

*Акмаев Э.Т.*

**ЖАЛПЫЛАШТЫРЫЛГАН МҮНӨЗДӨМӨЛӨР БОЮНЧА ЭЛЕКТР  
ЭНЕРГИЯСЫНЫН ЖОГОТУУЛАРЫНА БАА БЕРҮҮ УЧУРУНДАГЫ  
БӨЛҮШТҮРҮҮЧҮ ЭЛЕКТР ТҮЙҮНДӨРҮН ЭКВИВАЛЕНТТЕШТИРҮҮГӨ КАРАТА  
БОЛГОН ТҮЗҮМДӨШТҮРҮЛГӨН ИЕРАРХИКАЛЫК-КӨП ДЕҢГЭЭЛДҮҮ ЫКМА**

*Акмаев Э.Т.*

**СТРУКТУРИРОВАННЫЙ ИЕРАРХИЧЕСКИ-МНОГОУРОВНЕВЫЙ ПОДХОД К  
ЭКВИВАЛЕНТИРОВАНИЮ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ  
ПРИ ОЦЕНКЕ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПО ОБОБЩЕННЫМ  
ХАРАКТЕРИСТИКАМ**

*E. T. Aktaev*

**STRUCTURED HIERARCHICALLY - MULTILEVEL APPROACH  
TO EQUIVALENTING OF DISTRIBUTION POWER GRIDS IN EVALUATION OF  
ENERGY LOSSES BY GENERALIZED CHARACTERISTICS**

УДК: 621.3.01.712: 621.316.1: 621.3.017

*Жалпылаштырылган мүнөздөмөлөр боюнча электр энергиясынын жоготууларына баа берүү учурундагы тааал, 6-20 кВ бутактарга бөлүнгөн бөлүштүрүүчү электр түйүндөрүн (БЭТ) эквиваленттештирүүгө карата болгон түзүмдөштүрүлгөн иерархикалык-көп деңгээлдүү ыкма. Автор тарабынан БЭТтин түзүмдөштүрүлгөн модели баяндалып берилди. Дарак түзүлүшүндөгү  $n$  түйүндөрү жана  $m$  аянттары (сызыктуу жана трансформатордук) бар бутактарга бөлүнгөн БЭТ мисалында түйүндөрдү эквиваленттештирүүгө карата болгон түзүмдөштүрүлгөн иерархикалык-көп деңгээлдүү ыкманы мазмундук жактан баяндап берүү жүргүзүлдү.*

**Негизги сөздөр:** бөлүштүрүүчү электр түйүндөрү, эквиваленттүү каршылык, электр энергиясынын жоготуулары, иерархикалык-көп деңгээлдүү ыкма, дарак түрүндөгү түзүм, багытталган граф.

*Структурированный иерархически-многоуровневый подход к эквивалентированию сложных, разветвленных распределительных электрических сетей (РЭС) 6-20 кВ при оценке потерь электроэнергии по обобщенным характеристикам. Автором описана структурная модель распределительных электрических сетей (РЭС). Проведено содержательное описание структурированного иерархически-многоуровневого подхода к эквивалентированию сети на примере разветвленной распределительной электрической сети (РЭС) с  $n$  узлами и  $m$  участками (линейными и трансформаторными) с древовидной структурой.*

**Ключевые слова:** распределительные электрические сети, эквивалентное сопротивление, потери электроэнергии, структурированный иерархически-многоуровневый подход, древовидная структура, ориентированный граф.

*The purpose of the article is structured hierarchically - multilevel approach to equivalent of complex branched distribution power grids (DPG) of 6-20 kV in the evaluation of energy losses by generalized characteristics. The author describes DPG structural model. It has been made a narrative description of structured hierarchically - multilevel approach to equivalent of a power grid by the example of a branched*

*power grid with  $n$  nodes and  $m$  portions (line and transformer) with a tree - like structure.*

**Key words:** distribution power grids, equivalent resistance, energy losses, structured hierarchically multilevel approach, tree - like structure, directed graph.

Структурный анализ потерь электроэнергии, их нормирование, прогнозирование и т.д. требует определения потерь в целом по распределительным электрическим сетям (РЭС) каждого номинального напряжения. Эти задачи можно решить путем суммирования результатов поэлементных расчетов нагрузочных потерь по каждому участку сети. Однако такой путь решения требует значительных трудовых и материальных затрат на сбор, передачу и обработку исходной информации, а иногда, например для сетей 6-20 кВ, и невозможен. В таких случаях для определения суммарных (обобщенных) результатов можно применить такие расчетные методы, как эквивалентирование электрических сетей, где в качестве исходной информации используются их обобщенные характеристики [1,2]. Здесь критерием эквивалентирования является равенство потерь мощности в исходной и эквивалентной схемах сети.

В настоящей работе предлагается структурированный иерархически-многоуровневый подход к эквивалентированию сети. Достоинством такого подхода является то, что применение аппарата вычислительных сетей Петри [3, 4] для его реализации дает возможность построить самоорганизующийся многокомпонентный вычислительный алгоритм, удобный с позиций реализации его на ЭВМ, модификации и интерпретации.

**Постановка задачи.** Рассматривается разветвленная распределительная сеть с  $n$  узлами и  $m$  участками (линейными и трансформаторными) с древовидной структурой. Требуется произвести эквивалентирование сети путем замены ее одним эквива-

лентом с нагрузкой, равной нагрузке головного участка, и эквивалентным сопротивлением  $R_{ЭС} = R_{ЭЛ} + R_{ЭТ}$ , потери мощности в котором равны нагрузочным потерям мощности в исходной сети [1, 2], где  $R_{ЭС}$ ,  $R_{ЭЛ}$ ,  $R_{ЭТ}$  эквивалентные сопротивления, соответственно, сети, линии и распределительных трансформаторов (РТ). Считаются заданными: схема РЭС, сопротивления участков, нагрузки на конечных узлах сети.

Структурная модель РЭС. Далее схема РЭС представляется в виде ориентированного графа  $(L, \Gamma)$  с древовидной структурой, где  $L$  – множество узлов сети (вершин графа);  $\Gamma$  – отображение множества  $L$  в  $L$ , показывающее, как между собой связаны узлы сети из множества  $L$ , т.е.

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

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

$$\Gamma = \bigcup_{i \in L \setminus L_0} \Gamma_i, \quad L \setminus \{0\} = \bigcup_{i \in L \setminus L_0} \Gamma(i), \quad L_0 \subset L, \quad (3)$$

$$\tilde{A}(i) = \emptyset, \quad \Gamma_i = \emptyset, \quad \forall i \in L_0, \quad (4)$$

где  $\tilde{A}(i)$  – множество конечных вершин дуг (ориентированных ветвей), у которых начальной вершиной является узел  $i \in L \setminus L_0$ ;  $\tilde{A}_i$  – множество дуг  $(i, j)$ , у которых начальной вершиной является узел

$i \in L \setminus L_0$ ;  $L_0$  – множество конечных вершин графа  $(L, \Gamma)$ , т.е. конечных (нагрузочных) узлов сети;  $L \setminus L_0$  – множество промежуточных вершин графа  $(L, \Gamma)$ , включая его вершину  $i=0$ , т.е. промежуточных узлов, включая узел питания сети (головной участок).

Каждой конечной вершине  $i \in L_0$  графа  $(L, \Gamma)$  сети сопоставляется нагрузка  $X_i$ , а каждой дуге  $(i, j) \in \tilde{A}$  – сопротивление  $R_{ij}$  и поток  $x_{ij}$ , равный потоку  $X_j$ , протекающему через конечную вершину  $j$  данной дуги, т.е. потоку  $j$ -го узла сети

$$x_{ij} = X_j, \quad \forall (i, j) \in \tilde{A}. \quad (5)$$

Каждой конечной дуге  $(i, j) \in \tilde{A}^{KD}$  графа  $(L, \Gamma)$  сети, где  $\tilde{A}^{KD}$  – множество конечных дуг данного графа

$$\tilde{A}^{KD} = \{(i, j) \in \Gamma \mid j \in L_0\}, \quad (6)$$

соответствует распределительный трансформатор.

Примечание. Для ориентированного графа сети, приведенного на рис. 1, имеем:

$$L = \{0, 1, 2, \dots, 26\}, \quad L_0 = \{1, 2, 3, \dots, 13\},$$

$$L \setminus L_0 = \{0, 14, \dots, 26\},$$

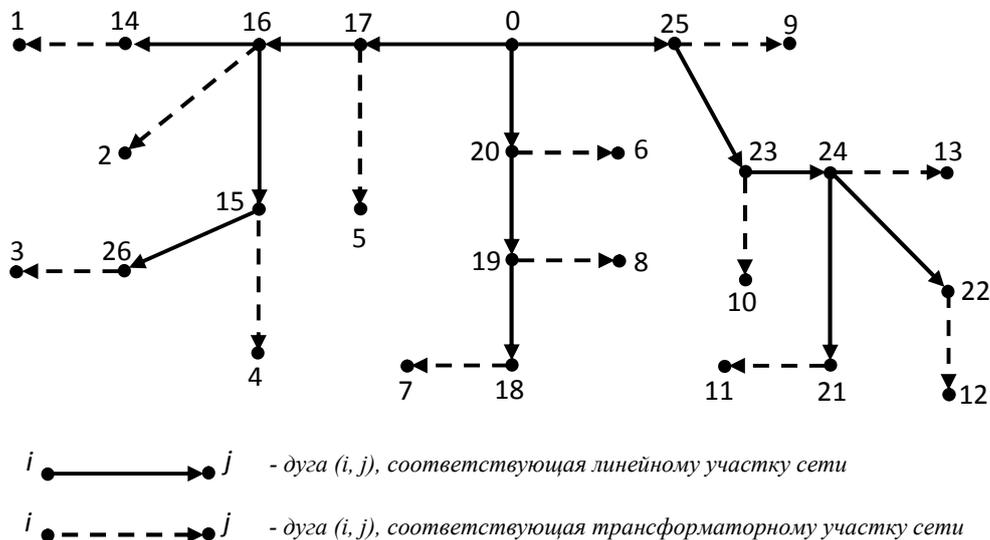


Рис. 1. Граф распределительной электрической сети.

где множества  $\tilde{A}(i)$ ,  $\tilde{A}_i$ ,  $\forall i \in L \setminus L_0$  из (1)-(4), соответствующие данному примеру, приведены в табл. 1; множество дуг  $\Gamma$  получается с помощью формулы из (3), т.е. объединением множеств  $\tilde{A}_i$ ,  $\forall i \in L \setminus L_0$  (см. табл.1).

**Таблица. Множества  $\Gamma(i)$  и  $\Gamma_i$ ,  $\forall i \in L \setminus L_0$  к примеру.**

	Множества $\Gamma(i)$ , $\forall i \in L \setminus L_0$	Множества $\Gamma_i$ , $\forall i \in L \setminus L_0$
1	$\tilde{A}(0) = \{17, 20, 25\}$	$\Gamma_0 = \{(0,17), (0,20), (0,25)\}$
2	$\tilde{A}(14) = \{1\}$	$\tilde{A}_{14} = \{(14,1)\}$
3	$\tilde{A}(15) = \{4, 26\}$	$\tilde{A}_{15} = \{(15,4), (15,26)\}$
4	$\tilde{A}(16) = \{2, 14, 15\}$	$\tilde{A}_{16} = \{(16,2), (16,14), (16,15)\}$
5	$\tilde{A}(17) = \{5, 16\}$	$\tilde{A}_{17} = \{(17,5), (17,16)\}$
6	$\tilde{A}(18) = \{7\}$	$\tilde{A}_{18} = \{(18,7)\}$
7	$\tilde{A}(19) = \{8, 18\}$	$\tilde{A}_{19} = \{(19,8), (19,18)\}$
8	$\tilde{A}(20) = \{6, 19\}$	$\tilde{A}_{20} = \{(20,6), (20,19)\}$
9	$\tilde{A}(21) = \{11\}$	$\tilde{A}_{21} = \{(21,11)\}$
10	$\tilde{A}(22) = \{12\}$	$\tilde{A}_{22} = \{(22,12)\}$
11	$\tilde{A}(23) = \{10, 24\}$	$\tilde{A}_{23} = \{(23,10), (23,24)\}$
12	$\tilde{A}(24) = \{13, 21, 22\}$	$\tilde{A}_{24} = \{(24,13), (24,21), (24,22)\}$
13	$\tilde{A}(25) = \{9, 23\}$	$\tilde{A}_{25} = \{(25,9), (25,23)\}$
14	$\tilde{A}(26) = \{3\}$	$\tilde{A}_{26} = \{(26,3)\}$

Множество конечных дуг рассматриваемого графа сети, т.е. множество дуг  $\tilde{A}^{KD}$ , соответствующих распределительным трансформаторам (6):

$$\tilde{A}^{KD} = \{(14,1), (16,2), (26,3), (15,4), (17,5), (20,6), (18,7), (19,8), (25,9), (23,10), (21,11), (22,12), (24,13)\}.$$

Существующие детерминированные методы расчета эквивалентных сопротивлений. В зависимости от информационной обеспеченности РЭС, в работах [1, 2] приведены различные варианты расчетных формул для вычисления эквивалентных сопротивлений  $R_{ЭС}$ ,  $R_{ЭЛ}$ ,  $R_{ЭТ}$ . Ниже эти формулы приведены в структурированной форме с учетом принятой в настоящей работе системы индексации и обозначений.

**Вариант 1.** Здесь считаются заданными токи нагрузок  $x_j = J_j$ ,  $\forall j \in L_0$  на конечных узлах сети. При этом эквивалентные сопротивления определяются по следующим формулам:

- расчетные формулы для вычисления эквивалентного сопротивления  $R_{ЭС}$  исходной сети, т.е. РЭС

$$R_{\dot{Y}\dot{N}} = \frac{\Delta P_{\dot{N}}}{3x_0^2}, \quad (7)$$

$$\Delta P_{\dot{N}} = \sum_{(i,j) \in \tilde{A}} \Delta P_{ij}, \quad (8)$$

$$\Delta P_{ij} = 3R_{ij}x_{ij}^2, \quad \forall (i, j) \in \tilde{A}, \quad (9)$$

$$x_{ij} = x_j = \sum_{k \in L^{(i,j)}} x_k, \quad \forall (i, j) \in \tilde{A}, \quad (10)$$

$$R_{ij} = \begin{cases} R_{ij}^T, & \text{при } (i, j) \in \Gamma^{KD}, \\ R_{ij}^{\tilde{e}}, & \text{при } (i, j) \in \Gamma \setminus \Gamma^{KD}, \end{cases} \quad (11)$$

где  $\Delta P_C$  - потери мощности в РЭС;  $\Delta P_{ij}$  - потери мощности на участке (дуге)  $(i, j) \in \tilde{A}$ ;  $R_{ij}^T$  - сопротивление трансформатора участка  $(i, j)$ ;  $R_{ij}^{\tilde{e}}$  - сопротивление линии участка  $(i, j)$ ;  $x_0$  - поток, соответствующий узлу питания сети (вершине  $i=0$  графа сети)

$$x_0 = \sum_{j \in L_0} x_j. \quad (12)$$

- расчетные формулы для вычисления эквивалентного сопротивления  $R_{ЭТ}$  распределительных трансформаторов РЭС

$$R_{\dot{Y}\dot{O}} = \frac{\Delta P_{\dot{O}}}{3x_0^2}, \quad (13)$$

$$\Delta P_{\dot{O}} = \sum_{(i,j) \in \tilde{A}^{KD}} \Delta P_{ij}, \quad (14)$$

$$\Delta P_{ij} = 3R_{ij}x_{ij}^2, \quad \forall (i, j) \in \tilde{A}^{KD} \quad (15)$$

$$x_{ij} = x_j = J_j, \quad \forall (i, j) \in \tilde{A}^{KD}. \quad (16)$$

- расчетная формула для вычисления эквивалентного сопротивления  $R_{ЭЛ}$  сети линий электропередач РЭС

$$R_{\dot{Y}\dot{E}} = R_{\dot{Y}\dot{N}} - R_{\dot{Y}\dot{O}}. \quad (17)$$

**Вариант 2.** Здесь, в отличие от варианта 1, вместо токов нагрузок  $x_j = J_j$ ,  $\forall j \in L_0$  на конечных узлах сети считаются заданными мощности нагрузок



Шаг 3. Формировать множество концевых дуг  $\Gamma^{KD}$  (6) и вычислить эквивалентное сопротивление  $R_{\Sigma T}$  распределительных трансформаторов

$$\Delta P_{ij} = 3R_{ij}x_j^2, \quad \forall (i, j) \in \tilde{A}^{KD},$$

$$\Delta P_{\dot{O}} = \sum_{(i,j) \in \tilde{A}^{KD}} \Delta P_{ij}, \quad R_{\dot{Y}\dot{O}} = \frac{\Delta P_{\dot{O}}}{3x_0^2}.$$

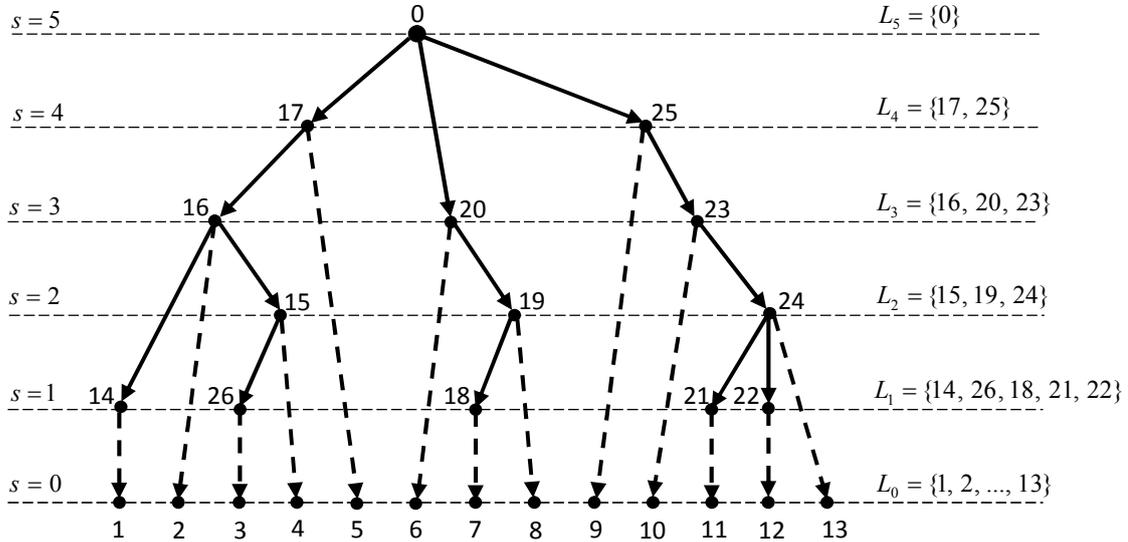


Рис. 3. Иерархически-многоуровневая структура исходного графа сети  $(L, \Gamma)$ .

Шаг 4. Задать начальное состояние потери мощности в сети  $\Delta P_N$  равным нулю, т.е.  $\Delta P_N^{(0)} = 0$ , и вычислить  $s = s + 1$ .

Шаг 5. Задать начальное состояние множеств  $L_s^B, L_s^H$ :  $L_s^B = L \setminus L_0, \quad L_s^H = L_0$ .

Шаг 6. Формировать множество  $L_s$  информационно обеспеченных вершин  $s$ -го уровня иерархии

$$L_s = \{i \in L_s^B \mid \Gamma(i) \subseteq L_s^H\}.$$

Шаг 7. Вычислить для каждой вершины  $i \in L_s$  поток  $x_i$

$$x_i = \sum_{j \in \Gamma(i)} x_j, \quad \forall i \in L_s.$$

Шаг 8. Вычислить для каждой ветви  $(i, j) \in \Gamma_i, \forall i \in L_s$  потерю мощности  $\Delta P_{ij}$

$$\Delta P_{ij} = 3R_{ij}x_j^2, \quad \forall (i, j) \in \tilde{A}_i, \quad \forall i \in L_s.$$

Шаг 9. Суммировать потери в ветвях для определения общей потери в сети  $\Delta P_{\tilde{N}}$

$$\Delta P_C^{(s)} = \Delta P_C^{(s-1)} + \sum_{(i,j) \in \Gamma_{L_s}} \Delta P_{ij}, \quad \text{где } \Gamma_{L_s} = \bigcup_{i \in L_s} \Gamma_i.$$

Шаг 10. Вычислить  $s = s + 1$ .

Шаг 11. Вычислить новое состояние множеств  $L_s^B, L_s^H$

$$L_s^B = L_{s-1}^B \setminus L_{s-1}, \quad L_s^H = L_{s-1}^H \cup L_{s-1}, \quad \text{где } L_s^B \cup L_s^H = L, \quad \forall s \in \{1, 2, \dots\}.$$

Шаг 12. Если  $L_s^B \neq \emptyset$  (или  $L_s^H \neq L$ ), то перейти к шагу 6, иначе - перейти к шагу 13.

Шаг 13. Вычислить максимальное количество уровней  $S_{\max}$  в иерархически-многоуровневой структуре сети  $s_{\max} = s - 1$ .

Шаг 14. Вычислить эквивалентное сопротивление  $R_{\Sigma C}$  исходной сети

$$R_{\dot{Y}\tilde{N}} = \frac{\Delta P_N^{(s-1)}}{3x_0^2}.$$

Шаг 15. Вычислить эквивалентное сопротивление  $R_{\Sigma L}$  сети линий электропередач  $R_{\dot{Y}\tilde{E}} = R_{\dot{Y}\tilde{N}} - R_{\dot{Y}\dot{O}}$ .

Шаг 16. Останов.

**Выводы.** В настоящей работе, на примере сложной разветвленной РЭС, был предложен структурированный иерархически-многоуровневый подход к эквивалентированию распределительных электрических сетей при оценке потерь электроэнергии по обобщенным характеристикам. Для реализации данного подхода, применение аппарата вычислительных сетей Петри позволит получить самоорганизующийся многокомпонентный вычислительный алгоритм, удобный с позиций реализации его на ЭВМ, его модификации и интерпретации.

**Литература:**

1. Фурсанов М.И. Определение и анализ потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем / М.И. Фурсанов. - МН.: УВИЦ при УП (Белэнергосбережение), 2005.
2. Пономаренко И.С. Автоматизация процессов управления эксплуатацией в системах электроснабжения городов: учебное пособие для вузов / И.С. Пономаренко. - М.: Изд-во МЭИ, 1990. - С. 70.
3. Асанов М.С. Структурная модель вычислительных сетей Петри / М.С. Асанов, С.М. Асанова, К.А. Сатаркулов // Известия КГТУ. - Б., 2008. - №13. - С. 78-85.
4. Асанов М.С. Вычислительные компоненты, язык описания и правила функционирования вычислительных сетей Петри / М.С. Асанов, С.М. Асанова, К.А. Сатаркулов // Известия КГТУ. - Бишкек, 2008. - №13. - С. 85-95.
5. Актаев Э.Т. Структурированный иерархически-многоуровневый подход к поэлементному расчету нагрузочных потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях / Э.Т. Актаев, С.М. Асанова, К.А. Сатаркулов // Известия КГТУ. - Б., 2015. - №3(36). - С. 151-158.

**Рецензент: к.т.н., доцент Сатаркулов К.А.**

---