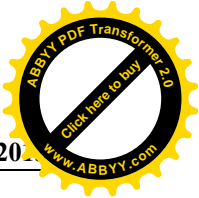
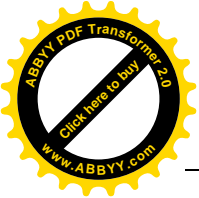
г) при $(\mu(p_1) = 1) \& (\mu(s_{L_s}) = "")$, переход t_3^y - активный. Срабатывает $V(t_3^y)$, в результате чего $\mu(p_2) = 1$, $\mu(p_1) = 0$;

д) при $(\mu(p_2) = 1) \& (\mu(s_{L_{s+1}}) \neq "")$, переход t_4^y - активный. Срабатывает $V(t_4^y)$, в результате чего

$$\mu(s_{L_s}) = \mu(s_{L_{s+1}}), \quad \mu(s_{L_{s+1}}) = "", \quad \mu(p_1) = 1, \quad \mu(p_2) = 0; \tag{12}$$

е) при $\mu(s) = \mu(s_0)$, переход t_5^y - активный. Срабатывает $V(t_5^y)$, в результате чего

$$\mu(q_{U_0}) = \mu(q_U). \tag{13}$$



ВСП_{упр}, управляя состоянием $\mu(s)$ позиции s (10), (11) на основе топологической информации $\mu(s_{L_{s+1}})$ (12), (14), поступающей в позицию $s_{L_{s+1}}$ от ВСП_{Гр}, управляет вычислительным процессом, протекающим при функционировании ВСП_{Гр}.

2. Процедуры, реализуемые при функционировании ВСП_{Гр} (11), состоящей из вычислительных блоков ВСП_{l₂}⁰, $\forall i_2 \in L_0$, ВСП_{l₂}^s, $\forall i_2 \in (L \setminus L_0) \setminus \{0\}$ и ВСП_{Г(i₁)}, $\forall i_1 \in L \setminus L_0$ (рис. 2):

а) при $\mu(s) = | (q_{l(i_2)})$, переход $t_{i_2}^0$ - активный. Срабатывает $V(t_{i_2}^0)$, в результате чего (рис. 2, а, б, в)

$$\mu(q_{l_{i_1, i_2}}) = \mu(q_{l_{i_2}}) = \mu(q_l) + \mu(q_{\Delta l}), \quad \mu'(q_l) = \mu(q_l) + \mu(q_{\Delta l}), \quad \mu(p_{K_{i_2}}) = 1; \quad (14)$$

б) при $\mu(s) = | (q_{l'_{i_2}})$ начинает функционировать ВСП_{l₂}^s, состоящая из вычислительных модулей $V(t_{i_2}^1)$, $V(t_{i_2}^2)$, $V(t_{i_2}^3)$ (рис. 2, з, д, е), т.е.

- при $(\mu(s) = | (q_{l'_{i_2}})) \& (\mu(q_{l'_{i_2}}) \leq \mu(q_l))$, переход $t_{i_2}^1$ - активный. Срабатывает $V(t_{i_2}^1)$, в результате чего $\mu(q_{l_{i_1, i_2}}) = \mu(q_l) + \mu(q_{\Delta l})$, $\mu'(q_l) = \mu(q_l) + \mu(q_{\Delta l})$, $\mu(p_{K_{i_2}}) = 1$; -

при $(\mu(s) = | (q_{l'_{i_2}})) \& (\mu(q_{l'_{i_2}}) > \mu(q_l))$, переход $t_{i_2}^2$ - активный. Срабатывает $V(t_{i_2}^2)$, в результате чего $\mu(q_{l_{i_1, i_2}}) = \mu(q_{l'_{i_2}})$, $\mu(q_l) = \mu(q_{l'_{i_2}})$;

- при $(\mu(q_{l_{i_1, i_2}}) > 0) \& (\mu(q_{l'_{i_2}}) = 0)$, переход $t_{i_2}^3$ - активный. Срабатывает $V(t_{i_2}^3)$, в результате чего $\mu(q_{l_{i_2}}) = \mu(q_{l_{i_1, i_2}}) - \mu(q_{l'_{i_2}})$;

в) при $(\mu(q_{l_{i_1, i_2}}) > 0, \forall i_2 \in \Gamma(i_1)) \& (\mu(q_{l'_{i_1}}) = 0)$, переход $t_{\Gamma(i_1)}$ - активный. Срабатывает $V(t_{\Gamma(i_1)})$, в результате чего (рис. 2, ж, з, и)

$$\mu(q_{l'_{i_1}}) = \sum_{i_2 \in \Gamma(i_1)} \mu(q_{l_{i_1, i_2}}), \quad (15)$$

$$\mu'(s_{L_{s+1}}) = \mu(s_{L_{s+1}}) \circ | (q_{l'_{i_1}}). \quad (16)$$

По окончании работы ВСП_Г начинает функционировать ВСП_П. Условием начала ее функционирования является наличие информационного маркера в позиции q_{U_0} , т.е. информации о напряжении в узле питания $\mu(q_{U_0}) = \mu(q_U) = U_0$ (13), (2). ВСП_П является объединением схем (графов) вычислительных блоков и модулей, показанных на рис. 2:

$$\text{ВСП}_{\text{П}} = \bigcup_{(i_1, i_2) \in \Gamma} \text{ВСП}_{i_1, i_2}, \quad (17)$$

где ВСП_{*i*₁,*i*₂}, $\forall (i_1, i_2) \in \Gamma$ - вычислительный блок ориентированной ветви $(i_1, i_2) \in \Gamma$, предназначенный для вычисления напряжения U_{i_2} и настраиваемого сопротивления R_{i_2} ; каждый блок ВСП_{*i*₁,*i*₂} состоит из трех взаимосвязанных вычислительных модулей $V(t_{i_2}^4)$, $V(t_{i_2}^5)$, $V(t_{i_2}^6)$ переходов, соответственно, $t_{i_2}^4$, $t_{i_2}^5$, $t_{i_2}^6$ (рис. 4).

В схеме ВСП_{II} предусмотрены позиции $\{q_{R_{i_1, i_2}} \mid (i_1, i_2) \in \Gamma\}$ для хранения исходных данных:

$$\mu(q_{R_{i_1, i_2}}) = R_{i_1, i_2}, \forall (i_1, i_2) \in \Gamma. \tag{18}$$

Позиции $\{q_{I_{i_1, i_2}} \mid (i_1, i_2) \in \Gamma\}$, $\{q_{I_i} \mid i \in L \setminus \{0\}\}$, q_{U_0} предназначены для хранения выходной информации ВСП_I (15), (16), являющейся одновременно входной для ВСП_{II}:

$$\mu(q_{I_{i_1, i_2}}) = I_{i_1, i_2}, \forall (i_1, i_2) \in \Gamma; \mu(q_{I_i}) = I_i, \forall i \in L \setminus \{0\}; \mu(q_{U_0}) = U_0. \tag{19}$$

Состояние процесса функционирования ВСП_{II} характеризуется состоянием позиций $\{q_{U_{i_1, i_2}} \mid (i_1, i_2) \in \Gamma\}$, $\{q_{U_i} \mid i \in L \setminus \{0\}\}$, $\{q_{R_i} \mid i \in L \setminus \{0\}\}$.

При наличии в них информационных маркеров, их состояние:

$$\mu(q_{U_{i_1, i_2}}) = U_{i_1, i_2}, \forall (i_1, i_2) \in \Gamma; \mu(q_{U_i}) = U_i, \forall i \in L \setminus \{0\}; \mu(q_{R_i}) = R_i, \forall i \in L \setminus \{0\}. \tag{20}$$

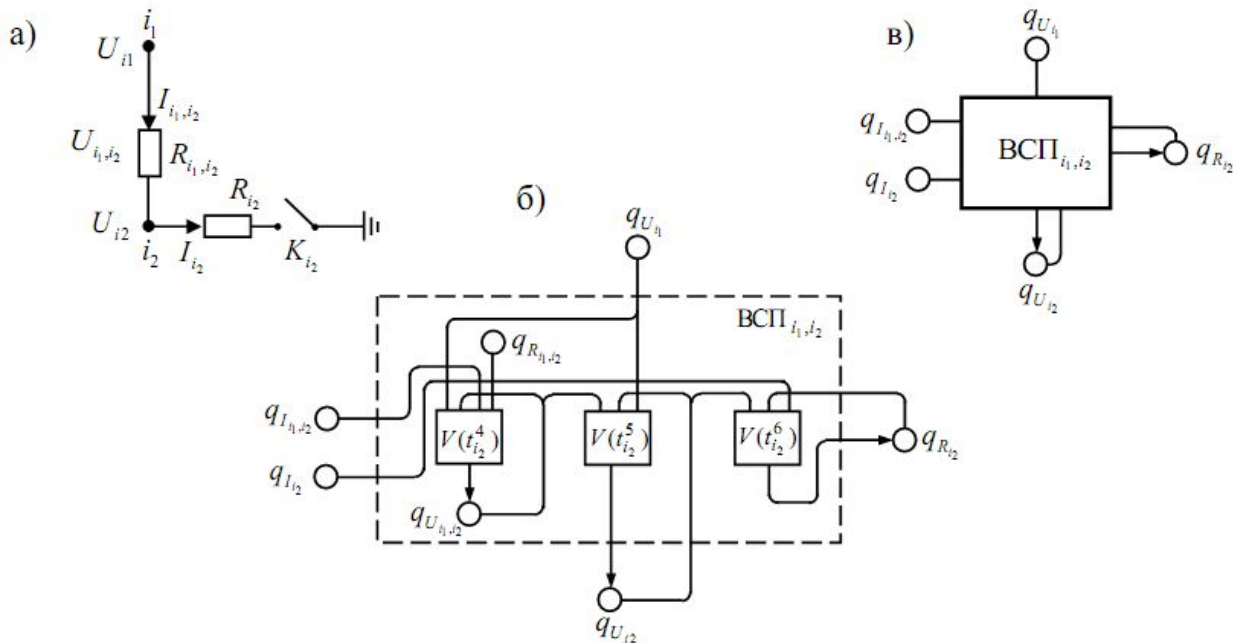
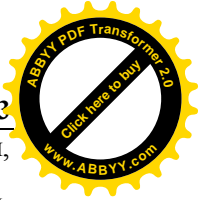
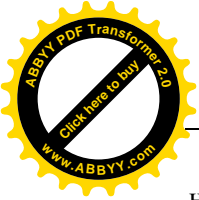


Рис. 4. ВСП ветвей (дуг) графа электрической сети информационных проводов



Вычислительный алгоритм, реализуемый при функционировании ВСП_{II}. Позиции, необходимые для хранения информационных маркеров при функционировании ВСП_{II}, определены в (20), а в (19) – определена входная информация, поступившая от ВСП_I. Исходными данными для функционирования ВСП являются состояния позиций из (18). Начальные состояния позиций из (20) – пустые, т.е. в них отсутствуют маркеры.

Вычислительный алгоритм, заложенный в ВСП_{II} (17), включает следующие вычислительные процедуры: при $(\mu(q_{U_{i1}}) > 0) \& (\mu(q_{U_{i1,i2}}) = 0)$, переход t_{i2}^4 - активный. Срабатывает $V(t_{i2}^4)$, в результате чего $\mu(q_{U_{i1,i2}}) = \mu(q_{R_{i1,i2}}) * \mu(q_{I_{i1,i2}})$; при $(\mu(q_{U_{i1,i2}}) > 0) \& (\mu(q_{U_{i2}}) = 0)$, переход t_{i2}^5 - активный. Срабатывает $V(t_{i2}^5)$, в результате чего $\mu(q_{U_{i2}}) = \mu(q_{U_{i1}}) - \mu(q_{U_{i1,i2}})$; при $(\mu(q_{U_{i2}}) > 0) \& (\mu(q_{I_{i2}}) > 0) \& (\mu(q_{R_{i2}}) = 0)$, переход t_{i2}^6 - активный. Срабатывает $V(t_{i2}^6)$, в результате чего $\mu(q_{R_{i2}}) = \mu(q_{U_{i2}}) / \mu(q_{I_{i2}})$.

Заключение. Таким образом, вычислительные сети Петри использованы для построения самоорганизующихся, многокомпонентных, вычислительных алгоритмов анализа топологии и проектирования системы дистанционной диагностики обрыва провода ВЛ РЭС 6-35 кВ.

Литература

1. Асанова С.М., Асанов М.С., Сатаркулов К.А. Проектирование системы дистанционной диагностики обрыва провода воздушных линий распределительных электрических сетей 6-35 кВ. Настоящий сборник.
2. Асанова С.М. Моделирующие возможности вычислительных сетей Петри и их использование в решении задач электроэнергетики. – Проблемы управления и автоматики: докл. II межд. конф. Кн. 2. НАН КР – Бишкек: ИАИТ, 2007. – С. 223–227.