

Асанова С.М., Актаев Э.Т.

**АЗЫКТАНУУ БУЛАГЫНЫН БЕРИЛГЕН ЖУКТӨРҮ ЖАНА
ЧЫҢАЛУУСУ УЧУРУНДАГЫ 35 кВ ЖАНА АНДАН ЖОГОРКУ
АЖЫРАТЫЛГАН ЭЛЕКТР ТҮЙҮНДӨРҮНДӨГҮ ЭЛЕКТР ЭНЕРГИЯСЫНЫН
ЖОГОТУУЛАРЫН ЭСЕПТӨӨГӨ КАРАТА БОЛГОН ТҮЗҮМДӨШТҮРҮЛГӨН
ИЕРАРХИКАЛЫК-КӨП ДЕҢГЭЭЛДҮҮ ЫКМА**

Асанова С.М., Актаев Э.Т.

**СТРУКТУРИРОВАННЫЙ ИЕРАРХИЧЕСКИ-МНОГОУРОВНЕВЫЙ
ПОДХОД К РАСЧЕТУ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РАЗОМКНУТЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 35 кВ И ВЫШЕ ПРИ ЗАДАННЫХ НАГРУЗКАХ И
НАПРЯЖЕНИИ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ**

S.M. Asanova, E.T. Aktaev

**STRUCTURED HIERARCHICALLY-TIERED APPROACH TO CALCULATING
ENERGY LOSSES IN OPEN-LOOP ELECTRIC NETWORKS OF 35 KV AND ABOVE
FOR A GIVEN LOAD AND SUPPLY VOLTAGE**

УДК: 621.3.017: 621.3.045.24

Бул эмгекте азыктануу булагынын берилген жуктөрү жана чыңалуусу учурундагы 35 кВ жана андан жогорку ажыратылган электр түйүндөрүндөгү электр энергиясынын жоготууларын эсептөөгө карата болгон түзүмдөштүрүлгөн иерархикалык-көп деңгээлдүү ыкмасы сунушталат. Бул иерархикалык-көп деңгээлдүү түзүлүш түрүндөгү баштапкы графага жана салттуу (кол менен) инженердик эки этаптуу ыкманы пайдаланууга негизделген.

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

В настоящей работе предлагается структурированный иерархически-многоуровневый подход к расчету режимов и потерь электроэнергии в разомкнутых электрических сетях 35 кВ и выше при заданных нагрузках и напряжении источника питания, основанный на представлении исходного графа разомкнутой сети в виде иерархически-многоуровневой структуры и на использовании традиционного (ручного) инженерного двухэтапного метода.

Ключевые слова: распределительные электрические сети, потери электроэнергии, структурированный иерархически-многоуровневый подход, нагрузка, древовидная структура, ориентированный граф, алгоритм.

In this paper a hierarchically structured-tiered approach to the calculation of modes and energy losses in open-loop electric networks of 35 kV and above for a given load and supply voltage based on performance of the open source graph network in the form of a hierarchically-layered structure and on the use of traditional (manual) two-step engineering method.

Key words: distributive electric networks, electric power losses, hierarchically structured-tiered approach, load, tree structure, directed graph, algorithm.

Согласно [1-3], к особенностям задач расчета потерь электроэнергии в разомкнутых электрических сетях с номинальным напряжением $U_{ин} \geq 35$ кВ, в отличие от задач расчета потерь в сетях с $U_{ин} < 35$ кВ, относятся: учет зарядной мощности линий Q_C ; учет потерь на корону в воздушных линиях $\Delta P_{кор}$; учет потерь мощности ΔS на участках при расчете потоков мощности S в сети; учет продольной ΔU_i поперечной δU составляющих падения напряжения на участках сети, рассчитанных по действительному напряжению U сети, а не по номинальному $U_{ном}$.

Сети с $U_{ин} \geq 35$ кВ по конфигурации подобны сетям 6-20 кВ, а с точки зрения режимной информации достаточно обеспечены и больше примыкают к замкнутым электрическим сетям [2].

Эти специфические особенности сетей с $U_{ин} \geq 35$ кВ указывают на то, что для определения потерь электроэнергии потребуется решение задач расчета их режимов, т.е. определение неизвестных напряжений в узлах, потоков и потерь мощности на их участках (линейных и трансформаторных). Эти расчеты [1-3] выполняются, как правило, при заданных напряжении источника питания и постоянных значениях нагрузок на стороне низшего напряжения понижающих потребительских подстанций (именно такой способ задания исходной информации наиболее отвечает условиям эксплуатации и характерен для рассматриваемых электрических сетей).

Методика расчета [1-3] режимов разомкнутых электрических сетей при задании указанных режимных параметров является итерационной и, при этом, каждая итерация включает следующие два этапа:

- на первом этапе (снизу вверх) определяются потоки и потери мощности в линиях и трансформаторах от нагрузок до источника питания;

- на втором этапе (сверху вниз) вычисляются напряжения в узлах от источника питания до нагрузок. Процедура (два этапа) повторяется до получения заданной точности расчета.

Анализ данной методики показывает, что для ее реализации потребуется решение задачи анализа топологии рассматриваемой сети и разработки для ее решения универсального эффективного алгоритма, пригодного для любой конфигурации разомкнутой сети.

В настоящей работе предлагается структурированный иерархически-многоуровневый подход к расчету режимов и потерь электроэнергии в разомкнутых электрических сетях 35 кВ и выше при заданных нагрузках и напряжении источника питания. Достоинством такого подхода является то, что применение аппарата вычислительных сетей Петри [4, 5] для его реализации дает возможность построить самоорганизующийся многокомпонентный вычислительный алгоритм, удобный с позиций реализации его на ЭВМ, модификации и интерпретации, а также с позиции организации параллельно-последовательных вычислений с целью повышения быстродействия расчета.

Постановка задачи. Рассматривается разветвленная сеть 35 кВ и выше с n узлами и t участками (линейными и трансформаторными) с древовидной структурой с одним номинальным напряжением. Считаются заданными: схема сети; мощности нагрузок; сопротивления и проводимости участков; напряжение источника питания. Требуется определить: неизвестные напряжения в узлах; потоки и потери мощности на участках; потери электроэнергии в сети в целом.

Структурная модель сети. Далее схема разомкнутой электрической сети представляется в виде ориентированного графа (L, Γ) с древовидной структурой (см. рис. 1), где L – множество узлов сети (вершин графа); Γ – отображение множества L в L , показывающее, как между собой связаны узлы сети из множества L , т.е.

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

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

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

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

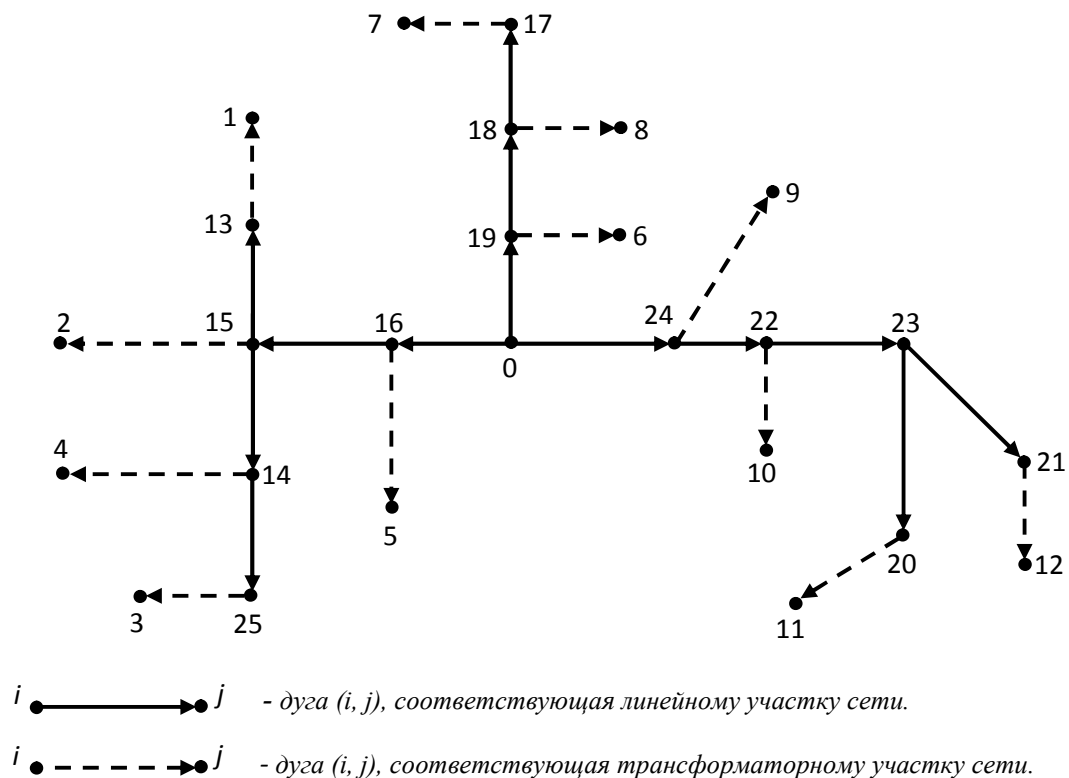


Рис. 1. Граф разомкнутой электрической сети.

где $\tilde{A}(i)$ - множество концевых 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, \tilde{A}) , т.е. конечных (нагрузочных) узлов сети; $L \setminus L_0$ - множество промежуточных вершин графа (L, \tilde{A}) , включая его вершину $i=0$, т.е. промежуточных узлов, включая узел питания сети.

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

$$\tilde{A}^{KD} = \{(i, j) \in \Gamma \mid j \in L_0\}, \quad (5)$$

соответствует двухобмоточный трансформатор, схема замещения которого показана на рисунке 2, а. Каждой промежуточной дуге $(i, j) \in \tilde{A} \setminus \tilde{A}^{\tilde{A}}$ соответствует линия электропередачи, схема замещения которой показана на рисунке 2, б. Здесь приняты следующие обозначения: $\underline{S}_{ij}^{i\dot{a}+}$, $\underline{S}_{ij}^{e\dot{a}}$ - потоки мощностей, соответственно, в начале и в конце участка $(i, j) \in \tilde{A}$; $\underline{S}_{ij}^{i\dot{a}+Z}$, $\underline{S}_{ij}^{e\dot{a}Z}$ - потоки мощностей, соответственно, в начале и в конце сопротивления \underline{Z}_{ij} участка $(i, j) \in \tilde{A}$; \underline{S}_j - мощность, протекающая через узел $j \in L$ (поскольку потоки мощностей направлены от узла источника питания $i=0$ к множеству узлов нагрузки L_0 (см. рис.1), то $\underline{S}_{ij}^{e\dot{a}} = \underline{S}_j$, $\forall (i, j) \in \Gamma$); \underline{U}_i , \underline{U}_j - напряжения узлов, соответственно, в начале и в конце участка $(i, j) \in \tilde{A}$; $\underline{S}_{oij}^{i\dot{a}+}$, $\underline{S}_{oij}^{e\dot{a}}$ - потоки мощностей (потери) в шунтах, т.е. в поперечных ветвях, соответственно, в начале и в конце участка $(i, j) \in \tilde{A}$; $\Delta \underline{S}_{ij(k)}$ - потери мощности в сопротивлении \underline{Z}_{ij} ; ΔP_{xij} - потери активной мощности в стали трансформатора на перемагничивание (гистерезис) и вихревые токи; ΔQ_{xij} - потери реактивной мощности в стали трансформатора на ее намагничивание; $\Delta P_{e\dot{a}ij}$ - потери активной мощности на корону (или в изоляции); Q_{cij} - зарядная мощность.

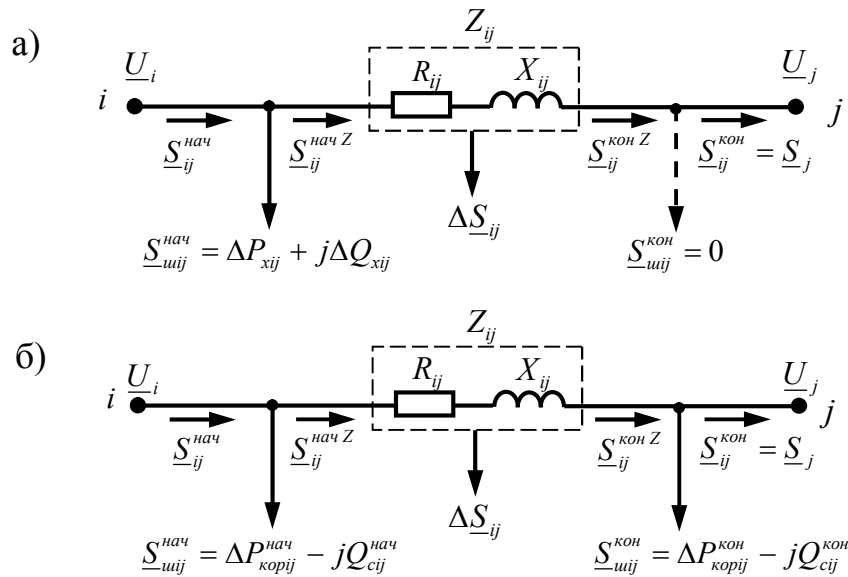


Рис. 2. Схемы замещения участков сети, где а – схема замещения трансформаторного участка сети, б – схема замещения линейного участка сети.

Далее, для расчета вышеперечисленных параметров режима, используются следующие параметры элементов сети: R_{ij} , X_{ij} - соответственно, активное и реактивное сопротивление продольной ветви участка $(i, j) \in \tilde{A}$; g_{ij} , b_{ij} - соответственно, активная и реактивная проводимости в поперечных ветвях участка $(i, j) \in \tilde{A}$.

П р и м е р. Для ориентированного графа сети, приведенного на рис. 1, имеем: $L = \{0, 1, 2, \dots, 25\}$; $L_0 = \{1, 2, 3, \dots, 12\}$; $L \setminus L_0 = \{0, 13, \dots, 25\}$;

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

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

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

Таблица. Множества $\Gamma(i)$ и Γ_i , $\forall i \in L \setminus L_0$

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

Содержательное описание структурированного иерархически-многоуровневого подхода к расчету режимов и потерь электроэнергии в разомкнутых электрических сетях с $U_{ном} \geq 35$ кВ.

Как было сказано выше, для расчета режимов и потерь электроэнергии в разомкнутых сетях с $U_{ном} \geq 35$ кВ при заданных нагрузках на конечных узлах \underline{S}_i , $\forall i \in L_0$ и напряжении источника питания \underline{U}_0 (при $i=0$), используется двухэтапный итерационный метод [1-3]. В рамках каждой k -ой итерации расчет выполняется в два этапа:

- на первом этапе (снизу вверх) определяются режимные параметры $\underline{S}_{ij(k)}^{кон}$, $\underline{S}_{uij(k)}^{кон}$, $\underline{S}_{ij(k)}^{конZ}$, $\Delta \underline{S}_{ij(k)}$, $\underline{S}_{ij(k)}^{начZ}$, $\underline{S}_{uij(k)}^{нач}$, $\underline{S}_{ij(k)}^{нач}$ всех участков $(i, j) \in \Gamma$ по определенной последовательности от нагрузок до источника питания. На данном этапе в расчетных формулах в качестве напряжений узлов сети принимаются напряжения $\underline{U}_{i(k-1)}$, $\forall i \in L \setminus \{0\}$, рассчитанные на втором этапе предыдущего $(k-1)$ -го такта итерации. При $k=1$, $\underline{U}_{i(0)} = U_{ном}$, $\forall i \in L \setminus \{0\}$.

- на втором этапе вычисляются в обратном порядке (сверху вниз) напряжения в узлах $\underline{U}_{i(k)}$, $\forall i \in L \setminus \{0\}$ от источника питания до нагрузок по известному напряжению \underline{U}_0 источника и потокам мощностей $\underline{S}_{ij(k)}^{начZ}$, $(i, j) \in \Gamma$, определенным на первом этапе текущего k -го такта итерации.

Здесь, для установления и организации такой последовательности вычислений, по аналогии с [6], вводятся следующие понятия:

- на первом этапе расчета вершина $i \in L \setminus L_0$ графа сети называется информационно обеспеченной, если потоки \underline{S}_j , $\forall j \in \Gamma(i)$ определены;

- на втором этапе расчета вершина $j \in L \setminus \{0\}$ называется информационно обеспеченной, если напряжение \underline{U}_i в начале участка $(i, j) \in \Gamma$ определено.

С учетом введенных понятий, исходный граф сети можно представить, путем соответствующих преобразований, в виде иерархически-многоуровневой структуры (для рассматриваемого примера сети см. рис. 3), содержащей информацию о последовательности информационно обеспеченных вычислений для определения потоков мощностей на первом этапе и напряжений в узлах сети на втором этапе. Функциональная схема иерархически-многоуровневого подхода к расчету режимов и потерь электроэнергии показана на рисунке 4.

Предлагаемый подход содержит следующие шаги.

1. Представление исходного графа сети в виде иерархически-многоуровневой структуры.

Шаг 0. Вычислить $s=0$ и формировать множество вершин $s=0$ -го уровня иерархии из концевых вершин исходного графа сети, т.е. множество L_0 .

Шаг 1. Формировать начальное состояние множеств L_s^B, L_s^H (при $s=0$):

$$L_0^B = L \setminus L_0, \quad L_0^H = L_0. \quad (6)$$

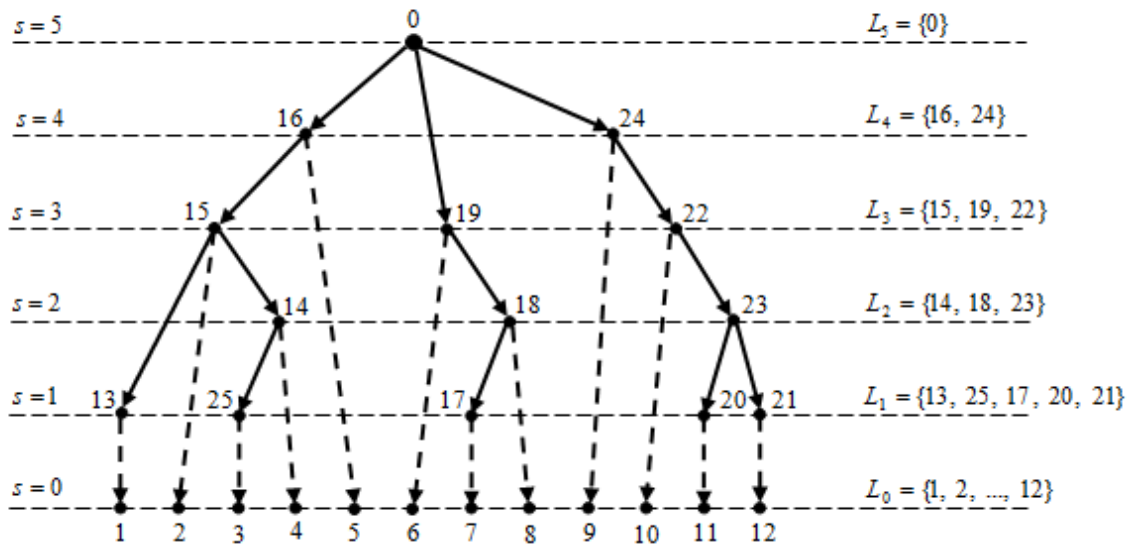


Рис. 3. Иерархически-многоуровневая структура исходного графа сети (L, Γ) .

Шаг 2. Вычислить номер следующего верхнего уровня иерархии: $s=s+1$.

Шаг 3. Формировать множество L_s информационно обеспеченных вершин s -го уровня иерархии:

$$L_s = \{i \in L_{s-1}^B \mid \Gamma(i) \subseteq L_{s-1}^H\}. \quad (7)$$

Шаг 4. Вычислить новое состояние множеств L_s^B, L_s^H :

$$L_s^B = L_{s-1}^B \setminus L_s, \quad (8)$$

$$L_s^H = L_{s-1}^H \cup L_s, \quad (9)$$

где $L_s^B \cup L_s^H = L, \forall s \in \{0, 1, 2, \dots\}$.

Шаг 5. Если $L_s^B = \emptyset$ (или $L_s^H = L$), то перейти к шагу 6, иначе перейти к шагу 2.

Шаг 6. Вычислить количество уровней s_{\max} в иерархически-многоуровневой структуре сети: $s_{\max}=s$.

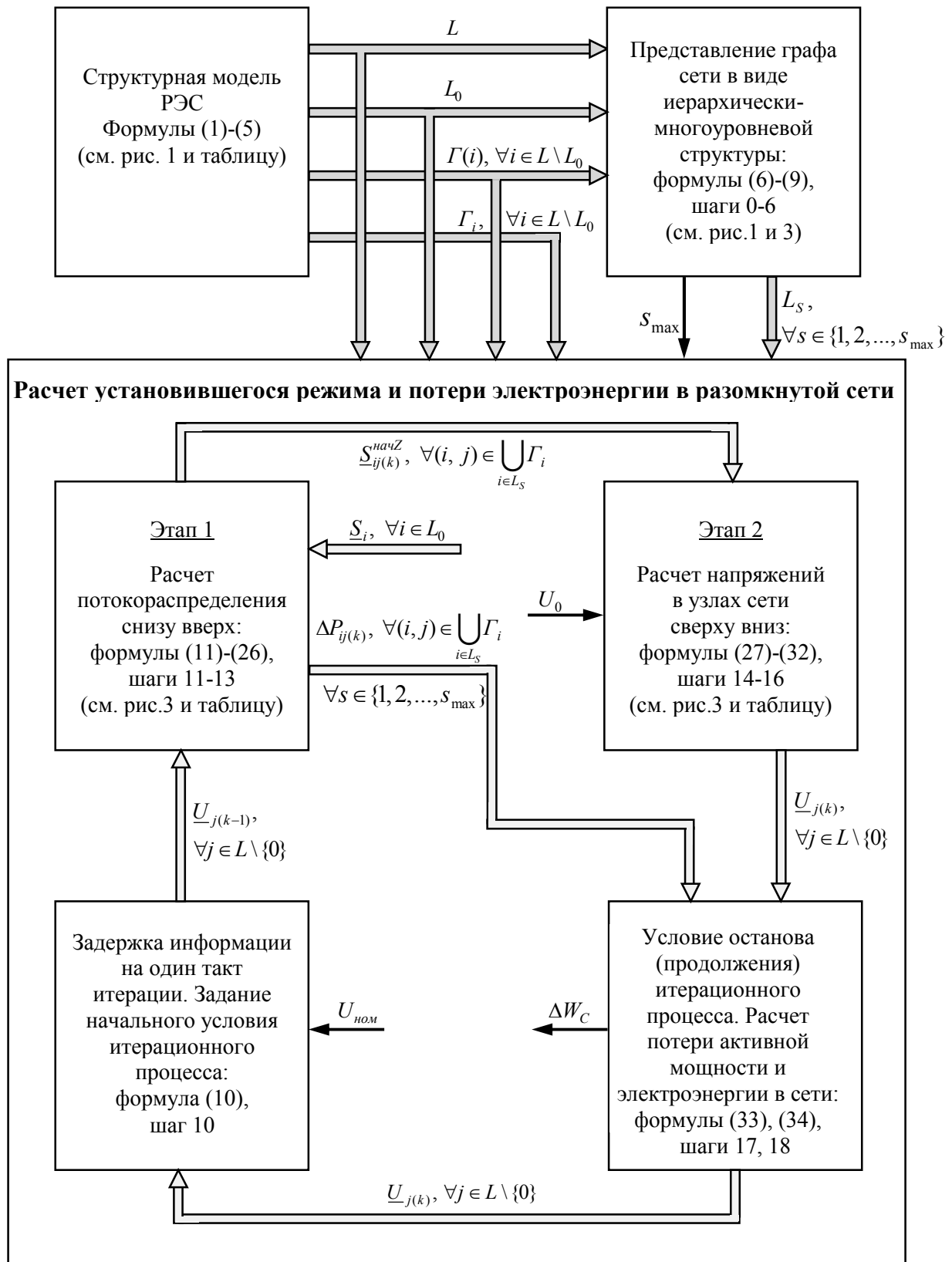


Рис. 4. Функциональная схема структурированного иерархически-многоуровневого подхода к расчету режимов и потерь электроэнергии в разомкнутых электрических сетях с $U_{\text{ин}} \geq 35$ кВ.

Шаг 7. Задать мощности нагрузок $\underline{S}_j, \forall j \in L_0$ и напряжение источника питания U_0 – напряжение узла $i=0$.

2. Расчет установившегося режима и потери электроэнергии в разомкнутой сети.

Шаг 8. Вычислить $k=0$, и на $k=0$ -ом такте итерации принять напряжения в узлах $\underline{U}_{i(0)}, \forall i \in L \setminus \{0\}$ равным $U_{ном}$:

$$\underline{U}_{i(0)} = U_{ин} , \quad \forall i \in L \setminus \{0\}. \quad (10)$$

Шаг 9. Вернуться к нулевому уровню иерархии: $s = 0$.

Шаг 10. Вычислить номер следующего такта итерации: $k = k + 1$.

Первый этап. Расчет потокораспределения снизу вверх (см. рис.3).

Шаг 11. Вычислить номер следующего верхнего уровня иерархии: $s=s+1$.

Шаг 12. Вычислить потоки мощностей в узлах $\underline{S}_{i(k)}, \forall i \in L_s$, соответствующих информационно обеспеченным вершинам из L_s -го уровня иерархии:

а) вычислить потоки мощностей в начале участков $\underline{S}_{ij(k)}^{ia+}, \forall (i, j) \in \bigcup_{i \in L_s} \Gamma_i$ в следующей

последовательности:

- вычислить мощности на концах участков

$$\underline{S}_{ij(k)}^{\hat{e}ii} = \underline{S}_{j(k)}, \quad \forall (i, j) \in \bigcup_{i \in L_s} \Gamma_i; \quad (11)$$

- вычислить мощности в шунтах на концах участков

$$\underline{S}_{ij(k)}^{\hat{e}ii} = \begin{cases} 0, & \text{при } j \in L_0, \\ \Delta P_{\hat{e}i\delta ij(k)}^{\hat{e}ii} - jQ_{cij(k)}^{\hat{e}ii}, & \text{при } j \notin L_0, \end{cases} \quad \forall (i, j) \in \bigcup_{i \in L_s} \Gamma_i, \quad (12)$$

$$\text{где} \quad \Delta P_{\hat{e}i\delta ij(k)}^{\hat{e}ii} = U_{j(k-1)}^2 g_{ij}^{\hat{e}ii}; \quad (13)$$

$$Q_{cij(k)}^{\hat{e}ii} = U_{j(k-1)}^2 b_{ij}^{\hat{e}ii}; \quad (14)$$

-вычислить мощности в концах сопротивлений участков

$$\underline{S}_{ij(k)}^{\text{кон}Z} = \underline{S}_{ij(k)}^{\text{кон}} + \underline{S}_{uij(k)}^{\text{кон}}, \quad \forall (i, j) \in \bigcup_{i \in L_s} \Gamma_i; \quad (15)$$

- вычислить потери мощности в сопротивлениях участков

$$\Delta \underline{S}_{ij(k)} = \Delta P_{ij(k)} + j\Delta Q_{ij(k)}, \quad \forall (i, j) \in \bigcup_{i \in L_s} \Gamma_i, \quad (16)$$

$$\text{где} \quad \Delta P_{ij(k)} = \frac{(S_{ij(k)}^{\text{кон}Z})^2}{U_{j(k-1)}^2} R_{ij}; \quad (17)$$

$$\Delta Q_{ij(k)} = \frac{(S_{ij(k)}^{\text{кон}Z})^2}{U_{j(k-1)}^2} X_{ij}. \quad (18)$$

- вычислить мощности в началах сопротивлений участков

$$\underline{S}_{ij(k)}^{\text{нач}Z} = \underline{S}_{ij(k)}^{\text{кон}Z} + \Delta \underline{S}_{ij(k)} = P_{ij(k)}^{\text{нач}Z} + jQ_{ij(k)}^{\text{нач}Z}, \quad \forall (i, j) \in \bigcup_{i \in L_s} \Gamma_i; \quad (19)$$

- вычислить мощности в шунтах в началах участков

$$\underline{S}_{uij(k)}^{\text{нач}} = \begin{cases} \Delta P_{xij(k)} + j\Delta Q_{xij(k)}, & \text{при } j \in L_0, \\ \Delta P_{корij(k)}^{\text{нач}} - jQ_{cij(k)}^{\text{нач}}, & \text{при } j \notin L_0, \end{cases} \quad \forall (i, j) \in \bigcup_{i \in L_s} \Gamma_i, \quad (20)$$

$$\text{где} \quad \Delta P_{xij(k)} = U_{i(k-1)}^2 g_{ij}^T; \quad (21)$$

$$\Delta Q_{xij(k)} = U_{i(k-1)}^2 b_{ij}^T; \quad (22)$$

$$\Delta P_{корij(k)}^{нач} = U_{i(k-1)}^2 g_{ij}^{нач}; \quad (23)$$

$$Q_{cij(k)}^{нач} = U_{i(k-1)}^2 b_{ij}^{нач}; \quad (24)$$

-вычислить мощности в началах участках

$$\underline{S}_{ij(k)}^{нач} = \underline{S}_{ij(k)}^{начZ} + \underline{S}_{uij(k)}^{нач}, \quad \forall (i, j) \in \bigcup_{i \in L_s} \Gamma_i; \quad (25)$$

б) имея мощности $\underline{S}_{ij(k)}^{нач}, \forall (i, j) \in \bigcup_{i \in L_s} \Gamma_i$, определенные на основе расчетных формул (11)-(25),

вычислить потоки мощностей в узлах $\underline{S}_{i(k)}, \forall i \in L_s$, соответствующих информационно обеспеченным вершинам из L_s -го уровня иерархии:

$$\underline{S}_{i(k)} = \sum_{j \in \Gamma(i)} \underline{S}_{ij(k)}^{нач}, \quad \forall i \in L_s. \quad (26)$$

Шаг 13. Если $S < S_{\max}$, то перейти к шагу 11, иначе – к шагу 14.

Второй этап. Расчет напряжений в узлах сети сверху вниз (см. рис.3).

Шаг 14. Вычислить напряжения в концах участков $\underline{U}_{j(k)}, \forall j \in \bigcup_{i \in L_s} \Gamma(i)$, соответствующих информационно

обеспеченным вершинам из $\bigcup_{i \in L_s} \Gamma(i)$ s -го уровня иерархии:

а) вычислить падения напряжений на участках

$$\Delta \underline{U}_{ij(k)}^{начZ} = \Delta U_{ij(k)}^{начZ} + j \delta U_{ij(k)}^{начZ}, \quad \forall (i, j) \in \bigcup_{i \in L_s} \Gamma_i, \quad (27)$$

где
$$\Delta U_{ij(k)}^{начZ} = \frac{P_{ij(k)}^{начZ} R_{ij} + Q_{ij(k)}^{начZ} X_{ij}}{U_{i(k)}}, \quad (28)$$

$$\delta U_{ij(k)}^{начZ} = \frac{P_{ij(k)}^{начZ} X_{ij} - Q_{ij(k)}^{начZ} R_{ij}}{U_{i(k)}}. \quad (29)$$

б) имея падения напряжений $\Delta \underline{U}_{ij(k)}^{начZ}, \forall (i, j) \in \bigcup_{i \in L_s} \Gamma_i$, определенные на основе расчетных формул (27)-

(29), вычислить напряжения в узлах на концах участков $\underline{U}_{j(k)}, \forall j \in \bigcup_{i \in L_s} \Gamma(i)$ и их модули $U_{j(k)}$ и фазы (аргументы) $\delta_{j(k)}$

$$\underline{U}_{j(k)} = \underline{U}_{i(k)} - \Delta \underline{U}_{ij(k)}^{начZ}, \quad (30)$$

$$U_{j(k)} = \sqrt{(U_{i(k)} - \Delta U_{ij(k)}^{начZ})^2 + (\delta U_{ij(k)}^{начZ})^2}, \quad (31)$$

$$\delta_{j(k)} = \arctg \frac{\delta U_{ij(k)}^{начZ}}{U_{i(k)} - \Delta U_{ij(k)}^{начZ}}. \quad (32)$$

Шаг 15. Вычислить номер следующего нижнего уровня иерархии: $s = s - 1$.

Шаг 16. Если $s > 0$, то перейти к шагу 14, иначе – к шагу 17.

Шаг 17. Если $|U_{j(k+1)} - U_{j(k)}| > \varepsilon, \forall j \in L_0$, то перейти к шагу 10, иначе – к шагу 18.

Шаг 18. Вычислить суммарные потери активной мощности ΔP_C и электрической энергии ΔW_C в сети:

$$\Delta P_C = \sum_{(i,j) \in \Gamma} \Delta P_{ij}; \quad (33)$$

$$\Delta W_C = \Delta t \Delta P_C, \quad (34)$$

где Δt - интервал времени, в течение которого напряжение источника и мощности нагрузок постоянны, т.е.

$$\underline{U}_0 = const, \quad \underline{S}_j = const, \quad \forall j \in L_0. \quad (35)$$

Заключение. В настоящей работе разработан структурированный иерархически-многоуровневый подход к расчету режимов и потерь электроэнергии в разомкнутых электрических сетях 35 кВ и выше при заданных нагрузках и напряжении источника питания, основанный на представлении исходного графа разомкнутой сети в виде иерархически-многоуровневой структуры и на использовании традиционного (ручного) инженерного двухэтапного метода, где расчет производится в определенной последовательности двигаясь по структуре сети снизу вверх (этап 1) и сверху вниз (этап 2).

Использование такого подхода позволило получить универсальный (для произвольной конфигурации и сложности сети) и эффективный (с позиций количества вычислительных операций и объема потребляемой памяти ЭВМ) алгоритм.

Литература:

1. Идельчик В.И. Электрические системы и сети. / М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
2. Фурсанов М.И. Определение и анализ потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем / М.И. Фурсанов. - МН.: УВИЦ при УП (Белэнергосбережение), 2005.
3. Герасименко А.А. Передача и распределение электрической энергии / А.А. Герасименко, В.Т.Федин. - Ростов на Дону: Изд-во Феникс, Красноярск, 2008. -С. 718.
4. Асанов М.С. Структурная модель вычислительных сетей Петри / М.С. Асанов, С.М. Асанова, К.А. Сатаркулов // Известия КГТУ. - Бишкек, 2008. - №13. - С. 78-85.
5. 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.
6. 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. - Бишкек, 2015. - №3(36). - С. 151-158.

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