

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 6–

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.

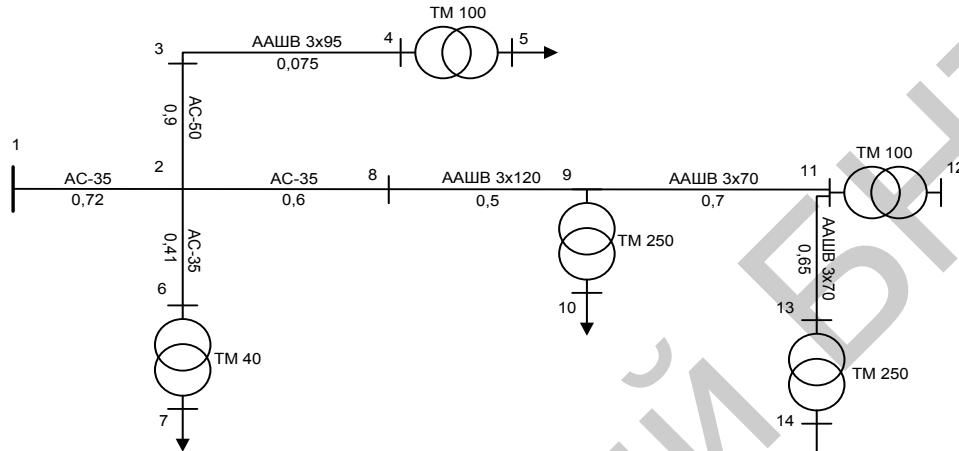


Рис. 1. Схема сети распределительной линии 10 кВ

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_n , у. е./($\text{kVt}\cdot\text{ч}$):

$$C_n = \frac{P_{\text{л}} K_{\text{л}} + \Delta W_{\text{нл}} \beta_{\text{н}}}{W} + \frac{P_{\text{т}} K_{\text{т}} + \Delta W_{\text{xt}} \beta_{\text{x}} + \Delta W_{\text{нт}} \beta_{\text{н}}}{W}, \quad (1)$$

где $P_{\text{л}}$ – суммарный коэффициент отчислений от стоимости линий сети $K_{\text{л}}$, о. е.; $\Delta W_{\text{нл}}$ – суммарные нагрузочные потери электроэнергии в линиях, $\text{kVt}\cdot\text{ч}$; $\beta_{\text{н}}$ – стоимость 1 $\text{kVt}\cdot\text{ч}$ нагрузочных потерь электроэнергии, у. е./($\text{kVt}\cdot\text{ч}$); $P_{\text{т}}$ – суммарный коэффициент отчислений от стоимости трансформаторов $K_{\text{т}}$, о. е.; ΔW_{xt} – потери электроэнергии холостого хода в трансформаторах, $\text{kVt}\cdot\text{ч}$; β_{x} – стоимость 1 $\text{kVt}\cdot\text{ч}$ потерь электроэнергии холостого хода, у. е./($\text{kVt}\cdot\text{ч}$); $\Delta W_{\text{нт}}$ – нагрузочные потери электроэнергии в трансформаторах, $\text{kVt}\cdot\text{ч}$; W – отпуск электроэнергии в сеть, тыс. $\text{kVt}\cdot\text{ч}$.

В целях упрощения расчетов формулу (1) преобразуем к виду

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

где

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

$$B = \Delta W_{xt} \beta_x, \text{ y. e.};$$

$$C = (\Delta W_{hl} + \Delta W_{ht}) \beta_h, \text{ y. e.}$$

Суммарные нагрузочные потери ΔW_h электроэнергии на линейных участках и в трансформаторах определяются по формуле [2]

$$\Delta W_h = \Delta W_{hl} + \Delta W_{ht} = \frac{W^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)}{U_{hom}^2 T \cdot 10^3} k_\phi^2 r_{ek}, \quad (3)$$

где $\operatorname{tg} \varphi$ – коэффициент реактивной мощности, о. е.; U_{hom} – номинальное напряжение сети, кВ; T – расчетный период (месяц, квартал, год), ч; k_ϕ – коэффициент формы графика нагрузки, о. е.; r_{ek} – эквивалентное активное сопротивление сети ($r_{ek} = r_{el} + r_{tr}$), Ом.

В (3) исследуемая сеть представлена в виде последовательной цепочки эквивалентных по потерям сопротивлений линий r_{el} и трансформаторов r_{tr} .

Постоянные потери электроэнергии в стали трансформаторов ΔW_{xt} равны

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

где ΔP_{xt} – потери мощности холостого хода, кВт.

Величина W рассчитывается по формуле

$$W = k_3 S_{hom} T_{hb} \cos \varphi, \quad (5)$$

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

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

$$C_n = \frac{P_l K_l + P_t K_t + \Delta P_{xt} T \beta_x}{k_3 S_{hom} T_{hb} \cos \varphi} + \frac{k_3^2 S_{hom}^2 T_{hb}^2}{U_{hom}^2 T k_3 S_{hom} T_{hb} \cos \varphi \cdot 10^3} k_\phi^2 r_{ek} \beta_h. \quad (6)$$

Упростив (6), получим

$$C_n = \frac{P_l K_l + P_t K_t + \Delta P_{xt} T \beta_x}{k_3 S_{hom} T_{hb} \cos \varphi} + \frac{k_3 S_{hom} T_{hb}}{U_{hom}^2 T \cos \varphi \cdot 10^3} k_\phi^2 r_{ek} \beta_h. \quad (7)$$

График функции $C_n = f(k_3)$ показан на рис. 2 и построен по данным [3]: $P_l = 0,19$; $P_t = 0,23$; $\beta_x = 0,026$ у. е./($\text{kVt} \cdot \text{ч}$); $\beta_h = 0,064$ у. е./($\text{kVt} \cdot \text{ч}$); $K_t = 3364$ у. е.; $K_l = 2343$ у. е.

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

$$k_C = \sqrt{\frac{P_t K_t + \Delta P_{xt} T \beta_x + P_l K_l}{\frac{S_{hom}^2 T_{hb}^2}{U_{hom}^2 T \cdot 10^3} k_\phi^2 r_{ek} \beta_h}}. \quad (8)$$

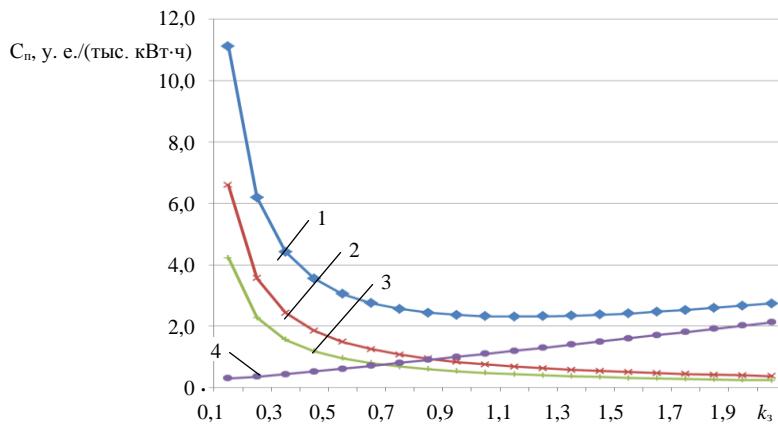


Рис. 2. График стоимости передачи электрической энергии C_n в функции коэффициента загрузки сети k_3 : 1 – C_n ; 2 – A/W ; 3 – B/W ; 4 – C/W

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 $\Delta W_{\text{нл}}$, тыс. кВт·ч (%)	0,55 (0,16)	7,75 (0,49)	9,15 (0,53)
Нагрузочные потери в трансформаторах $\Delta W_{\text{нт}}$, 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_n , 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

$$C_n = \frac{P_L K_L + P_T K_T + \sum_{i=1}^n \Delta P_{xti} T \beta_x}{\sum_{i=1}^n k_{3i} S_{homi} T_{hbi} \cos \varphi_i} + \frac{\beta_h}{\sum_{i=1}^n k_{3i} S_{homi} T_{hbi} \cos \varphi_i} \sum_{j=1}^m \Delta W_{hj}, \quad (9)$$

где n – число трансформаторов в сети; m – то же участков в сети (линий и трансформаторов); k_{3i} – искомый коэффициент загрузки i -го трансформатора; S_{homi} – номинальная мощность i -го трансформатора; T_{hbi} – время использования наибольшей нагрузки i -го трансформатора; $\cos \varphi_i$ – коэффициент мощности; ΔP_{xti} – потери электроэнергии холостого хода; ΔW_{hj} – нагрузочные потери электроэнергии на j -м участке схемы,

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

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

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; $W_{ij} = \sum_{i_j=1}^{n_i} W_{ij} = \sum_{i_j=1}^{n_i} k_{3i_j} S_{homi_j} T_{hbi_j}$ – 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 $k_{\Phi j}^2$ практически не зависит от коэффициента загрузки i -го трансформатора, а $R_{ji} k_{\Phi j}^2$ обозначим как r_{ji} .

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

$$E = \left(P_{\text{J}} K_{\text{J}} + P_{\text{T}} K_{\text{T}} + \sum_{i=1}^n \Delta P_{\text{xti}} T_{\text{H6i}} \beta_{\text{x}} \right) U_{\text{HOM}}^2 T \cdot 10^3; \quad (11)$$

$$F(k_{3i}) = \sum_{i=1}^n \left[(k_{3i} S_{\text{HOMi}} T_{\text{H6i}})^2 \sum_{j=1}^{m_i} R_{ji} k_{\Phi j}^2 \right]; \quad (12)$$

$$G(k_{3i}) = \sum_{i=1}^n \left[k_{3i} S_{\text{HOMi}} T_{\text{H6i}} \sum_{j=1}^m R_{ji} k_{\Phi j}^2 W_{ij} \right]. \quad (13)$$

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

$$C_{\text{H}} = \frac{1}{U_{\text{HOM}}^2 T \cdot 10^3 \sum_{i=1}^n k_{3i} S_{\text{HOMi}} T_{\text{H6i}} \cos \varphi_i} (E + \beta_{\text{H}} F(k_{3i}) + \beta_{\text{H}} G(k_{3i})). \quad (14)$$

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{\text{H}}}{\partial k_{3i}} &= \frac{-ES_{\text{HOMi}} T_{\text{H6i}} \cos \varphi_i}{U_{\text{HOM}}^2 T \cdot 10^3 \left(\sum_{i=1}^n k_{3i} S_{\text{HOMi}} T_{\text{H6i}} \cos \varphi_i \right)^2} + \\ &+ \frac{\beta_{\text{H}} \left[2k_{3i} (S_{\text{HOMi}} T_{\text{H6i}})^2 \sum_{j=1}^{m_i} r_{ji} \right] \cdot \sum_{i=1}^n k_{3i} S_{\text{HOMi}} T_{\text{H6i}} \cos \varphi_i - \beta_{\text{H}} S_{\text{HOMi}} T_{\text{H6i}} \cos \varphi_i F(k_{3i})}{U_{\text{HOM}}^2 T \cdot 10^3 \left(\sum_{i=1}^n k_{3i} S_{\text{HOMi}} T_{\text{H6i}} \cos \varphi_i \right)^2} + \quad (15) \\ &+ \frac{2\beta_{\text{H}} \left[S_{\text{HOMi}} T_{\text{H6i}} \sum_{j=1}^m r_{ji} W_{ij} \right] \cdot \sum_{i=1}^n k_{3i} S_{\text{HOMi}} T_{\text{H6i}} \cos \varphi_i - \beta_{\text{H}} S_{\text{HOMi}} T_{\text{H6i}} \cos \varphi_i G(k_{3i})}{U_{\text{HOM}}^2 T \cdot 10^3 \left(\sum_{i=1}^n k_{3i} S_{\text{HOMi}} T_{\text{H6i}} \cos \varphi_i \right)^2} = 0. \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} &-E + \frac{\beta_{\text{H}}}{\cos \varphi_i} \left[2k_{3i} S_{\text{HOMi}} T_{\text{H6i}} \sum_{j=1}^{m_i} r_{ji} \right] \sum_{i=1}^n (k_{3i} S_{\text{HOMi}} T_{\text{H6i}} \cos \varphi_i) - \beta_{\text{H}} F(k_{3i}) + \quad (16) \\ &+ 2 \frac{\beta_{\text{H}}}{\cos \varphi_i} \left[\sum_{j=1}^m r_{ji} \sum_{i_j=1}^{n_j} k_{3i_j} S_{\text{HOMi}_j} T_{\text{H6i}_j} \right] \sum_{i=1}^n (k_{3i} S_{\text{HOMi}} T_{\text{H6i}} \cos \varphi_i) - \beta_{\text{H}} G(k_{3i}) = 0. \end{aligned}$$

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

Систему (17) можно упростить, последовательно вычитая любое q -уравнение из других. В результате несложных преобразований получим систему, решение которой представляет довольно трудоемкую задачу, предполагает использование ЭВМ и позволяет получить искомые значения оптимальных коэффициентов загрузки трансформаторов:

Следует отметить, что первые $(i - 1)$ уравнения системы (18) можно преобразовать к виду

$$k_{3i} = \left[k_{3q} S_{\text{HOM}q} T_{\text{H}\delta q} \sum_{j_q=1}^{m_k} r_{jq} + \sum_{j=1}^m r_{jq} \sum_{q_j=1}^{n_j} k_{3q_j} S_{\text{HOM}q_j} T_{\text{H}\delta q_j} \right] \frac{\cos \varphi_i}{\cos \varphi_q} - \left[\sum_{j=1}^m r_{ji} \sum_{i_j=1}^{n_j} k_{3i_j} S_{\text{HOM}i_j} T_{\text{H}\delta i_j} \right]. \quad (19)$$

В системе (19) каждый коэффициент загрузки k_{3i} 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:

$$k_{3(4-5)} = 1,133; k_{3(6-7)} = 1,049; k_{3(9-10)} = 1,310; k_{3(11-12)} = 1,184; k_{3(13-14)} = 0,915.$$

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 $\Delta W_{\text{нл}}$, тыс. кВт·ч (%)	9,150 (0,530)	9,170 (0,520)
Нагрузочные потери в трансформаторах $\Delta W_{\text{нт}}$, 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 «кочагов» потерь.

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

$$\left[\sum_{j=1}^m r_{ji} \sum_{i_j=1}^{n_j} k_{3i_j} S_{\text{ном}i_j} T_{\text{нб}i_j} \right] - \left[\sum_{j=1}^m r_{jq} \sum_{q_j=1}^{n_j} k_{3q_j} S_{\text{ном}q_j} T_{\text{нб}q_j} \right]. \quad (20)$$

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:

Решение данной системы позволяет оперативно рассчитать приближенные значения оптимальных коэффициентов загрузки трансформаторов.

ВЫВОДЫ

1. Предложен алгоритмизированный способ определения оптимальных коэффициентов загрузки трансформаторов распределительных электрических сетей 6–10 кВ в условиях эксплуатации.
 2. Для оперативного выявления «очагов» потерь целесообразно проводить расчеты и анализ режимов распределительных сетей на основе их эквивалентирования.
 3. Расчеты реальных электрических сетей с оптимальными коэффициентами загрузки трансформаторов позволяют определять экономически обоснованные уровни потерь в сетях и использовать их при разработке корректирующих мероприятий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федин, В. Т. Основы проектирования энергосистем: учеб. пособие для студентов энергетических специальностей: в 2 ч. / В. Т. Федин, М. И. Фурсанов. – Минск: БНТУ, 2010.
 2. Фурсанов, М. И. Методология и практика расчетов потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем / М. И. Фурсанов. – Минск: Тэхналогія, 2000. – 247 с.
 3. Неклапаев, Б. Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: справочные материалы для курсового и дипломного проектирования / Б. Н. Неклапаев, И. П. Крючков. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.
 4. Падалко, Л. П. Математические методы оптимального планирования развития и эксплуатации энергосистем / Л. П. Падалко. – Минск: Вышэйш. шк., 1973. – 200 с.

Представлена кафедрой электрических систем

Поступила 20.03.2012