

# СРАВНЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО И ГРАФИЧЕСКОГО МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ЗАГРУЗКИ СЕТИ 10 кВ

*А.А. Ковзан<sup>1)</sup>, Н.Г. Шалыгин<sup>2)</sup>, Н.А. Попкова<sup>3)</sup>*

1) студент Белорусского национального технического университета, г. Минск, Беларусь, [alexkovzanok@gmail.com](mailto:alexkovzanok@gmail.com)

2) студент Белорусского национального технического университета, г. Минск, Беларусь, [shalygin.nick.bp@gmail.com](mailto:shalygin.nick.bp@gmail.com)

3) м.т.н., старший преподаватель кафедры «Электрические системы» Белорусского национального технического университета, г. Минск, Беларусь, [Popkova@bntu.by](mailto:Popkova@bntu.by)

**Аннотация:** в данной статье было проведено сравнение аналитического и графического методов определения оптимального коэффициента загрузки сети 10 кВ.

**Ключевые слова:** оптимизация, распределительная сеть.

## COMPARISON OF ANALYTICAL AND GRAPHICAL METHODS OF DETERMINING THE OPTIMAL LOAD FACTOR OF A 10 kV NETWORK

*Alexander A. Kovzan<sup>1)</sup>, Nikita G. Shalygin<sup>2)</sup>, Nadezhda A. Popkova<sup>3)</sup>*

1) the student of Belarusian national technical university, city of Minsk, Belarus, [alexkovzanok@gmail.com](mailto:alexkovzanok@gmail.com)

2) the student of Belarusian national technical university, city of Minsk, Belarus, [shalygin.nick.bp@gmail.com](mailto:shalygin.nick.bp@gmail.com)

3) Master Degree, senior lecturer Electric power systems department Belarusian national technical university, city of Minsk, Belarus, [Popkova@bntu.by](mailto:Popkova@bntu.by)

**Abstract:** This article explores the comparison of analytical and graphical methods of determining the optimal load factor of a 10 kV network.

**Key words:** optimization, distribution network.

Известно о том, что дефицит топливно-энергетических ресурсов Земли является причиной осознания необходимости их бережного расходования. Этот вопрос остро стоит как в развитых, так и в развивающихся странах. Во многих странах по этой причине созданы специальные органы по рациональному использованию природных ресурсов.

По мере развития энергопотребления увеличивается нагрузка на текущее электротехническое оборудование, а вместе с этим увеличивается технологический расход на транспорт электроэнергии. В свою очередь рост величины потерь служит одной из причин, приводящей к дополнительному сжиганию топлива на электрических станциях, и снижает пропускную способность линии. Именно поэтому при анализе потерь важно рассматривать не только количественный, но и качественный аспект вопроса, поскольку эта информация представляет огромную ценность не только в условиях эксплуатации текущих сетей, но и при проектировании новых.

Расчёты проводились на части реальной действующей энергетической системы Республики Беларусь, однако диспетчерские наименования линий электропередачи и подстанции были зашифрованы.

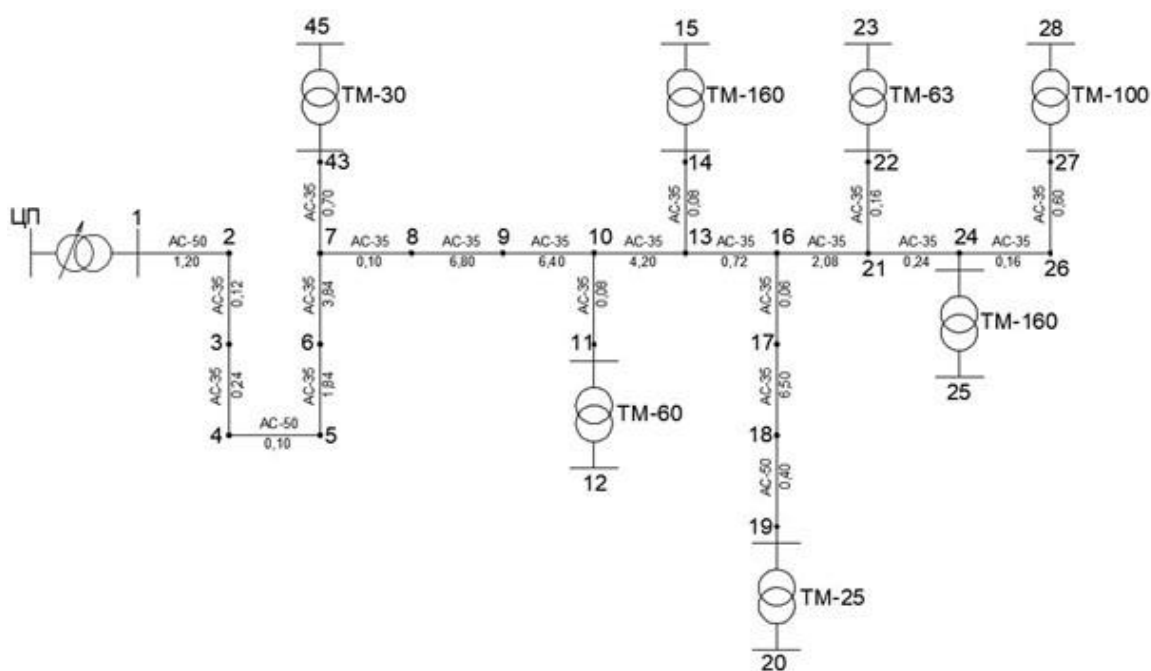


Рисунок 1 – Исходная схема разомкнутой сети

Зависимость стоимости передачи электрической энергии  $C$  есть функция отпуска электроэнергии в сеть [1]:

$$C = \frac{p_l K_l + p_t K_t}{W} + \frac{\Delta W_{нл} \beta_{нл} + \Delta W_{нт} \beta_{нт} + \Delta W_{хх} \beta_{хх}}{W}, \quad (1)$$

где  $p_l = 0,19$  – суммарный коэффициент отчислений от стоимости линий сети  $K_l$ ;

$\Delta W_{нл}$  – суммарные нагрузочные потери электроэнергии в линиях, кВт·ч;

$\beta_{нл} = 0,032$  у.е./кВт·ч – стоимость 1 кВт·ч  $\Delta W_{нл}$ ;

$p_t = 0,254$  – суммарный коэффициент отчислений от стоимости трансформаторов  $K_t$ ;

$\Delta W_{хх}$  – потери электроэнергии холостого хода в трансформаторах, кВт·ч;

$\beta_{xx} = 0,016$  у.е./кВт·ч; – стоимость 1 кВт·ч  $\Delta W_{HT}$ ;  
 $\Delta W_{HT}$  – нагрузочные потери электроэнергии в трансформаторах, кВт·ч;  
 $\beta_{HT} = 0,032$  у.е./кВт·ч – стоимость 1 кВт·ч  $\Delta W_{HT}$ ;  
 $W$  – варьируемый отпуск электроэнергии в сеть, кВт·ч.  
 Ориентировочная стоимость линий:

$$K_L = K_{L0} \cdot \sum_{i=1}^{N_L} l_i, \quad (2)$$

где  $K_{L0} = 383$  у.е./км – средняя стоимость 1 км линии.

В целях упрощения расчетов формулу (4.1) можно преобразовать к виду:

$$C = \frac{A}{W} + \frac{B}{W} + \frac{C}{W} = \frac{p_L K_L + p_T K_T}{W} + \frac{\Delta W_{xx} \beta_{xx}}{W} + \frac{\Delta W_{HT} \beta_{HT}}{W}. \quad (3)$$

По формулам (1) – (3) найдём значения составляющих стоимости передачи электрической энергии для режима наибольших нагрузок:

$$K_L = K_{L0} \cdot \sum_{i=1}^{22} l_i = 383 \cdot 39,92 = 15284 \text{ (у.е.);}$$

$$K_T = \sum_{i=1}^7 K_i = 6975 \text{ (у.е.);}$$

$$\frac{A}{W} = \frac{p_L K_L + p_T K_T}{W} = \frac{0,19 \cdot 15284 + 0,254 \cdot 6975}{855,650} = 5,466 \text{ (у.е./тыс. кВт·ч);}$$

$$\frac{B}{W} = \frac{\Delta W_{xx} \beta_{xx}}{W} = \frac{49159 \cdot 0,016}{855,650} = 0,919 \text{ (у.е./тыс. кВт·ч);}$$

$$\frac{C}{W} = \frac{\Delta W_{HT} \beta_{HT}}{W} = \frac{61444 \cdot 0,032 + 4172,6 \cdot 0,032}{855,650} = 2,454 \text{ (у.е./тыс. кВт·ч);}$$

$$C = \frac{A}{W} + \frac{B}{W} + \frac{C}{W} = 5,466 + 0,919 + 2,454 = 8,839 \text{ (у.е./тыс. кВт·ч).}$$

Меняя коэффициенты загрузки (Таблица 1) нужно найти графики зависимости стоимости передачи электрической энергии и её составляющих от отпуска электроэнергии (Рисунок 2).

Таблица 1 – Зависимость величины потерь и себестоимость электроэнергии от коэффициента загрузки сети

$k_3$	$W$	$\Delta W_{HT}$	$\Delta W_{HT}$	$\Delta W_{xx}$	$\Delta W$	$\frac{A}{W}$	$\frac{B}{W}$	$\frac{C}{W}$	$C$
о.е.	тыс. кВт·ч					у.е./тыс. кВт·ч			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,1	244,41	11,038	0,9183	50,636	62,593	19,134	3,315	1,565	24,015
0,2	442,398	22,381	1,6935	50,147	74,222	10,571	1,814	1,741	14,126
0,3	645,974	38,958	2,7684	49,655	91,381	7,2397	1,23	2,067	10,537
0,4	855,65	61,444	4,1726	49,159	114,78	5,4656	0,919	2,454	8,8388
0,5	1071,86	90,477	5,9255	48,66	145,06	4,3631	0,726	2,878	7,9675
0,6	1295,07	126,75	8,0443	48,157	182,95	3,6111	0,595	3,331	7,5367
0,7	1525,75	171,02	10,546	47,651	229,21	3,0651	0,5	3,808	7,3728

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

0,8	1764,45	224,14	13,45	47,142	284,73	2,6505	0,427	4,309	7,3868
0,9	2011,76	287,07	16,773	46,629	350,47	2,3246	0,371	4,833	7,5285
1	2268,34	360,88	20,535	46,113	427,52	2,0617	0,325	5,381	7,7676
1,1	2534,91	446,78	24,758	45,593	517,13	1,8449	0,288	5,953	8,0853
1,2	2812,27	546,16	29,462	45,069	620,69	1,6629	0,256	6,55	8,4691
1,3	3101,35	660,56	34,672	44,542	739,78	1,5079	0,23	7,173	8,9112
1,4	3403,15	791,77	40,412	44,012	876,2	1,3742	0,207	7,825	9,4062
1,5	3718,82	941,82	46,708	43,478	1032	1,2576	0,187	8,506	9,9508
1,6	4049,64	1113	53,587	42,94	1209,6	1,1548	0,17	9,218	10,543
1,7	4397,09	1308,1	61,081	42,399	1411,5	1,0636	0,154	9,964	11,182
1,8	4762,82	1530	69,22	41,854	1641,1	0,9819	0,141	10,74	11,867
1,9	5148,76	1782,5	78,037	41,305	1901,8	0,9083	0,128	11,56	12,6
2	5557,09	2069,6	87,57	40,753	2197,9	0,8416	0,117	12,42	13,381
2,1	5990,34	2396,3	97,856	40,196	2534,4	0,7807	0,107	13,32	14,212
2,2	6451,45	2768,3	108,94	39,636	2916,9	0,7249	0,098	14,27	15,095
2,3	6943,87	3192,4	120,86	39,073	3352,3	0,6735	0,09	15,27	16,032
2,4	7471,62	3676,7	133,67	38,505	3848,8	0,6259	0,082	16,32	17,028
2,5	8039,46	4230,9	147,41	37,934	4416,2	0,5817	0,075	17,43	18,084

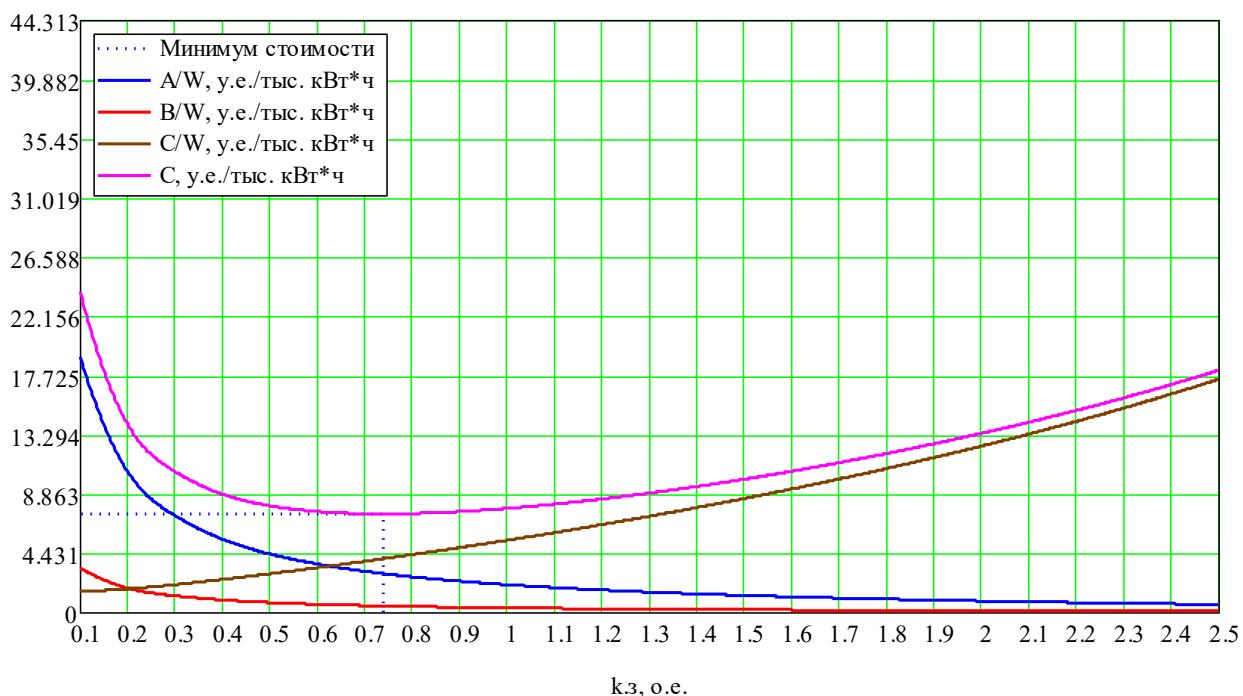


Рисунок 2 – Зависимость стоимости передачи от коэффициента загрузки

Как видно из графиков, минимуму стоимости соответствует коэффициент загрузки  $k_{CT} = 0,739$ . Минимальная стоимость передачи достигает до  $C_{\%min} = 7,361$  у.е./тыс. кВт·ч.

Из [2] возьмем формулу для расчета аналогичного коэффициента загрузки:

$$k_{\text{СП}} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sum S} \cdot \sqrt{\frac{p_{\text{T}} \cdot K_{\text{T}} + \sum \Delta P_{\text{X}} \cdot 8760 \cdot \beta_{\text{X}} + p_{\text{Л}} \cdot K_{\text{Л}}}{(r_{\text{ЭТ}} + r_{\text{ЭЛ}}) \cdot \beta_{\text{Н}} \cdot ((0,124 + T_{\text{НБ}} \cdot 10^{-4})^2 \cdot 8760)}, \quad (4)$$

где  $r_{\text{ЭТ}}$  – эквивалентное сопротивление трансформаторов, Ом;  
 $r_{\text{ЭЛ}}$  – эквивалентное сопротивление трансформаторов, Ом.

$$\begin{aligned} k_{\text{СП}} &= \frac{U_{\text{НОМ}}}{\sum S} \cdot \sqrt{\frac{p_{\text{T}} \cdot K_{\text{T}} + \sum \Delta P_{\text{X}} \cdot 8760 \cdot \beta_{\text{X}} + p_{\text{Л}} \cdot K_{\text{Л}}}{(r_{\text{ЭТ}} + r_{\text{ЭЛ}}) \cdot \beta_{\text{Н}} \cdot ((0,124 + T_{\text{НБ}} \cdot 10^{-4})^2 \cdot 8760)} = \\ &= \frac{10}{598} \cdot \sqrt{\frac{0,254 \cdot 6975 + 5,34 \cdot 8760 \cdot 0,016 + 0,19 \cdot 15290}{(1,596 + 20,324) \cdot 0,032 \cdot ((0,124 + 1600 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 8760)}} = \\ &= 0,812. \end{aligned}$$

Приведенная выше формула упрощает расчет, но при этом не обладает достаточной точностью, поскольку вместо многократного расчета режима сети с точным потокораспределением схема заменяется эквивалентным сопротивлением линий и трансформаторов. Замещение происходит исходя из соображений, что на элементах с сопротивлением  $r_{\text{ЭТ}}$  и  $r_{\text{ЭЛ}}$  выделяются такие же потери, как и во всей сети.

#### **Список использованных источников:**

1. Фурсанов М.И. Методология и практика расчетов потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем. – Минск: Тэхналогія, 2000. - 247 с.
2. Фурсанов М.И. Определение и анализ потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем // Монография. — Мн.: УВИЦ при УП "Белэнергосбережение", 2005. — 208 с.