

УДК 621.315

**РАСЧЕТ ПОТЕРЬ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА УЧАСТКЕ  
РАДИАЛЬНОЙ  
МАГИСТРАЛЬНОЙ СЕТИ  
НАПРЯЖЕНИЕМ 110 КВ**

*Галстян Р. А., Смагин К. А.,  
Антонов М. А., Арнаутков А. В.*

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

[galstyan.razmik2015@yandex.ru](mailto:galstyan.razmik2015@yandex.ru)

[s\\_k\\_a\\_97@mail.ru](mailto:s_k_a_97@mail.ru)

[nevada@skillet.ru](mailto:nevada@skillet.ru)

[ArnautovDonenergoMS@yandex.ru](mailto:ArnautovDonenergoMS@yandex.ru)

Рассмотрена методика расчета потерь электроэнергии в разомкнутой электрической сети.

**Ключевые слова:** потери, электроэнергетика, напряжение, нагрузка, электрическая сеть, схема замещения, подстанция, линия, ток.

**Введение.** Расчет потерь электроэнергии дает возможность анализировать состояние электрической сети. От состояния электрической сети зависит экономичность ее работы. Сеть считается экономичной, если потери составляют не более 8 % от передаваемой мощности.

Цель данной работы — рассчитать потери электроэнергии на участке радиальной магистральной сети напряжением 110 кВ, чтобы выяснить, удовлетворяют ли они требованиям по транзиту электроэнергии.

**Расчет потерь электроэнергии на участке радиальной  
магистральной сети 110 кВ**

**Исходные данные для расчета потерь электроэнергии.** Для примера взят участок радиальной магистральной сети 110 кВ. Сеть состоит из четырех двухцепных линий электропередачи и четырех подстанций напряжением 110/10 кВ.

Параметры ЛЭП, трансформаторов и нагрузка подстанций приведены в табл. 1–3. Напряжение балансирующего узла принято 121 кВ.

Таблица 1

Параметры ЛЭП

Линия	Марка провода	$r_0$ , Ом/км	$x_0$ , Ом/км	$b_0$ , мкСм/км	Число	Длина	R, Ом	X, Ом	B, мкСм	Q, МВАр
					цепей					
ЭС–ПС-1	АС-240/32	0,121	0,405	2,800	2	38	2,3	7,7	53,200	0,644
ПС-1–ПС-2	АС - 185/29	0,162	0,414	2,739	2	23	1,9	4,8	31,499	0,381
ПС-2–ПС-3	АС - 150/24	0,198	0,420	2,699	2	20	2,0	4,2	26,990	0,327
ПС-3–ПС-4	АС - 120/19	0,249	0,427	2,651	2	16	2,0	3,4	21,208	0,257

Таблица 2

Параметры трансформаторов

Место установки	Тип	$S_{ном},$ МВА	$U_{ном},$ кВ	$\Delta P_{xx},$ МВт	$\Delta Q_{xx},$ МВАр	$\Delta S_{xx},$ МВА	R, Ом	X, Ом	$K_T$
ПС-1	ТРДН-25000/110	25	110	0,05	0,35	0,354	1,25	27,8	0,0956
ПС-2	ТРДН-25000/110	25	110	0,05	0,35	0,354	1,25	27,8	0,0956
ПС-3	ТДН-10000/110	10	110	0,028	0,14	0,143	3,95	69,45	0,0956
ПС-4	ТМН-6300/110	6,3	110	0,02	0,1	0,102	8	110,2	0,0956

Таблица 3

Отходящая нагрузка подстанций

Подстанции	P, МВт	Q, МВАр
ПС-1	26	15
ПС-2	29	13
ПС-3	12	8
ПС-4	8	4

Схема электросети и схема замещения элементов сети представлены на рис. 1 и 2. Линии представляют П-образные схемы замещения, двухобмоточные трансформаторы — Г-образные схемы замещения [1]. Расчётные параметры сведены в табл. 1 и 2.

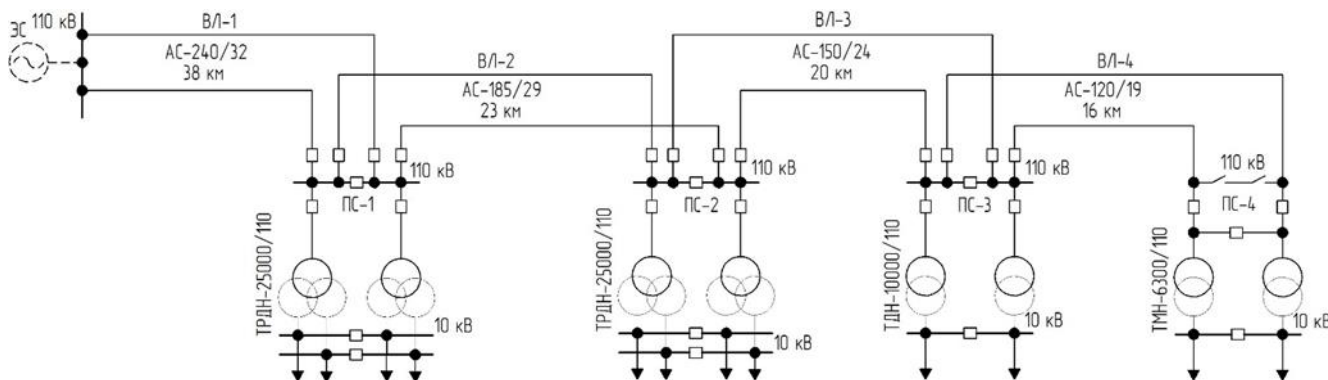


Рис.1. Радиальная магистральная сеть 110 кВ

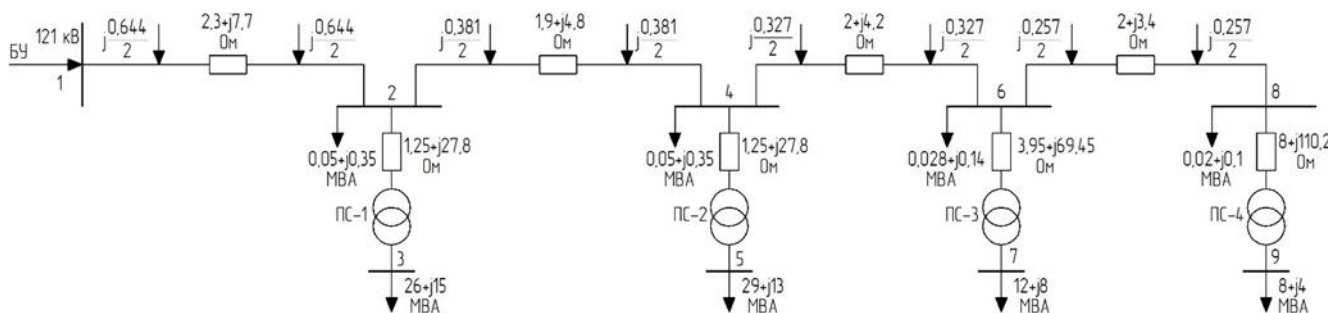


Рис. 2. Схема замещения радиальной магистральной сети 110 кВ

**Расчет потерь электроэнергии.** Для расчета потерь мощности необходимо рассчитать установившийся режим. Целью расчета режима является определение параметров режимов: напряжений во всех узлах, токов и мощностей во всех ветвях, потерь мощности во всех элементах

и в сети в целом [2]. По значениям указанных параметров оценивают допустимость режима, качество электроэнергии для потребителей, экономичность режима [3]. Упрощённая схема представлена на рис.3.

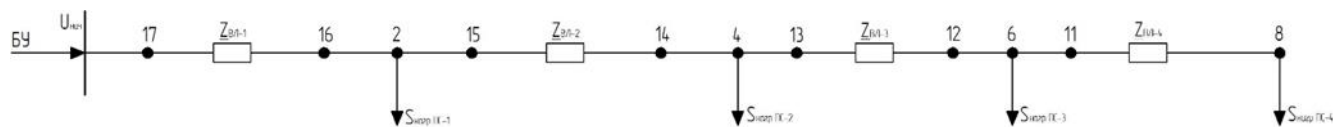


Рис. 3. Упрощённая схема

Потери мощности в трансформаторе вычисляются по формуле:

$$\Delta S_{\text{тр}} = \frac{P^2 + Q^2}{U_{\text{НОМ}}^2} \cdot (r + jx)$$

$$\Delta S_{\text{тр ПС-1}} = \frac{26^2 + 15^2}{110^2} \cdot (1,25 + j27,8) = 0,093 + j2,07$$

$$\Delta S_{\text{тр ПС-2}} = \frac{29^2 + 13^2}{110^2} \cdot (1,25 + j27,8) = 0,104 + j2,32$$

$$\Delta S_{\text{тр ПС-3}} = \frac{12^2 + 8^2}{110^2} \cdot (3,95 + j69,45) = 0,068 + j1,194$$

$$\Delta S_{\text{тр ПС-4}} = \frac{8^2 + 4^2}{110^2} \cdot (8 + j110,2) = 0,053 + j0,729$$

Рассчитаем мощность в узлах 2, 4, 6 и 8

$$S_2 = S_{\text{нагр ПС-1}} + \Delta S_{\text{тр ПС-1}} + \Delta S_{\text{xx}} - j \frac{Q_{Л1}}{2} - j \frac{Q_{Л2}}{2}$$

$$S_2 = 26 + j15 + 0,093 + j2,07 + 0,05 + j0,35 - j \frac{0,644}{2} - j \frac{0,381}{2} = 26,143 + j16,908$$

$$S_4 = S_{\text{нагр ПС-2}} + \Delta S_{\text{тр ПС-2}} + \Delta S_{\text{xx}} - j \frac{Q_{Л2}}{2} - j \frac{Q_{Л3}}{2}$$

$$S_4 = 29 + j13 + 0,104 + j2,32 + 0,05 + j0,35 - j \frac{0,381}{2} - j \frac{0,327}{2} = 29,154 + j15,317$$

$$S_6 = S_{\text{нагр ПС-3}} + \Delta S_{\text{тр ПС-3}} + \Delta S_{\text{xx}} - j \frac{Q_{Л3}}{2} - j \frac{Q_{Л4}}{2}$$

$$S_6 = 12 + j8 + 0,068 + j1,194 + 0,028 + j0,14 - j \frac{0,327}{2} - j \frac{0,257}{2} = 12,096 + j9,042$$

$$S_8 = S_{\text{нагр ПС-4}} + \Delta S_{\text{тр ПС-4}} + \Delta S_{\text{xx}} - j \frac{Q_{Л4}}{2}$$

$$S_8 = 8 + j4 + 0,053 + j0,729 + 0,02 + j0,1 - j \frac{0,257}{2} = 8,073 + j4,7$$

Потери мощности в воздушных линиях вычисляются по формуле:

$$\Delta S_{\text{ВЛ}} = \frac{P^2 + Q^2}{U_{\text{НОМ}}^2} \cdot (r + jx)$$

$$\Delta S_{\text{ВЛ 1}} = \frac{26,143^2 + 16,908^2}{110^2} \cdot (2,3 + j7,7) = 0,184 + j0,616$$

$$\Delta S_{\text{ВЛ}2} = \frac{29,154^2 + 15,317^2}{110^2} \cdot (1,9 + j4,8) = 0,167 + j0,427$$

$$\Delta S_{\text{ВЛ}3} = \frac{12,096^2 + 9,042^2}{110^2} \cdot (2 + j4,2) = 0,037 + j0,079$$

$$\Delta S_{\text{ВЛ}4} = \frac{8,073^2 + 4,7^2}{110^2} \cdot (2 + j3,4) = 0,014 + j0,025$$

Вычисляется поток мощности в узлах 11, 12, 13, 14, 15, 16 и 17 по формуле:

$$S_{\text{нач}} = S_{\text{кон}} + \Delta S_{\text{ВЛ}}$$

$$S_{11} = 8,073 + j4,7 + 0,014 + j0,025 = 8,087 + j4,725$$

$$S_{12} = 8,087 + j4,725 + 12,096 + j9,042 = 20,183 + j13,767$$

$$S_{13} = 20,183 + j13,767 + 0,037 + j0,079 = 20,22 + j13,846$$

$$S_{14} = 20,22 + j13,846 + 29,154 + j15,317 = 49,375 + j29,163$$

$$S_{15} = 49,375 + j29,163 + 0,167 + j0,427 = 49,542 + j29,59$$

$$S_{16} = 49,542 + j29,59 + 26,143 + j16,908 = 75,685 + j46,497$$

$$S_{17} = 75,685 + j46,497 + 0,184 + j0,616 = 75,869 + j47,114$$

Зная мощность на головном участке, можно вычислить напряжение в узлах 8, 12, 14 и 16 по формуле:

$$\dot{U}_{\text{кон}} = \dot{U}_{\text{нач}} - \frac{P_{\text{нач}} r + Q_{\text{нач}} x}{|\dot{U}_{\text{нач}}|} + j \frac{Q_{\text{нач}} x - P_{\text{нач}} r}{|\dot{U}_{\text{нач}}|}$$

$$\dot{U}_{16} = 121 - \frac{75,869 \cdot 2,3 + 47,114 \cdot 7,7}{121} + j \frac{47,114 \cdot 7,7 - 75,869 \cdot 2,3}{121} = 116,56 - j1,554$$

$$\dot{U}_{14} = 116,56 - j1,55 - \frac{49,54 \cdot 1,9 + 29,59 \cdot 4,8}{116,57} + j \frac{29,59 \cdot 4,8 - 49,54 \cdot 1,9}{116,57} = 114,534 - j1,143$$

$$\dot{U}_{12} = 114,534 - j1,143 - \frac{20,22 \cdot 2 + 13,846 \cdot 4,2}{114,539} + j \frac{13,846 \cdot 4,2 - 20,22 \cdot 2}{114,539} = 113,68 - j0,988$$

$$\dot{U}_8 = 113,68 - j0,988 - \frac{8,087 \cdot 2 + 4,725 \cdot 3,4}{113,68} + j \frac{4,725 \cdot 3,4 - 8,087 \cdot 2}{113,68} = 113,39 - j0,988$$

Зная напряжение и мощности в узлах, можно рассчитать потери мощности за отчётный год. Примем число часов использования максимальной нагрузки  $T_{\text{max}} = 5000$  ч, а число часов использования оборудования  $T = 8760$  ч.

Потери электроэнергии в электрической сети состоят из нагрузочных и условно-постоянных потерь:

$$\Delta W = \Delta W_{\text{у-п}} + \Delta W_{\text{н}}$$

Коэффициент формы графика определяется по формуле:

$$k_{\phi}^2 = \frac{1 + 2k_3}{3k_3}$$

$$k_{\phi}^2 = \frac{1 + 2 \cdot 0,571}{3 \cdot 0,571} = 1,25,$$

где  $k_3$  — коэффициент заполнения графика, определяется по формуле:

$$k_3 = \frac{T_{\text{max}}}{T}, \quad k_3 = \frac{5000}{8760} = 0,571$$

Нагрузочные потери электроэнергии в элементах трехфазной сети вычисляются по формуле:

$$\Delta W_H = \frac{P_{cp}^2 + Q_{cp}^2}{U_{cp}^2} \cdot R \cdot T \cdot k_k \cdot k_{\phi}^2$$

$$\Delta W_{H \text{ ПС-1}} = \frac{26,143^2 + 16,908^2}{116,57^2} \cdot 1,25 \cdot 8760 \cdot 0,99 \cdot 1,25 = 966,63 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$$

$$\Delta W_{H \text{ ПС-2}} = \frac{29,154^2 + 15,317^2}{114,539^2} \cdot 1,25 \cdot 8760 \cdot 0,99 \cdot 1,25 = 1120,234 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$$

$$\Delta W_{H \text{ ПС-3}} = \frac{12,096^2 + 9,042^2}{113,68^2} \cdot 3,95 \cdot 8760 \cdot 0,99 \cdot 1,25 = 755,67 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$$

$$\Delta W_{H \text{ ПС-4}} = \frac{8,073^2 + 4,7^2}{113,4^2} \cdot 8 \cdot 8760 \cdot 0,99 \cdot 1,25 = 588,5 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$$

$$\Delta W_{H \text{ ВЛ 1}} = \frac{75,869^2 + 47,114^2}{121^2} \cdot 2,3 \cdot 8760 \cdot 0,99 \cdot 1,25 = 13582,59 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$$

$$\Delta W_{H \text{ ВЛ 2}} = \frac{49,542^2 + 29,59^2}{116,57^2} \cdot 1,9 \cdot 8760 \cdot 0,99 \cdot 1,25 = 5047,43 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$$

$$\Delta W_{H \text{ ВЛ 3}} = \frac{20,22^2 + 13,846^2}{114,539^2} \cdot 2 \cdot 8760 \cdot 0,99 \cdot 1,25 = 992,5 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$$

$$\Delta W_{H \text{ ВЛ 4}} = \frac{8,087^2 + 4,725^2}{113,68^2} \cdot 2 \cdot 8760 \cdot 0,99 \cdot 1,25 = 147,2 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$$

Основной частью условно-постоянных потерь являются потери холостого хода трансформатора и потери на корону в ВЛ.

Условно-постоянные потери в трансформаторе вычисляется по формуле:

$$\Delta W_x = \Delta P_{xxj} \cdot T_{ji} \cdot \left( \frac{U_{ji}}{U_{номj}} \right)^2$$

$$\Delta W_{x \text{ ПС-1}} = 0,05 \cdot 8760 \cdot \left( \frac{116,57}{110} \right)^2 = 491,88, \text{ МВт} \cdot \text{ч}$$

$$\Delta W_{x \text{ ПС-2}} = 0,05 \cdot 8760 \cdot \left( \frac{114,539}{110} \right)^2 = 474,89, \text{ МВт} \cdot \text{ч}$$

$$\Delta W_{x \text{ ПС-3}} = 0,028 \cdot 8760 \cdot \left( \frac{113,68}{110} \right)^2 = 261,96, \text{ МВт} \cdot \text{ч}$$

$$\Delta W_{x \text{ ПС-4}} = 0,02 \cdot 8760 \cdot \left( \frac{113,4}{110} \right)^2 = 186,2, \text{ МВт} \cdot \text{ч}$$

Условно-постоянные потери в воздушных линиях вычисляется по формуле:

$$\Delta W_{y-p \text{ ВЛ}} = \frac{F_{тип}}{F_{ст}} \cdot \Delta W_{кор \text{ уд } j} \cdot n \cdot L_j$$

$$\Delta W_{y-p \text{ ВЛ } 1} = \frac{120}{240} \cdot 0,57 \cdot 2 \cdot 38 = 21,66 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$$

$$\Delta W_{y-p \text{ ВЛ } 2} = \frac{120}{185} \cdot 0,57 \cdot 2 \cdot 23 = 17 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$$

$$\Delta W_{y-p \text{ ВЛ } 3} = \frac{120}{150} \cdot 0,57 \cdot 2 \cdot 20 = 18,24 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$$

$$\Delta W_{y-p \text{ ВЛ } 4} = \frac{120}{120} \cdot 0,57 \cdot 2 \cdot 16 = 18,24 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$$

Суммарные потери в элементах электрической сети приведены в табл. 4.

Таблица 4

Суммарные потери в элементах электрической сети

Потери	В трансформаторах	В линиях
Условно-постоянные $\Delta W_{y-p}$	1414,93	75,14
Нагрузочные $\Delta W_n$	3431,034	19769,72
Суммарные $\Delta W_\Sigma$	24690,824	

Для понимания существенности потерь необходимо сравнить их с отпускком электроэнергии в сеть. Объем электроэнергии, переданной потребителям, определяется по формуле:

$$W_{no} = T_{\max} \sum_{i=1}^n P_{\max i}$$

$$W_{no} = 5000 \cdot (26 + 29 + 12 + 8) = 375000, \text{ МВт} \cdot \text{ч}$$

Приём электроэнергии в сеть вычисляется по формуле:

$$W_{\text{приём}} = W_{no} + \Delta W_\Sigma,$$

$$W_{\text{приём}} = 375000 + 24690,824 = 399690,824, \text{ МВт} \cdot \text{ч}.$$

Рассчитаем процент потерь электроэнергии в сети по формуле:

$$\Delta W_{\Sigma\%} = \frac{\Delta W_\Sigma}{W_{\text{приём}}} \cdot 100\%$$

$$\Delta W_{\Sigma\%} = \frac{24690,824}{399690,824} \cdot 100\% = 6,2\%.$$

**Заключение.** Потери составляют 6,2 % от передаваемой мощности. Величина потерь находится в допустимых пределах и, соответственно, удовлетворяет требованиям по транзиту электроэнергии.

#### Библиографический список

1. Поспелов, Г. Е. Потери мощности и энергии в электрических сетях / Г. Е. Поспелов, Н. М. Сыч. — Москва : Энергоиздат, 1981. — 216 с.
2. Щербина, Ю. В. Снижение технологического расхода энергии в электрических сетях / Ю. В. Щербина, Н. Д. Бойко, А. Н. Бутенко. — Киев : Техника, 1981. — 103 с.
3. Адонц, Г. Т. Методы расчета и способы снижения расхода электроэнергии в электрических сетях энергосистем / Г. Т. Адонц, А. А. Арутюнян. — Ереван : Луйс, 1986. — 183 с.