

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

s_k_a_97@mail.ru

nevada@skillet.ru

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.

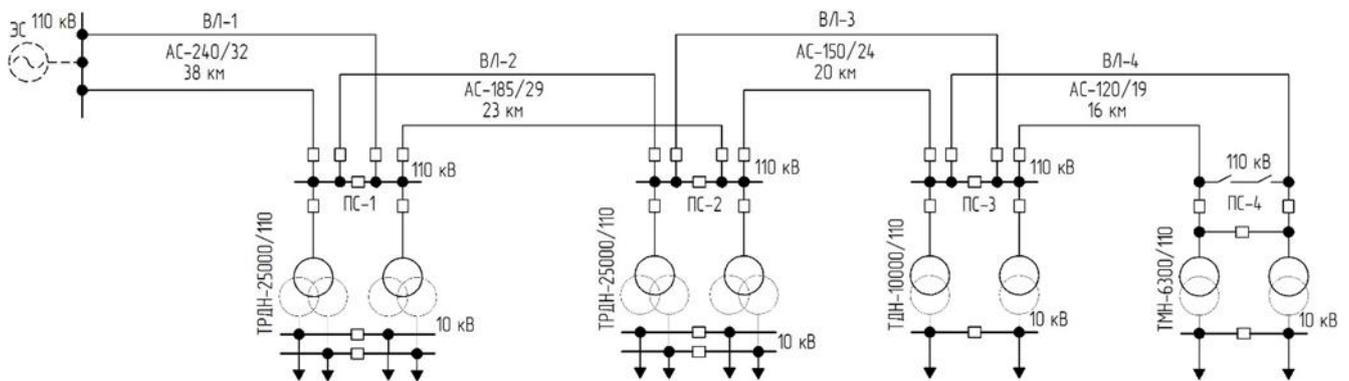


Рис.1. Радиальная магистральная сеть 110 кВ

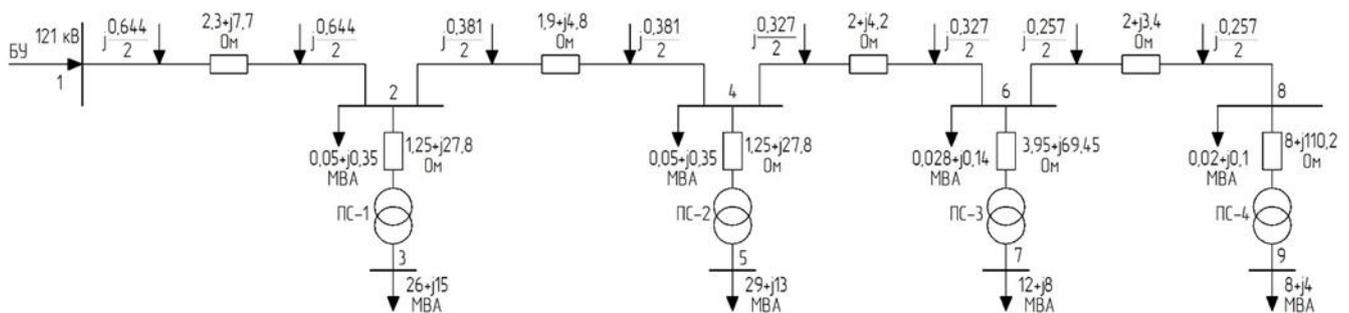


Рис. 2. Схема замещения радиальной магистральной сети 110 кВ

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.

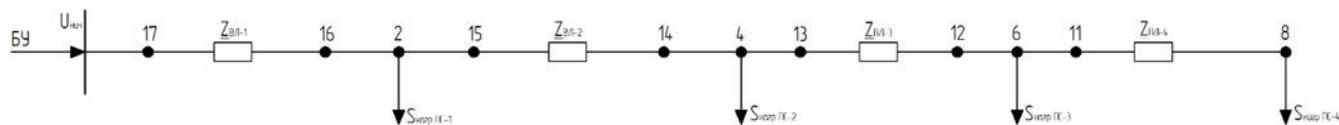


Рис. 3. Упрощённая схема

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:

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

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

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

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

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

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 ΔW_{y-p}	1414,93	75,14
Нагрузочные ΔW_n	3431,034	19769,72
Суммарные ΔW_{Σ}	24690,824	

Для понимания существенности потерь необходимо сравнить их с отпускком электроэнергии в сеть. Объём 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.