

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ И УРОВНЯ НАПРЯЖЕНИЯ В СЛОЖНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

И.М. Валеев<sup>1</sup>, Х.Д. Нгуен<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Казанский государственный энергетический университет

<sup>2</sup>Казанский национальный исследовательский технологический университет

**Резюме:** Приведены анализ и оценка эффективности различных методов по снижению уровня потерь мощности и напряжения в распределительных электрических сетях за счет изменения и построения новой топологии сети с использованием программного обеспечения (ПО) PSS / ADEAPT.

Авторами разработан и применен алгоритм расчета измененной сложной распределительной схемы, состоящей из источников питания, и методика оценки эффективности приведенного метода.

Результаты расчетов показали, что изменение топологии сети обладает высокой эффективностью и применима на практике для любого режима работы сети.

**Ключевые слова:** конфигурации, распределительная сеть, потери активной мощности, отключение напряжения, алгоритм действий.

## DEVELOPMENT METHODS FOR CALCULATING POWER LOSSES AND THE VOLTAGE LEVELS IN COMPLEX DISTRIBUTION NETWORKS

Valeev I.M<sup>1</sup>, Ha Duc Nguyen<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Doctor of technical, Professor Kazan State Power Engineering University, Professor Kazan National Research Technological University.

<sup>2</sup>Postgraduate student department of electric drive and electrical engineering KNRTU.

**Abstract:** The paper presents an analysis and evaluation of the effectiveness different methods for reduction the power loss and voltage in the distribution networks by changing and building a new network topology using the software PSS / ADEAPT.

We developed and applied the new algorithm for calculating distribution circuit. The calculation results by the software show that a change network topology is highly effective in practice and applicable to any mode of network operation.

**Keywords:** Distribution network configuration, power loss, voltage loss, software PSS / ADEAPT.

### Введение:

Одним из основных принципов государственной политики в сфере электроэнергетики является обеспечение гарантированной надежности электроснабжения населения и промышленных предприятий страны. Ввиду характера нагрузки в электрических распределительных сетях и непрерывного роста потребления электроэнергии происходит отклонение ряда показателей качества электроэнергии от номинальных регламентируемых значений, что, в свою очередь, приводит к увеличению уровня потерь

мощности, отклонению напряжения и, соответственно, отклонению режимов работы распределительных сетей от оптимальных.

Разработке методов оптимизации режимов работы распределительных сетей посвящены многочисленные работы, причем при поиске оптимального режима используются такие математические подходы, как метод «поиска кукушки», метод «роя частиц» и т.д. Данные методы являются эффективными, но отличаются сложностью применения и трудоемкостью расчетов.

Анализ проведенных исследований показывает, что для решения задачи оптимизации могут быть использованы такие программные комплексы, как *Matlab*, *Visualbasic* и *PSS / ADEPT*, которые на сегодняшний день являются самыми совершенными.

### **Способы решения проблемы оптимизации режима работы электроснабжения городского района**

Одним из возможных методов оптимизации режима работы сети является изменение ее топологии. Данный метод характеризуется наименьшими капитальными затратами и простотой применения по отношению к распределительной сети, находящейся в работе [1–4, 6–9].

Для решения проблемы оптимального изменения конфигурации распределительной сети необходимо определить целевую функцию. В качестве таких функций могут быть использованы, например, уровень потерь мощности, показатели качества электроэнергии и т.д.

Ввиду работы распределительной сети напряжением электроснабжения городского района в разомкнутом режиме, наименее трудозатратным мероприятием для изменения топологии распределительной сети является перенос месторасположения точки размыкания в оптимальную точку. Однако проблема заключается в поиске месторасположения данной точки.

Так как расположение точки оказывает влияние на ряд показателей и параметров режима работы сети, необходимо определить целевую функцию, минимизации которой необходимо добиться путем переноса точки.

В первую очередь режим работы распределительной сети должен обеспечивать надежность электроснабжения при одновременном обеспечении экономичности работы оборудования сети.

Таким образом, в качестве целевой функции для определения оптимальной точки размыкания используем уровень потерь мощности:

$$\Delta P = \sum \left( \frac{P_j^2 + Q_j^2}{V_j^2} \right) \cdot R_{j-1,j} \Rightarrow \min. \quad (1)$$

В качестве ограничений для целевой функции приняты следующие показатели:

$$\sum_{i=1}^n S_{ij} = S_j, \quad (2)$$

$$S_{ij} \leq S_{ij\text{макс}}, \quad (3)$$

$$\Delta U_{ji} \leq \Delta U_{ji\text{макс}}, \quad (4)$$

где  $n$  – число узлов, шт;  $S_{ij}$  – переток мощности по ветви  $i-j$ , кВА;  $S_j$  – мощность узла  $j$ , кВА;  $\Delta U_{ij}$  – потери напряжения на участке  $i-j$ , кВ.

Для оптимизации режима работы распределительной сети по выбранной целевой функции предлагается осуществить следующий алгоритм действий:

1. Вычертить схему рассматриваемой распределительной сети в ПО *PSS/ADEPT*.
2. Произвести расчет параметров режима работы сети в программном комплексе *PSS/ADEPT* для исходной топологии рассматриваемой сети.
3. Осуществить полное замыкание коммутационных аппаратов рассматриваемой сети в схеме, вычерченной в ПО *PSS/ADEPT*.
4. Произвести расчет перетоков мощности в ПО *PSS/ADEPT*.
5. Определить оптимальное распределение перетоков мощности, используя функцию *TOPO (TieOpenPointOptimization)* в ПО *PSS/ADEPT*.
6. На схеме в ПО *PSS/ADEPT* произвести размыкание коммутационного аппарата, по которому протекает наименьший ток.
7. Произвести анализ схемы на наличие нарушений условий эксплуатации оборудования.
8. В случае отсутствия замечаний произвести повторный расчет перетоков мощности и уровня отклонений напряжения.
9. Произвести анализ полученных результатов.
10. В случае наличия замечаний повторно произвести замыкание всех коммутационных аппаратов и выявить узлы, размыкание которых не приводит к нарушению условий эксплуатации. Блок - схема алгоритма показана на рис. 1.

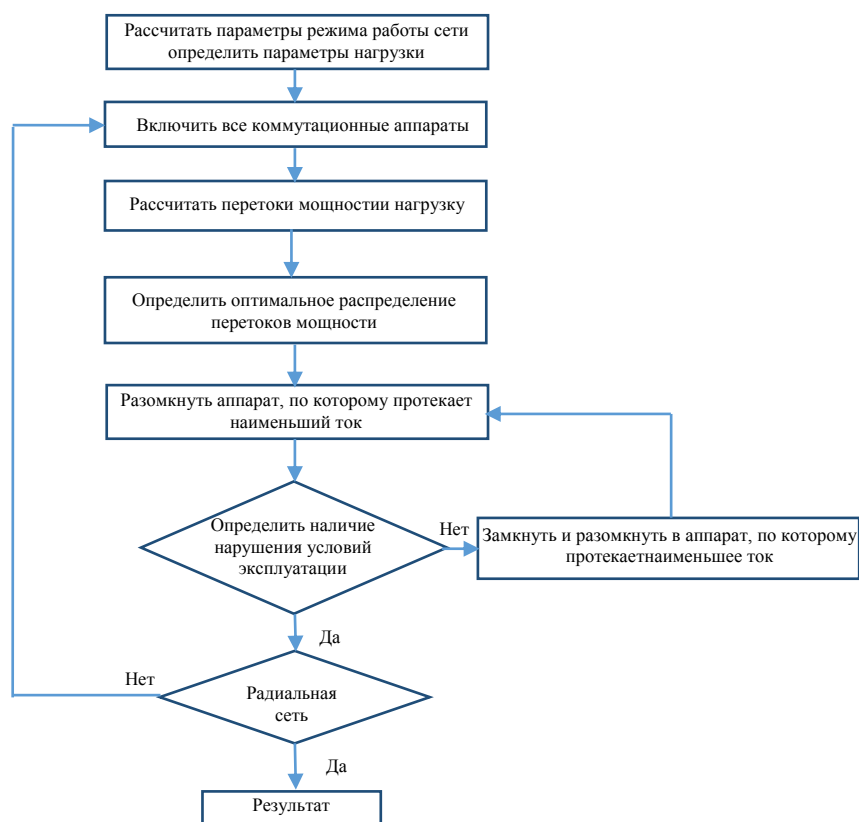


Рис. 1. Блок-схема алгоритма изменения конфигурации сети

### Практическое применение разработанного алгоритма

Для практического использования разработанного подхода предлагается осуществить его применение к существующей распределительной сети, представленной на рис. 2. Размыкание сети возможно в узлах: 21 – 8; 22 – 12; 25 – 29; 9 – 15; 33 – 18.

Параметры рассматриваемой сети приведены в табл. 1.

Таблица 1

Ветвь	Сопротивлений		Зел ( $N$ )	Мощность	
	$R(\Omega)$	$X(\Omega)$		$P$ (кВт)	$Q$ (кВар)
1 - 2	0.0922	0.0477	1	0	0
2 - 3	0.4930	0.2511	2	100	60
3 - 4	0.3660	0.1840	3	90	40
4 - 5	0.3811	0.1941	4	120	80
5 - 6	0.8190	0.0700	5	60	30
6 - 7	0.1872	0.6188	6	60	20
7 - 8	1.7114	1.2351	7	200	100
8 - 9	1.0300	0.7400	8	200	100
9 - 10	1.0400	0.7400	9	60	20
10 - 11	0.1966	0.0650	10	60	20
11 - 12	0.3744	0.1238	11	45	30
12 - 13	1.4680	1.1550	12	60	35
13 - 14	0.5416	0.7129	13	60	35
14 - 15	0.5910	0.5260	14	120	80
15 - 16	0.7463	0.5450	15	60	10
16 - 17	1.2890	1.7210	16	60	20
17 - 18	0.7320	0.5740	17	60	20
2 - 19	0.1640	0.1565	18	90	40
19 - 20	1.5042	1.3554	19	90	40
20 - 21	0.4095	0.4784	20	90	40
21 - 22	0.7089	0.9373	21	90	40
3 - 23	0.4512	0.3083	22	90	40
23 - 24	0.8980	0.7091	23	90	50
24 - 25	0.8960	0.7011	24	420	200
6 - 26	0.2030	0.1034	25	420	200
26 - 27	0.2842	0.1447	26	60	25
27 - 28	1.0590	0.9337	27	60	25
28 - 29	0.8042	0.7006	28	60	20
29 - 30	0.5075	0.2585	29	120	70
30 - 31	0.9744	0.9630	30	200	600
31 - 32	0.3105	0.3619	31	150	70
32 - 33	0.3410	0.5302	32	210	100
21 - 8	2.0000	2.0000	33	60	40
9 - 15	2.0000	2.0000	-	-	-
12 - 22	2.0000	2.0000	-	-	-
18 - 33	0.5000	0.5000	-	-	-
25 - 29	0.5000	0.5000	-	-	-

Согласно предложенному алгоритму следующим шагом является расчет показателей режима работы в ПО.

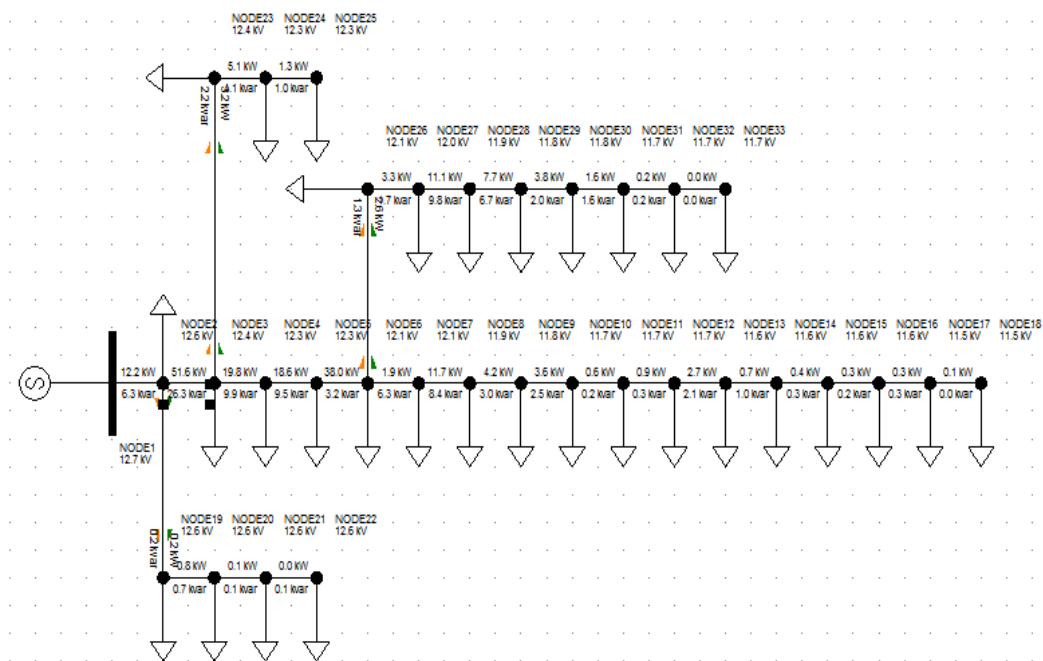


Рис. 2. Исходная схема сети в ПО с рассчитанными параметрами режима работы

Согласно приведенному алгоритму далее проводится определение точки потокораздела выделенного участка. При этом считаем, что напряжение в узлах сети равно, тогда:

$$\sum_{i,j=1}^n S_{ij} \cdot R_{ij} = 0 \quad (5)$$

или:

$$S_{12} \cdot R_{12} + S_{23} \cdot R_{23} + \dots + S_{ij} \cdot R_{ij} = 0. \quad (6)$$

Запишем уравнение (6) в следующем виде:

$$S_{ij} \cdot R_{ij} + (S_{ij} - S_j) \cdot R_{i+1,j+1} + (S_{ij} - S_j - S_{j+1}) \cdot R_{i+2,j+2} \dots + \dots = 0. \quad (7)$$

Приводя формулу в сокращенный вид и используя полное значение полной мощности  $z$ , получаем

$$S_{ij} = \frac{\sum_{j=1}^n S_j \cdot \sum_{i,j=2}^k z_{ij}}{\sum_{i,j=1}^k z_{i,j}}, \quad (8)$$

где  $n$  – число узлов в схеме;  $k$  – число ветвей в схеме;  $z_{i-j}$  – столбец сопротивлений ветвей, Ом.

Далее проводится расчет уровня потерь мощности. Согласно принятой методике учитываются уровни узлового напряжения сети:

$$\Delta P_i = \sum_{i,j=1}^n \frac{S_{i,j}^2}{U_i^2} \cdot R_{i,j}. \quad (9)$$

Расчитанные параметры сведены в табл. 2:

Таблица 2

Расчитанные параметры				
Ветвь	U(кВ)	ΔU(%)	Потери мощности	
			ΔP, кВт	ΔQ, кВАр
1 - 2	12.622	0,30	12.2	6,3
2 - 3	12.444	1,71	51.6	26,3
3 - 4	12.350	2,45	19.8	9,9
4 - 5	12.256	3,19	18.6	9,5
5 - 6	12.104	4,39	38.0	3,2
6 - 7	12.060	4,74	1.9	6,3
7 - 8	11.888	6,10	11.7	8,4
8 - 9	11.809	6,72	4.2	3,0
9 - 10	11.735	7,31	3.6	2,5
10 - 11	11.724	7,39	0.6	0,2
11 - 12	11.705	7,54	0.9	0,3
12 - 13	11.628	8,15	2.7	2,1
13 - 14	11.599	8,38	0.7	1,0
14 - 15	11.581	8,52	0.4	0,3
15 - 16	11.564	8,66	0.3	0,2
16 - 17	11.538	8,86	0.3	0,3
17 - 18	11.530	8,93	0.1	0,0
2 - 19	12.616	0,35	0.2	0,2
19 - 20	12.570	0,71	0.8	0,7
20 - 21	12.561	0,78	0.1	0,1
21 - 22	12.553	0,85	0.0	0,1
3 - 23	12.399	2,06	3.2	2,2
23 - 24	12.314	2,73	5.1	4,1
24 - 25	12.272	3,06	1.3	1,0
6 - 26	12.080	4,58	2.6	1,3
26 - 27	12.048	4,83	3.3	1,7
27 - 28	11.904	5,97	11.1	9,8
28 - 29	11.801	6,79	7.7	6,7
29 - 30	11.756	7,14	3.8	2,0
30 - 31	11.704	7,55	1.6	1,6
31 - 32	11.692	7,65	0.2	0,2
32 - 33	11.689	7,67	0.0	0,0
<b>Σ</b>		<b>166</b>	<b>208,6</b>	<b>111,5</b>

Следующим шагом является перенос всех выбранных узлов согласно программного обеспечения на точки размыкания (рис. 3), где наименьшие токи (см. табл. 3).

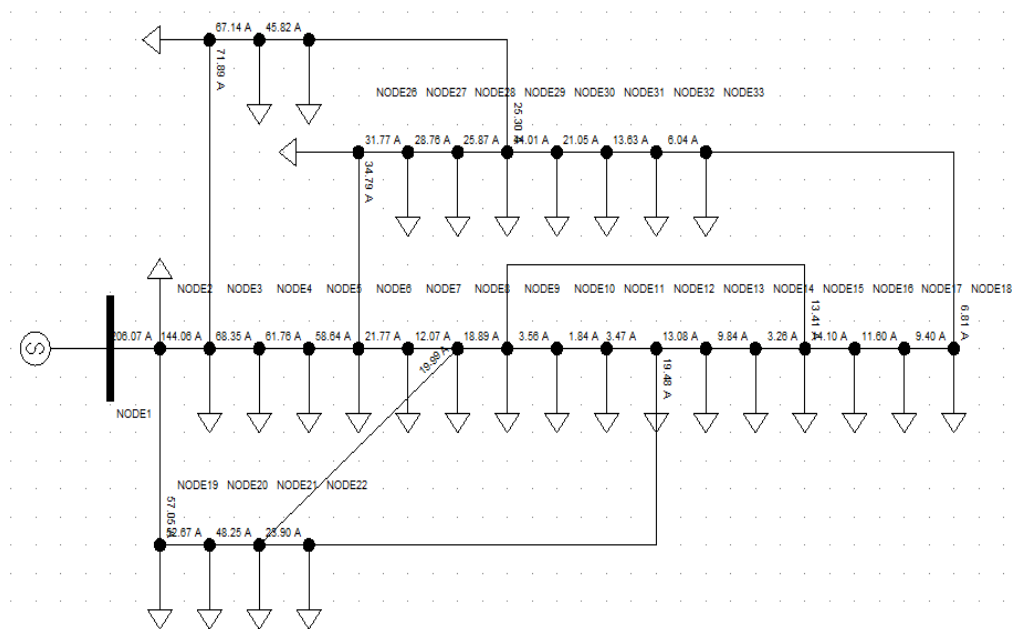


Рис. 3. Схема сети в ПО с замкнутыми коммутационными аппаратами

Параметры режима работы сети сведены в табл. 3:

Таблица 3

Ветвь	$I$ , А	$U$ , кВ	Ветвь	$I$ , А	$U$ , кВ
1 - 2	206,07	12,623	20 - 21	48,25	12,365
2 - 3	144,06	12,485	21 - 22	23,90	12,317
3 - 4	68,35	12,437	3 - 23	71,89	12,417
4 - 5	61,76	12,391	23 - 24	67,14	12,284
5 - 6	58,64	12,312	24 - 25	45,82	12,194
6 - 7	21,77	12,301	6 - 26	34,79	12,298
7 - 8	12,07	12,267	26 - 27	31,77	12,280
8 - 9	18,89	12,226	27 - 28	28,76	12,211
9 - 10	3,56	12,220	28 - 29	25,87	12,163
10 - 11	1,84	12,220	29 - 30	44,01	12,123
11 - 12	3,47	12,222	30 - 31	21,05	12,082
12 - 13	13,08	12,180	31 - 32	13,63	12,075
13 - 14	9,84	12,165	32 - 33	6,04	12,077
14 - 15	3,26	12,161	21 - 8	19,99	12,267
15 - 16	14,10	12,139	9 - 15	13,41	12,161
16 - 17	11,60	12,095	12 - 22	19,48	12,317
17 - 18	9,40	12,082	18 - 33	6,81	12,077
2 - 19	57,05	12,601	25 - 29	25,30	12,163
19 - 20	52,67	12,416	-	-	-

Проведя анализ полученных результатов, можно сделать вывод о том, что наименьший ток протекает по ветвям: 7 - 8; 10 - 11; 14 - 15; 25 - 29 и 32 - 33.

Для проверки выдвинутой гипотезы зависимости уровня потерь мощности в системе от места расположения точки размыкания сети, было произведено размыкание коммутационных аппаратов (см. рис. 4) между: 7 - 8; 10 - 11; 14 - 15; 25 - 29 и 32 - 33.

Параметры режима работы сети при повторном расчете сведены в табл. 4:

Таблица 4

Ветвь	U, кВ	$\Delta U$ , %	Потери мощности	
			$\Delta P$ , кВт	$\Delta Q$ , кВАр
1 - 2	12,623	0,3	11,8	6,1
2 - 3	12,495	1,3	26,7	3,6
3 - 4	12,439	1,7	7,5	3,8
4 - 5	12,384	2,2	6,6	3,4
5 - 6	12,302	2,8	13,1	1,1
5 - 26	12,279	3,0	2,2	1,1
26 - 27	12,250	3,2	2,8	1,4
27 - 28	12,117	4,3	9,5	8,4
28 - 29	12,022	5,0	6,6	5,7
29 - 30	11,982	5,4	3,2	1,6
30 - 31	11,939	5,7	1,1	1,1
31 - 32	11,930	5,8	0,1	0,1
2 - 19	12,598	0,5	2,3	2,2
19 - 20	12,384	2,2	18,1	16,3
20 - 21	12,326	2,6	4,2	4,9
21 - 22	12,287	2,9	0,9	1,2
22 - 12	12,211	3,5	1,5	1,5
12 - 11	12,209	3,6	0,0	0,0
12 - 13	12,178	3,8	0,5	0,4
13 - 14	12,168	3,9	0,1	0,1
21 - 8	12,173	3,8	6,8	6,8
8 - 9	12,124	4,2	1,6	1,2
9 - 10	12,118	4,3	0,0	0,0
9 - 15	12,047	4,8	1,7	1,7
15 - 16	12,025	5,0	0,5	0,3
16 - 17	11,988	5,3	0,5	0,6
17 - 18	11,975	5,4	0,1	0,1
18 - 33	11,971	5,4	0,0	0,0
3 - 23	12,450	1,7	3,2	2,2
23 - 24	12,336	2,6	5,1	4,0
24 - 25	12,324	2,7	1,3	1,0
<b>Σ</b>		<b>108,9</b>	<b>139,6</b>	<b>81,9</b>



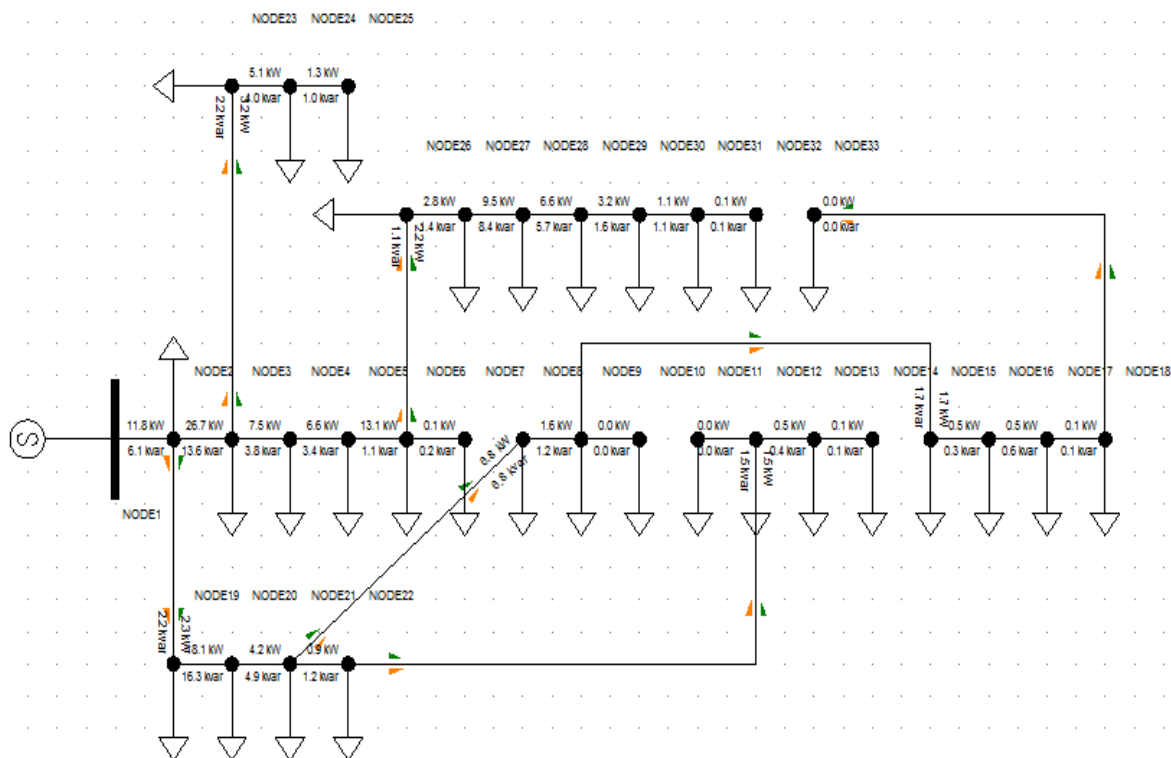


Рис. 4. Схема сети с разомкнутыми коммутационными аппаратами

Суммарные потери:

- активной мощности:  $\Sigma \Delta P = 139,6$  кВт;
- реактивной мощности  $\Sigma \Delta Q = 81,9$  кВар;
- напряжения:  $\Sigma \Delta U = 108,9\%$ .

В табл. 5 приведены сравнительные результаты методов расчета потерь активной мощности (см. формулу (9)), показывающие преимущества методики режимов работы при изменении топологии сложной распределительной сети.

Таким образом, нахождение минимума выбранной целевой функции с использованием алгоритма изменения конфигурации распределительной сети позволили выявить наилучшие точки размыкания. Исходя из результатов, приведенных в табл. 5, видно, что оптимальными точками размыкания являются: 7 - 8; 10 - 11; 14 - 15; 25 - 29 и 32 - 33, при этом снижение уровня потерь мощности составляет 33,07%.

Таблица 5

Метод	Коммутационных аппаратов	Потери акт. мощности, кВт	Снижение потерь мощности, %
Исходная конфигурация	21-8, 22-12, 25-29, 9-15, 33-18	208,6	
ПО PSS/ADEPT	<b>7-8, 10-11, 25-29, 14-15, 32-33</b>	<b>139,6</b>	<b>33,07</b>
GA[4]	21-8, 9-10, 9-15, 28-29, 33-18	140,6	32,59
ABCA[1]	21-8, 14-15, 8-9, 32-33, 28-29	139,5	33,12

### **Вывод**

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о том, что изменение топологии распределительной сети путем размыкания ветвей, по которым протекает наименьший ток, приводит к снижению уровня потерь активной и реактивной мощности, а также улучшает условия работы потребителей электроэнергии за счет уменьшения уровня отклонения напряжения.

### **Литература**

1. R. Srinivasa Rao, S.V.L. Narasimham, M. Ramalingaraju. "Optimization of distribution network configuration for loss reduction using artificial bee colony algorithm". World Academy of Science, Engineering and Technology 45 2008.
2. Civanlar S, Grainger JJ, Le SSH. "Distribution feeder reconfiguration for loss reduction". IEEE Trans, Power Deliv 1988;3: 17–23.
3. S. Civanlar. J. J. Grainger. H. Yin, and S. S. H. Lee, "Distribution feeder reconfiguration for loss reduction," IEEE Trans. Power Del., vol. 3, no.3, pp. 1217–1223, Jul. 1988.
4. Y. Y. Hong and S. Y. Ho, "Determination of network configuration considering multi-objective in distribution systems using genetic algorithms," IEEE Trans. PowerSyst., vol. 20, no. 2, pp. 1062–1069, May 2005.
5. Ананичева С.С. Методы анализа и расчета замкнутых электрических сетей / С.С. Ананичева, А.Л. Мызин. Екатеринбург: УрФУ, 2012. 94 с.
6. Мусаев Т.А. Алгоритм оптимизации режима работы городской распределительной сети напряжением 6(10) кВ / Т.А. Мусаев, И.М. Валеев // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2012 №7 – 8. С. 128 – 132.
7. Мусаев Т.А. Моделирование режима работы распределительных сетей напряжением 6(10) кВ / Т.А. Мусаев, И.М. Валеев // Энергетика Татарстана. 2012. №2(26). С. 53 – 56.
8. Jiang Yi. "Study on the effect of distributed generation on distribution network voltage and optimal allocation [D]". Chengdu: Southwest Jiao Tong University, IEEE Trans, 2012.
9. VahidFarahani, BehroozVahidi, "Reconfiguration and Capacitor Placement Simultaneously for Energy Loss Reduction Based on an Improved Reconfiguration Method" IEEE Transactions on power systems, vol. 27, no. 2, may 2012.
10. Соснина Е.Н., Лоскутов А.Б., Лоскутов А.А. Топология городских распределительных интеллектуальных электрических сетей 20 кВ // Промышленная энергетика. 2012. № 5. С. 11–17.

### **Авторы публикации**

**Валеев Ильгиз Миргалимович** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электрические станции» (ЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), профессор кафедры ЭиЭ Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ). E-mail: ilgizvaleev@mail.yandex.ru.

**Ха Дык Нгуен** – аспирант Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ). E-mail: nguyenlong1252@gmail.com.

### **References**

1. R. Srinivasa Rao, S.V.L. Narasimham, M. Ramalingaraju. "Optimization of distribution network configuration for loss reduction using artificial bee colony algorithm". World Academy of Science, Engineering and Technology 45 2008.
2. Civanlar S, Grainger JJ, Le SSH. "Distribution feeder reconfiguration for loss reduction". IEEE Trans, Power Deliv 1988;3, pp 17–23.
3. S. Civanlar. J. J. Grainger. H. Yin, and S. S. H. Lee, "Distribution feeder reconfiguration for loss reduction," IEEE Trans. Power Del., vol. 3, no.3, pp. 1217–1223, Jul. 1988.

4. Y. Y. Hong and S. Y. Ho, "Determination of network configuration considering multi-objective in distribution systems using genetic algorithms," IEEE Trans. PowerSyst., vol. 20, no. 2, pp. 1062–1069, May 2005.

5. Ananicheva, SS Methods of analysis and calculation of closed electrical networks / SS. Anannicheva, A.L. Myczin. - Ekaterinburg, UrFU, 2012. –pp 94.

6. Musaev, TA An algorithm for optimizing the operating mode of a city distribution network with a voltage of 6 (10) kV / T.A. Musayev, I.M. Valeev // Problems of power engineering. - № 7 - 8. - 2012. - pp. 128 - 132.

7. Musaev, TA Modeling the operating mode of distribution networks with a voltage of 6 (10) kV / T.A. Musayev, I.M. Valeev // Power engineering of Tatarstan. - 2012. - №2 (26). - pp. 53 - 56.

8. Jiang Yi. "Study on the effect of distributed generation on distribution network voltage and optimal allocation [D]". Chengdu: Southwest Jiao Tong University, IEEE Trans, 2012.

9. VahidFarahani, BehroozVahidi, "Reconfiguration and Capacitor Placement Simultaneously for Energy Loss Reduction Based on an Improved Reconfiguration Method," IEEE Transactions on power systems, vol. 27, no. 2, may 2012.

10. Sosnina EN, Loskutov AB, Loskutov AA Topology of urban distributive intelligent power networks 20 kV // Industrial energy. 2012. № 5. pp. 11-17.

#### **Authors of the publication**

**Valeev I.M.**- Doctor of technical, Professor Kazan State Power Engineering University, Professor Kazan National Research Technological University.

**Ha Duc Nguyen**- Postgraduate student department of electric drive and electrical engineering KNRTU.

**Поступила в редакцию**

**15 декабря 2016 г.**