

УДК 621.311.017

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ
ЗАГРУЗКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ
В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Докт. техн. наук, проф. ФУРСАНОВ М. И., магистрант ПЕТРАШЕВИЧ Н. С.

Белорусский национальный технический университет

Оптимальное состояние электрической сети может быть обеспечено только в условиях оптимальных режимов работы отдельных звеньев энергосистем [1]. Для соблюдения таких условий необходимо уметь определять и поддерживать оптимальную загрузку основных элементов электрической сети – линий электропередачи и трансформаторов.

В статье предложен способ определения оптимальных коэффициентов загрузки потребительских трансформаторов распределительных сетей б–

10 кВ в условиях эксплуатации. Задача может быть решена двумя способами. Первый состоит в расчете и обеспечении оптимальной загрузки эксплуатируемых трансформаторов, второй – в замене установленных в сети трансформаторов на оптимальные номинальные мощности, которые приведут к аналогичному результату.

Исследование проводилось на примере схемы конкретной распределительной линии 10 кВ, представленной на рис. 1.

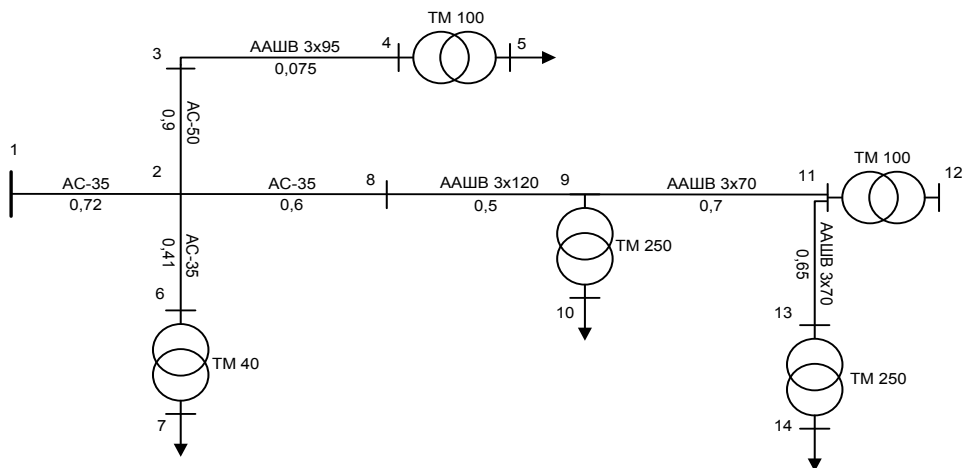


Рис. 1. Схема сети распределительной линии 10 кВ

Проанализированы два базовых режима работы сети – режим наименьших нагрузок (загрузка распределительных трансформаторов принята одинаковой и равной 20 %) и режим наибольших нагрузок (загрузка трансформаторов 100 %).

В качестве критерия оптимальности принят минимум стоимости передачи электрической энергии $C_{п}$, у. е./кВт·ч):

$$C_{п} = \frac{P_{л}K_{л} + \Delta W_{нл}\beta_{н}}{W} + \frac{P_{т}K_{т} + \Delta W_{хт}\beta_{х} + \Delta W_{нт}\beta_{н}}{W}, \quad (1)$$

где $P_{л}$ – суммарный коэффициент отчислений от стоимости линий сети $K_{л}$, о. е.; $\Delta W_{нл}$ – суммарные нагрузочные потери электроэнергии в линиях, кВт·ч; $\beta_{н}$ – стоимость 1 кВт·ч нагрузочных потерь электроэнергии, у. е./кВт·ч; $P_{т}$ – суммарный коэффициент отчислений от стоимости трансформаторов $K_{т}$, о. е.; $\Delta W_{хт}$ – потери электроэнергии холостого хода в трансформаторах, кВт·ч; $\beta_{х}$ – стоимость 1 кВт·ч потерь электроэнергии холостого хода, у. е./кВт·ч; $\Delta W_{нт}$ – нагрузочные потери электроэнергии в трансформаторах, кВт·ч; W – отпуск электроэнергии в сеть, тыс. кВт·ч.

В целях упрощения расчетов формулу (1) преобразуем к виду

$$C_{п} = \frac{A}{W} + \frac{B}{W} + \frac{C}{W}, \quad (2)$$

где

$$A = P_{л}K_{л} + P_{т}K_{т}, \text{ у. е.};$$

$$B = \Delta W_{\text{хт}} \beta_{\text{х}}, \text{ у. е.};$$

$$C = (\Delta W_{\text{нл}} + \Delta W_{\text{нт}}) \beta_{\text{н}}, \text{ у. е.}$$

Суммарные нагрузочные потери $\Delta W_{\text{н}}$ электроэнергии на линейных участках и в трансформаторах определяются по формуле [2]

$$\Delta W_{\text{н}} = \Delta W_{\text{нл}} + \Delta W_{\text{нт}} = \frac{W^2 (1 + \text{tg}^2 \varphi)}{U_{\text{ном}}^2 T \cdot 10^3} k_{\text{ф}}^2 r_{\text{эк}}, \quad (3)$$

где $\text{tg} \varphi$ – коэффициент реактивной мощности, о. е.; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение сети, кВ; T – расчетный период (месяц, квартал, год), ч; $k_{\text{ф}}$ – коэффициент формы графика нагрузки, о. е.; $r_{\text{эк}}$ – эквивалентное активное сопротивление сети ($r_{\text{эк}} = r_{\text{эл}} + r_{\text{эт}}$), Ом.

В (3) исследуемая сеть представлена в виде последовательной цепочки эквивалентных по потерям сопротивлений линий $r_{\text{эл}}$ и трансформаторов $r_{\text{эт}}$.

Постоянные потери электроэнергии в стали трансформаторов $\Delta W_{\text{хт}}$ равны

$$\Delta W_{\text{хт}} = \Delta P_{\text{хт}} T, \quad (4)$$

где $\Delta P_{\text{хт}}$ – потери мощности холостого хода, кВт.

Величина W рассчитывается по формуле

$$W = k_3 S_{\text{ном}} T_{\text{нб}} \cos \varphi, \quad (5)$$

где $S_{\text{ном}}$ – суммарная установленная мощность трансформаторов сети, кВ·А; k_3 – коэффициент загрузки трансформаторов сети, о. е.; $T_{\text{нб}}$ – время использования наибольшей активной нагрузки, ч; $\cos \varphi$ – коэффициент мощности нагрузки, о. е.

С учетом (3)–(5) формула (1) примет вид

$$C_{\text{п}} = \frac{P_{\text{л}} K_{\text{л}} + P_{\text{т}} K_{\text{т}} + \Delta P_{\text{хт}} T \beta_{\text{х}}}{k_3 S_{\text{ном}} T_{\text{нб}} \cos \varphi} + \frac{k_3^2 S_{\text{ном}}^2 T_{\text{нб}}^2}{U_{\text{ном}}^2 T k_3 S_{\text{ном}} T_{\text{нб}} \cos \varphi \cdot 10^3} k_{\text{ф}}^2 r_{\text{эк}} \beta_{\text{н}}. \quad (6)$$

Упростив (6), получим

$$C_{\text{п}} = \frac{P_{\text{л}} K_{\text{л}} + P_{\text{т}} K_{\text{т}} + \Delta P_{\text{хт}} T \beta_{\text{х}}}{k_3 S_{\text{ном}} T_{\text{нб}} \cos \varphi} + \frac{k_3 S_{\text{ном}} T_{\text{нб}}}{U_{\text{ном}}^2 T \cos \varphi \cdot 10^3} k_{\text{ф}}^2 r_{\text{эк}} \beta_{\text{н}}. \quad (7)$$

График функции $C_{\text{п}} = f(k_3)$ показан на рис. 2 и построен по данным [3]: $P_{\text{л}} = 0,19$; $P_{\text{т}} = 0,23$; $\beta_{\text{х}} = 0,026$ у. е./кВт·ч; $\beta_{\text{н}} = 0,064$ у. е./кВт·ч; $K_{\text{т}} = 3364$ у. е.; $K_{\text{л}} = 2343$ у. е.

Из графика рис. 2 видно, что функция $C_{\text{п}} = f(k_3)$ имеет минимум. Для его нахождения воспользуемся частной производной $\partial C_{\text{п}} / \partial k_3 = 0$. После несложных преобразований получим формулу для определения оптимального коэффициента загрузки сети, соответствующего минимуму стоимости передачи электроэнергии:

$$k_{\text{с}} = \sqrt{\frac{P_{\text{т}} K_{\text{т}} + \Delta P_{\text{хт}} T \beta_{\text{х}} + P_{\text{л}} K_{\text{л}}}{\frac{S_{\text{ном}}^2 T_{\text{нб}}^2}{U_{\text{ном}}^2 T \cdot 10^3} k_{\text{ф}}^2 r_{\text{эк}} \beta_{\text{н}}}}. \quad (8)$$

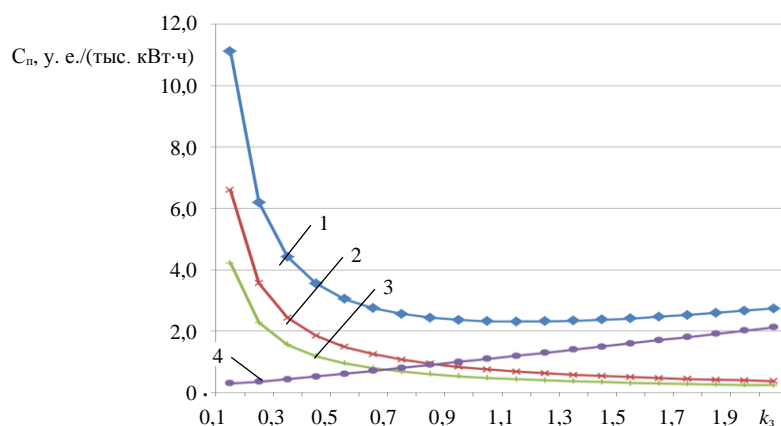


Рис. 2. График стоимости передачи электрической энергии C_p в функции коэффициента загрузки сети k_3 : 1 – C_p ; 2 – A/W ; 3 – B/W ; 4 – C/W

Оптимальный коэффициент загрузки эквивалентной сети, найденный из графика или по формуле (8), равен $k_C = 1,05$. Сравним потери электроэнергии в сети при оптимальном коэффициенте загрузки с потерями в режимах наибольших и наименьших нагрузок. Расчеты потерь проведены по компьютерной программе, разработанной на кафедре «Электрические системы» БНТУ. Результаты расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета потерь электроэнергии в исследуемой сети

Показатель	Режим наименьшей загрузки трансформаторов ($k_3 = 0,20$)	Режим наибольшей загрузки трансформаторов ($k_3 = 1,00$)	Режим при оптимальной загрузке сети ($k_3 = 1,05$)
Нагрузочные потери в линиях $\Delta W_{\text{лн}}$, тыс. кВт·ч (%)	0,55 (0,16)	7,75 (0,49)	9,15 (0,53)
Нагрузочные потери в трансформаторах $\Delta W_{\text{тн}}$, тыс. кВт·ч (%)	1,35 (0,40)	19,14 (1,22)	22,97 (1,33)
Потери холостого хода в трансформаторах $\Delta W_{\text{хт}}$, тыс. кВт·ч (%)	29,04 (8,70)	28,94 (1,84)	28,84 (1,67)
Суммарные потери ΔW_{Σ} , тыс. кВт·ч (%)	30,93 (9,26)	55,82 (3,55)	61,14 (3,54)
Поток электроэнергии на головном участке $W_{\text{гу}}$, тыс. кВт·ч	339,89	1572,62	1727,07
Стоимость передачи электроэнергии C_p , у. е./тыс. кВт·ч	6,190	2,323	2,311

Из табл. 1 видно, что величины относительных потерь в режиме оптимальной загрузки трансформаторов наименьшие (3,54 %) и близки к потерям в режиме наибольшей загрузки (3,55 %) – режим наибольших нагрузок близок к оптимальному. Потери в режиме наименьших нагрузок (9,26 %) в 2,6 раза больше оптимальных, следовательно, сеть следует сильно догрузить. Закономерно возникает вопрос: как?

При построении графика (рис. 2) коэффициенты загрузки всех трансформаторов были приняты одинаковыми. Однако при поиске оптимального состояния реальной сети необходимо уметь определять оптимальные коэффициенты загрузки для каждого трансформатора [4]. Для схемы рис. 1 зависимость (7) примет вид

$$C_{\Pi} = \frac{P_{\Pi} K_{\Pi} + P_{T} K_{T} + \sum_{i=1}^n \Delta P_{xTi} T \beta_x}{\sum_{i=1}^n k_{zi} S_{\text{ном}i} T_{\text{нб}i} \cos \varphi_i} + \frac{\beta_{\text{н}}}{\sum_{i=1}^n k_{zi} S_{\text{ном}i} T_{\text{нб}i} \cos \varphi_i} \sum_{j=1}^m \Delta W_{\text{н}j}, \quad (9)$$

где n – число трансформаторов в сети; m – то же участков в сети (линий и трансформаторов); k_{zi} – искомый коэффициент загрузки i -го трансформатора; $S_{\text{ном}i}$ – номинальная мощность i -го трансформатора; $T_{\text{нб}i}$ – время использования наибольшей нагрузки i -го трансформатора; $\cos \varphi_i$ – коэффициент мощности; ΔP_{xTi} – потери электроэнергии холостого хода; $\Delta W_{\text{н}j}$ – нагрузочные потери электроэнергии на j -м участке схемы,

$$\begin{aligned} \sum_j \Delta W_{\text{н}j} &= \frac{1}{U_{\text{ном}}^2 T \cdot 10^3} \cdot \sum_{i=1}^n \left[(k_{zi} S_{\text{ном}i} T_{\text{нб}i})^2 \sum_{j=1}^{m_i} R_{ji} k_{\Phi j}^2 \right] + \\ &+ \frac{1}{U_{\text{ном}}^2 T \cdot 10^3} \sum_{i=1}^n \left[k_{zi} S_{\text{ном}i} T_{\text{нб}i} \sum_{j=1}^m R_{ji} k_{\Phi j}^2 W_{ij} \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

Формула (10) представляет собой сумму потерь электроэнергии $\sum_j \Delta W_{\text{н}j}$

при протекании потоков электроэнергии от n трансформаторов независимо друг от друга и потерь от взаимного влияния потоков трансформаторов друг

на друга. Введем следующее определение. Назовем: $\sum_{j=1}^{m_i} R_{ji} k_{\Phi j}^2$ – «эффективное» сопротивление пути от i -го трансформатора до источника питания;

$\sum_{j=1}^m R_{ji} k_{\Phi j}^2$ – «эффективное» сопротивление линейных участков схемы, общих

для i -го трансформатора и других трансформаторов, подключенных к данному j -му участку сети;

$W_{ij} = \sum_{i_j=1}^{n_j} W_{ij} =$

$= \sum_{i_j=1}^{n_j} k_{zi_j} S_{\text{ном}i_j} T_{\text{нб}i_j}$ – поток электроэнергии, протекающий по j -й ветви, без учета

потока от i -го трансформатора; $k_{\Phi j}$ – коэффициент графика нагрузки j -й ветви.

В целях упрощения будем считать, что $k_{\Phi ji}^2$ практически не зависит от коэффициента загрузки i -го трансформатора, а $R_{ji} k_{\Phi ji}^2$ обозначим как r_{ji} .

Числитель первого слагаемого выражения (9) не зависит от коэффициентов загрузки трансформаторов и является постоянной величиной. Обозначим:

$$E = \left(P_{\text{л}} K_{\text{л}} + P_{\text{т}} K_{\text{т}} + \sum_{i=1}^n \Delta P_{\text{xti}} T \beta_{\text{x}} \right) U_{\text{НОМ}}^2 T \cdot 10^3; \quad (11)$$

$$F(k_{3i}) = \sum_{i=1}^n \left[(k_{3i} S_{\text{НОМ}i} T_{\text{Нб}i})^2 \sum_{j=1}^{m_i} R_{ji} k_{\Phi j}^2 \right]; \quad (12)$$

$$G(k_{3i}) = \sum_{i=1}^n \left[k_{3i} S_{\text{НОМ}i} T_{\text{Нб}i} \sum_{j=1}^m R_{ji} k_{\Phi j}^2 W_{ij} \right]. \quad (13)$$

С учетом принятых определений и обозначений (10) будет выглядеть следующим образом:

$$C_{\text{п}} = \frac{1}{U_{\text{НОМ}}^2 T \cdot 10^3 \sum_{i=1}^n k_{3i} S_{\text{НОМ}i} T_{\text{Нб}i} \cos \varphi_i} (E + \beta_{\text{н}} F(k_{3i}) + \beta_{\text{н}} G(k_{3i})). \quad (14)$$

Выражение (14) является функцией искомых переменных k_{3i} . Для определения оптимальных значений коэффициентов загрузки k_{3i} можно воспользоваться частными производными $\partial C_{\text{п}} / \partial k_{3i} = 0$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{\text{п}}}{\partial k_{3i}} &= \frac{-E S_{\text{НОМ}i} T_{\text{Нб}i} \cos \varphi_i}{U_{\text{НОМ}}^2 T \cdot 10^3 \left(\sum_{i=1}^n k_{3i} S_{\text{НОМ}i} T_{\text{Нб}i} \cos \varphi_i \right)^2} + \\ &+ \frac{\beta_{\text{н}} \left[2k_{3i} (S_{\text{НОМ}i} T_{\text{Нб}i})^2 \sum_{j=1}^{m_i} r_{ji} \right] \cdot \sum_{i=1}^n k_{3i} S_{\text{НОМ}i} T_{\text{Нб}i} \cos \varphi_i - \beta_{\text{н}} S_{\text{НОМ}i} T_{\text{Нб}i} \cos \varphi_i F(k_{3i})}{U_{\text{НОМ}}^2 T \cdot 10^3 \left(\sum_{i=1}^n k_{3i} S_{\text{НОМ}i} T_{\text{Нб}i} \cos \varphi_i \right)^2} + \quad (15) \\ &+ \frac{2\beta_{\text{н}} \left[S_{\text{НОМ}i} T_{\text{Нб}i} \sum_{j=1}^m r_{ji} W_{ij} \right] \cdot \sum_{i=1}^n k_{3i} S_{\text{НОМ}i} T_{\text{Нб}i} \cos \varphi_i - \beta_{\text{н}} S_{\text{НОМ}i} T_{\text{Нб}i} \cos \varphi_i G(k_{3i})}{U_{\text{НОМ}}^2 T \cdot 10^3 \left(\sum_{i=1}^n k_{3i} S_{\text{НОМ}i} T_{\text{Нб}i} \cos \varphi_i \right)^2} = 0. \end{aligned}$$

Так как знаменатель формулы (15) не равен 0, ее можно преобразовать к виду

$$\begin{aligned} -E + \frac{\beta_{\text{н}}}{\cos \varphi_i} \left[2k_{3i} S_{\text{НОМ}i} T_{\text{Нб}i} \sum_{j=1}^{m_i} r_{ji} \right] \sum_{i=1}^n (k_{3i} S_{\text{НОМ}i} T_{\text{Нб}i} \cos \varphi_i) - \beta_{\text{н}} F(k_{3i}) + \\ + 2 \frac{\beta_{\text{н}}}{\cos \varphi_i} \left[\sum_{j=1}^m r_{ji} \sum_{i_j=1}^{n_j} k_{3i_j} S_{\text{НОМ}i_j} T_{\text{Нб}i_j} \right] \sum_{i=1}^n (k_{3i} S_{\text{НОМ}i} T_{\text{Нб}i} \cos \varphi_i) - \beta_{\text{н}} G(k_{3i}) = 0. \quad (16) \end{aligned}$$

В итоге получаем систему из $(i - 1)$ уравнений вида (16):

В системе (19) каждый коэффициент загрузки k_{zi} представлен в виде линейной функции от других. Данное преобразование позволило применять итерационные методы расчета и использовалось при анализе исследуемой схемы сети (рис. 1). Результаты решения системы (18) (оптимальные значения коэффициентов загрузки трансформаторов) следующие:

$$k_{z(4-5)} = 1,133; k_{z(6-7)} = 1,049; k_{z(9-10)} = 1,310; k_{z(11-12)} = 1,184; k_{z(13-14)} = 0,915.$$

Результаты расчета потерь электроэнергии при оптимальной загрузке эквивалентной электрической сети (105 %) и реальной сети с оптимальными коэффициентами загрузки трансформаторов (113,3; 104,9; 131,0; 118,4; 95,5 %) представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета потерь электроэнергии в оптимальных режимах

Показатель	Потери	
	при оптимальной загрузке эквивалентной сети	в сети при оптимальной загрузке трансформаторов
Нагрузочные потери в линиях $\Delta W_{\text{лн}}$, тыс. кВт·ч (%)	9,150 (0,530)	9,170 (0,520)
Нагрузочные потери в трансформаторах $\Delta W_{\text{тт}}$, тыс. кВт·ч (%)	22,970 (1,330)	23,980 (1,360)
Потери холостого хода в трансформаторах $\Delta W_{\text{хт}}$, тыс. кВт·ч (%)	28,840 (1,670)	28,930 (1,640)
Суммарные потери ΔW_{Σ} , тыс. кВт·ч (%)	61,140 (3,540)	62,080 (3,530)
Поток электроэнергии на головном участке $W_{\text{гу}}$, тыс. кВт·ч	1727,070	1759,450
Стоимость передачи электроэнергии $C_{\text{п}}$, у. е./тыс. кВт·ч	2,311	2,303

Из табл. 2 видно, что результаты расчета потерь электроэнергии (3,54 % и 3,53 %) в обоих режимах практически не отличаются. Это позволяет использовать упрощенные расчеты и анализ эквивалентных электрических сетей при оперативном поиске «очагов» потерь.

Отметим далее, что формулу (19) можно упростить с учетом анализа физического смысла следующей составляющей:

$$\left[\sum_{j=1}^m r_{ji} \sum_{i_j=1}^{n_j} k_{zi_j} S_{\text{ном}i_j} T_{\text{нб}i_j} \right] - \left[\sum_{j=1}^m r_{jq} \sum_{q_j=1}^{n_j} k_{zq_j} S_{\text{ном}q_j} T_{\text{нб}q_j} \right]. \quad (20)$$

Левая часть выражения (20) представляет произведение «эффективных» сопротивлений на потоки электроэнергии в линиях, не являющихся общими для i -го и q -го трансформаторов. Если при решении исходной системы (17) использовать последовательное вычитание одного уравнения системы ($i - 1$)-го из другого i -го, выбирая трансформаторы соседних подстанций, то значением разности (20) при решении системы (18) можно пренебречь. При этом система (18) примет вид:

