

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЗАМЫКАНИИ ФАЗЫ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ 6-10 КВ

Сивокобыленко В.Ф., Лебедев В.К., Махинда Сильва
Донецкий государственный технический университет
svf@fcita.dn.ua

The mathematical model for the analysis of transients process at short circuits on ground in network in 6-10 kv, is developed. Isolation and phases capacity resistance, interphase capacity, motion load, spark gaps are taken into account. Model allows to choose optimum parameters of earthing of the resistor for overvoltage decrease and safe work of relay protection systems.

В настоящее время электрические сети 6-10 кВ работают с изолированной или заземленной через дугогасящий реактор нейтралью [1]. Однако опыт эксплуатации показывает, что при однофазных дуговых замыканиях на землю, являющихся наиболее распространенным видом повреждений в таких сетях, возникают значительные внутренние перенапряжения, приводящие к пробоям изоляции кабелей и электродвигателей в других точках сети, т.е. возникновению множественных повреждений, переходящих в многофазные короткие замыкания. В последние годы предпринимаются попытки внедрения в практику эксплуатации заземления нейтралей указанных сетей через токоограничивающий резистор, устанавливаемый в нейтрали специального трансформатора, что должно приводить к снижению уровня перенапряжений и увеличению надежности функционирования защит от замыканий фазы на землю [2]. Тем не менее до сих пор остается высокой степень повреждаемости электродвигателей в этих сетях и - низкой эффективность работы устройств релейной защиты. Объясняется это недостаточной степенью изученности явлений и процессов при замыканиях фазы на землю, которые в большой степени зависят от конкретных параметров и особенностей сетей 6-10 кВ.

Одно из направлений изучения этих процессов основано на применении метода математического моделирования. Однако известные математические модели [2], как правило, рассматривают только самые простые случаи возникновения замыкания фазы на землю - вблизи сборных шин и не рассматривают процессы при замыкании на землю в индуктивных обмотках двигателей, трансформаторов, а также замыкания при наличии смещения нейтрали, вызванного несимметрией нагрузки.

В данной работе представлена математическая модель, позволяющая анализировать указанные выше явления при глухих и дуговых замыканиях фазы на землю. Рассматривается сеть 6-10 кВ, в которой для низкоомного заземления нейтрали используется специальный серийно выпускаемый трансформатор ТСКЗ - 63/10 или дугогасящий реактор. На рис. 1 приведена схема замещения сети. В этой схеме источник питания представлен фазной индуктивностью рассеяния L и сопротивлением R . Сеть отражена сосредоточенными фазной C и междуфазной C_m емкостями. В цепи последней учтена имеющаяся индуктивность M . Изоляция представлена активными фазными R_a, R_b, R_c и междуфазными R_m сопротивлениями. Специальный присоединительный трансформатор введен в схему фазными значениями индуктивности рассеяния L_T и активного сопротивления R_T . В нейтраль этого трансформатора может быть подключен токоограничивающий резистор R_D и реактор L_D . Высоковольтный электродвигатель включен в схему замещения фазными сверхпереходными индуктивностями рассеяния L_1 и сопротивлениями R_1 . В одной из фаз электродвигателя предусмотрена возможность изменения места возникновения однофазного замыкания на землю по обмотке путем введения изменяемых сопротивлений R_{11}, R_{12} и индуктивностей рассеяния L_{11}, L_{12} . Цепь замыкания фазы на землю в обмотке двигателя имитируется его емкостью C_Z и активным сопротивлением дуги R_Z . Оксидно-цинковые ограничители перенапряжений (ОПН), устанавливаемые на сборных шинах или выводах двигателей [3], учитываются нелинейными зависимостями их активного сопротивления от тока или напряжения. Все токи и принятые их направления показаны на схеме замещения. В режиме замыкания фазы на землю схема описывается следующей системой дифференциальных уравнений относительно неизвестных контурных токов и напряжений в узлах схемы:

$$R_1 i_1 + L p i_1 + U_A - U_B + R(i_1 + i_3) + L p i_1 + L p i_3 = e_a - e_b ; \quad (1)$$

$$R_3 + L p i_3 + U_C - U_B + R(i_1 + i_3) + L p i_1 + L p i_3 = e_c - e_b ; \quad (2)$$

$$R_T i_4 + L_T p i_4 + R_D(i_4 + i_5 + i_6) + L_D p i_4 + L_D p i_5 + L_D p i_6 - U_A = 0 ; \quad (3)$$

$$R_T i_5 + L_T p i_5 + R_D(i_4 + i_5 + i_6) + L_D p i_4 + L_D p i_5 + L_D p i_6 - U_B = 0 ; \quad (4)$$

$$R_T i_6 + L_T p i_6 + R_D(i_4 + i_5 + i_6) + L_D p i_4 + L_D p i_5 + L_D p i_6 - U_C = 0 ; \quad (5)$$

$$R_{11} i_7 + L_{11} p i_7 + R_{12}(i_7 + i_8) + L_{12} p i_7 + L_{12} p i_8 + U_F - U_A = 0 ; \quad (6)$$

$$R_{11} i_8 + L_{11} p i_8 + R_{12}(i_7 + i_8) + L_{12} p i_7 + L_{12} p i_8 + U_F - U_B = 0 ; \quad (7)$$

$$R_{11} i_9 + L_{11} p i_9 + U_F - U_C = 0 ; \quad (8)$$

$$M p i_{16} + U_{PB} + U_B - U_A = 0 ; \quad (9)$$

$$M p i_{17} + U_{KC} + U_C - U_B = 0 ; \quad (10)$$

$$M p i_{18} + U_{NA} + U_A - U_C = 0 ; \quad (11)$$

$$P U_A = \frac{1}{C} i_{13} = \frac{1}{C} (i_1 - i_4 - i_7 - i_{16} + i_{18} - \frac{U_A}{R_{uo}}) ; \quad (12)$$

$$P U_B = \frac{1}{C} i_{14} = \frac{1}{C} (-i_1 - i_3 - i_5 - i_8 - i_{17} + i_{16} - \frac{U_B}{R_{ub}}) ; \quad (13)$$

$$P U_C = \frac{1}{C} i_{15} = \frac{1}{C} (i_3 - i_6 - i_9 - i_{18} + i_{17} - \frac{U_C}{R_{uc}}) ; \quad (14)$$

$$P U_F = \frac{1}{C_Z} i_{10} = \frac{1}{C} (i_7 + i_8 + i_9 - \frac{U_F}{R_Z}) ; \quad (15)$$

$$P U_{PB} = \frac{1}{C_m} (i_{16} - \frac{U_{PB}}{R_m}) ; \quad (16)$$

$$P U_{KC} = \frac{1}{C_m} (i_{17} - \frac{U_{KC}}{R_m}) ; \quad (17)$$

$$P U_{NA} = \frac{1}{C_m} (i_{18} - \frac{U_{NA}}{R_m}) ; \quad (18)$$

где P - оператор дифференцирования.

Для решения данной системы дифференциальных уравнений применен, обладающий повышенной численной устойчивостью, неявный метод Эйлера, общее выражение которого на каждом i-ом шаге расчета h выглядит следующим образом

$$y_i^n = y_{i-1}^n + h f(t_i, y_i^n), \quad (19)$$

где y_i^n - вектор искомых переменных ;

y_{i-1}^n - вектор начальных приближений ;

t_i - текущее время расчета ;

n - количество решаемых уравнений.

Полученная по (19) система линейных алгебраических уравнений, записанная относительно вектора искомых переменных y_i^n решается на каждом шаге методом Гаусса:

$$A \cdot y_i^n = B$$

где A - матрица текущих коэффициентов размером n x n ;

B - вектор - столбец начальных приближений и свободных членов системы уравнений.

Описанная выше модель реализована на ЭВМ в виде Фортран - программы. Для расчета доаварийного режима работы сети разработана подпрограмма, в которой использованы уравнения метода контурных токов.

Для иллюстрации возможностей разработанной модели проведены расчеты режима глухого и дуговых замыканий на землю в сети 6,3кВ, питающейся от трансформатора типа ТРДНС - 63000/35 (R=0,00375 Ом, L=5,1x10⁻⁴ Гн) Параметры присоединительного трансформатора, высоковольтного двигателя и сети составили:

$$R_T = 6,4 \text{ Ом} ; L_T = 0,303 \text{ Гн} ; R_1 = 5,6 \text{ Ом} ; L_1 = 0,012 \text{ Гн} ; C_Z = 3 \times 10^{-8} \text{ ф} ; R_{ua} = R_{ub} = R_{uc} = 1 \times 10^6 \text{ Ом} ;$$

$$C = 4 \times 10^{-6} \text{ ф} ; C_m = 1,34 \times 10^{-6} \text{ ф} ; R_m = 1 \times 10^6 \text{ Ом} ; M = 3 \times 10^{-7} \text{ Гн} ;$$

На рис. 2 приведены результаты расчета глухого замыкания на землю фазы С через сопротивление $R_Z = 2 \text{ Ом}$ при $R_D = 10 \text{ Ом}$. На этом и последующих рисунках приведены фазные напряжения U_A, U_B, U_C , и напряжение смещения нейтрали U_O , а также ток в месте замыкания I_O , который соответствует току i_{10} на схеме замещения (рис.1).

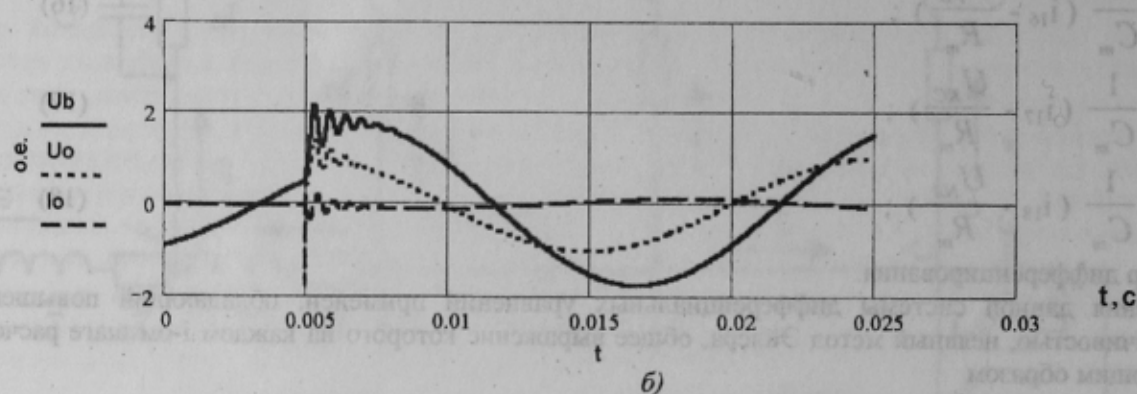
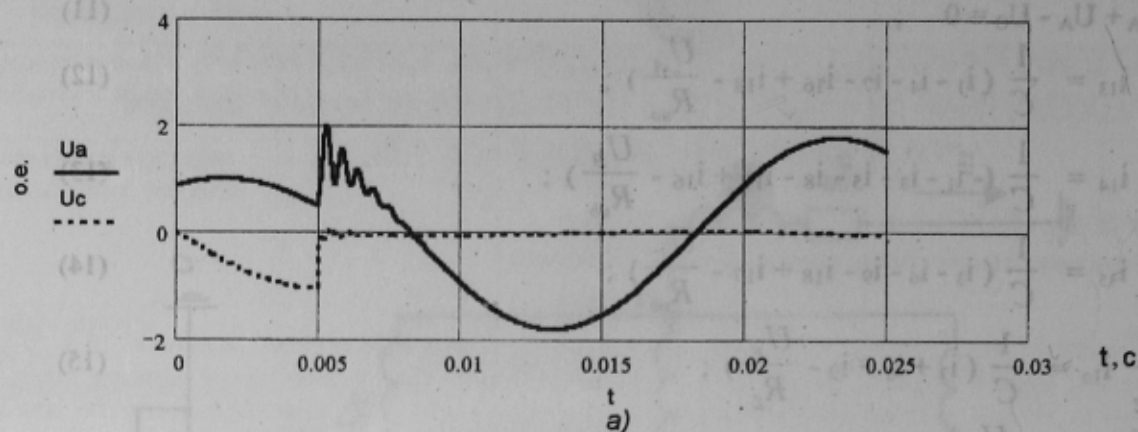


Рисунок 2 - Осциллограмма глухого замыкания на землю:
 а) напряжения U_a, U_c ;
 б) напряжения U_b, U_o и ток I_o .

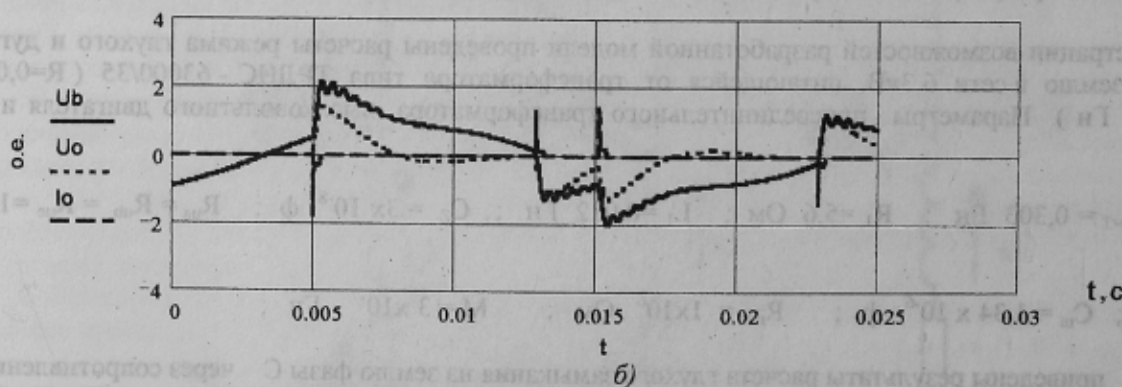
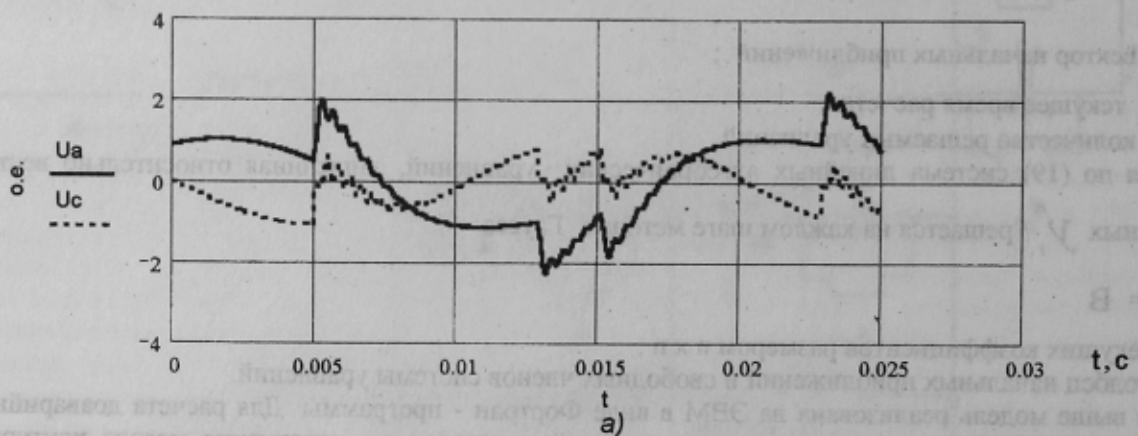


Рисунок 3 - Осциллограмма дугового замыкания на землю:
 а) напряжения U_a, U_c ;
 б) напряжения U_b, U_o и ток I_o .

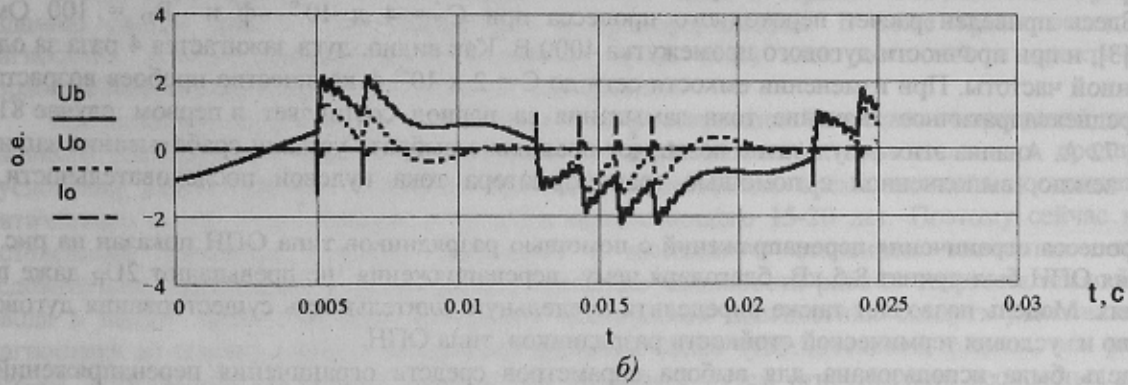
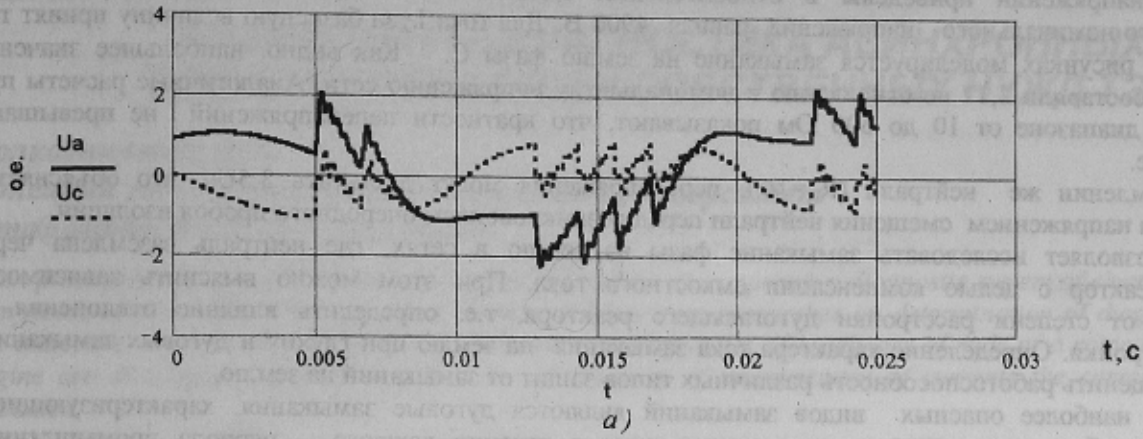


Рисунок 4 - Осциллограмма дугового замыкания на землю :

- а) напряжения U_a, U_c ;
 б) напряжения U_b, U_o и ток I_o .

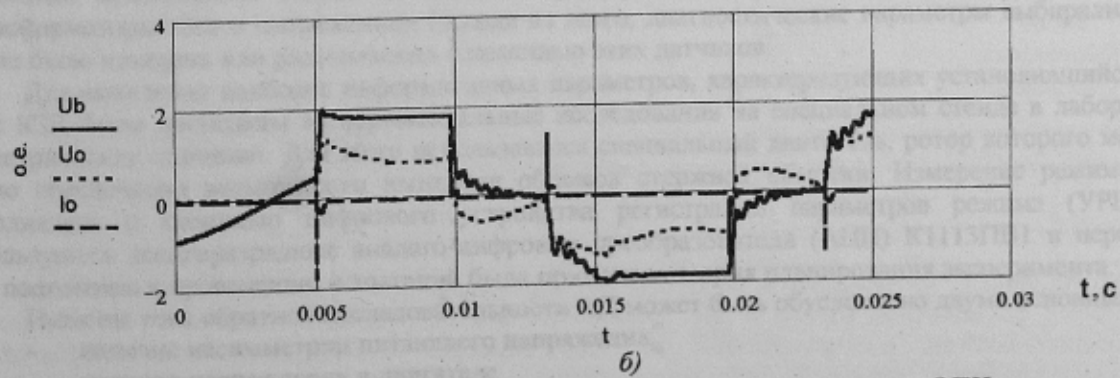
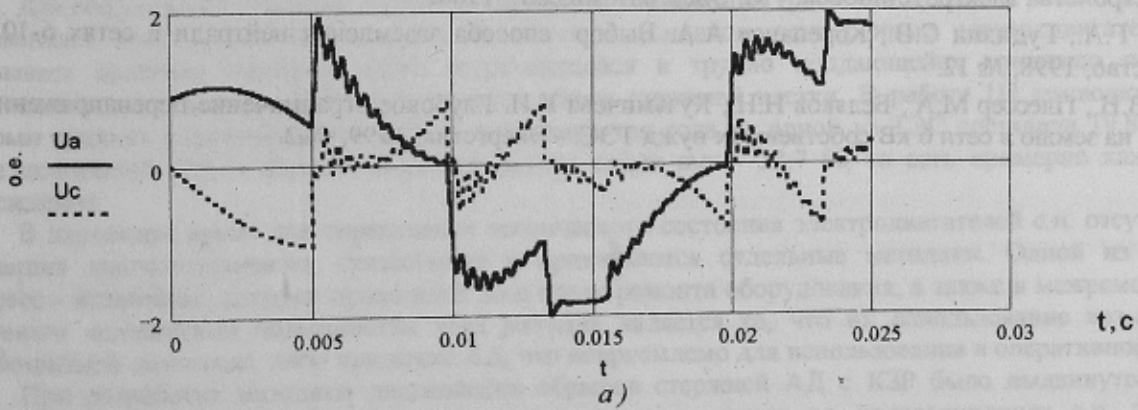


Рисунок 5 - Осциллограмма дугового замыкания на землю с ОПН :

- а) напряжения U_a, U_c ;
 б) напряжения U_b, U_o и ток I_o .

Значения напряжений приведены в относительных единицах. За базисное напряжение принята амплитуда фазного номинального напряжения равная 4900 В. Для тока I_0 за базисную величину принят ток 1000 А. На всех рисунках моделируется замыкание на землю фазы С. Как видно, наибольшее значение перенапряжений составило 2,17 по отношению к номинальному напряжению сети. Аналогичные расчеты при изменении R_D в диапазоне от 10 до 500 Ом показывают, что кратности перенапряжений не превышают отмеченных выше.

При разземлении же нейтрали ($R_D = \infty$), перенапряжения могут достигать $3,5U_N$, что объясняется неустранившимся напряжением смещения нейтрали перед возникновением очередного пробоя изоляции.

Модель позволяет исследовать замыкание фазы на землю в сетях, где нейтраль заземлена через дугогасящий реактор с целью компенсации емкостного тока. При этом можно выяснить зависимость перенапряжений от степени расстройки дугогасящего реактора, т.е. определить влияние отклонения от резонансной настройки. Определение характера тока замыкания на землю при глухих и дуговых замыканиях фазы позволяет оценить работоспособность различных типов защит от замыканий на землю.

Одним из наиболее опасных видов замыканий являются дуговые замыкания, характеризующиеся многократными пробоями изоляции в месте повреждения в течении каждого периода промышленной частоты (рис.3). Здесь приведен расчет переходного процесса при $C = 4 \times 10^{-6}$ ф и $R_D = 100$ Ом, рекомендуемый в [3], и при прочности дугового промежутка 4000 В. Как видно, дуга зажигается 4 раза за один период промышленной частоты. При изменении емкости сети до $C = 2 \times 10^{-6}$ ф количество пробоев возрастает до 8 раз (рис.4). Среднеквадратичное значение тока замыкания за период составляет в первом случае 81 А, во втором случае 72 А. Анализ этих результатов позволяет правильно выбрать уставки срабатывания защиты от замыканий на землю, выполненной с помощью трансформатора тока нулевой последовательности, в конкретной сети.

Характер процесса ограничения перенапряжений с помощью разрядников типа ОПН показан на рис. 5. Порог срабатывания ОПН был принят 8,5 кВ, благодаря чему перенапряжения не превышают $2U_N$ даже при дуговых замыканиях. Модель позволяет также определить предельную длительность существования дугового замыкания на землю из условия термической стойкости разрядников типа ОПН.

Данная модель была использована для выбора параметров средств ограничения перенапряжений в системе собственных нужд 6 кВ тепловых и атомных электростанций

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства электроустановок. - М: Энергоатомиздат, 1986г.
2. Евдокунин Г.А., Гудилин С.В., Корепанов А.А. Выбор способа заземления нейтрали в сетях 6-10 кВ. - Электричество, 1998, № 12.
3. Подъячев В.Н., Плессер М.А., Беляков Н.Н., Кузьмичева К.И. Глубокое ограничение перенапряжений при замыканиях на землю в сети 6 кВ собственных нужд ТЭС. - Энергетик, 1999, №2.

