

УДК 621.316.925

РАСЧЕТЫ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ В КОМПЕНСИРОВАННЫХ СЕТЯХ

Доктора техн. наук, профессора РОМАНЮК Ф. А., НОВАШ В. И., доц. БОБКО Н. Н.,
кандидаты техн. наук, доценты НОВАШ И. В., РУМЯНЦЕВ В. Ю., ТИШЕЧКИН А. А.,
инж. ГЛИНСКИЙ Е. В.

Белорусский национальный технический университет

Токи однофазных замыканий на землю в сетях 6–35 кВ, работающих с незаземленными нейтральями, обусловлены емкостями фаз сети по отношению к земле. При емкостных токах, превышающих некоторое установленное для каждого класса сети значение, осуществляют их частичную или полную компенсацию путем включения дугогасящего реактора (ДГР) между нейтралью и землей. Переходные процессы при однофазных замыканиях в таких сетях содержат наряду с вынужденными составляющими основной частоты несколько быстро затухающих высокочастотных свободных составляющих, обусловленных емкостями и индуктивностями линии и других элементов сети. Характер протекания этих процессов и их количественные показатели представляют интерес для научных работников и инженерно-технического персонала, занимающихся в области релейной защиты, и защиты от перенапряжений распределительных электрических сетей 6–10–35 кВ.

Расчеты однофазных замыканий на землю, необходимые для определения показателей технического совершенства токовых защит нулевой последовательности, реагирующих на токи и напряжения промышленной частоты, можно выполнять без учета сопротивления защищаемой линии и питающей системы. Для оценки селективности, чувствительности, защитоспособности более сложных защит, реагирующих, например, на высокочастотные составляющие входных сигналов, необходим учет значительно количества параметров. Более полный учет информации о параметрах исследуемой системы повышает достоверность результатов расчета и при отсутствии соответствующих экспериментальных данных является единственным доводом их достоверности.

В настоящей статье рассматривается методика численных расчетов на ПЭВМ однофазных замыканий на землю в компенсированных сетях с уче-

том индуктивностей питающей системы, защищаемой линии, активно-индуктивных нагрузок, анализируются некоторые результаты расчетов.

Для проверки селективности и чувствительности защиты линии Л1 от однофазных замыканий на землю в расчетной схеме (рис. 1) предусматриваются две трехфазные группы емкостей фаз системы относительно земли. Одна группа емкостей C_n – суммарная емкость всех присоединений к шинам 6–35 кВ узла нагрузки, кроме защищаемой линии Л1. Емкости C_n создают составляющие тока замыкания на землю, протекающие по защищаемой линии, если однофазное замыкание возникает на этой линии (точка К1). Эти токи вызывают срабатывание защиты, и по ним проверяется ее чувствительность. Другая группа емкостей C_l – суммарная емкость всех присоединений в конце линии Л1, включая емкость самой линии. Эти емкости обуславливают составляющие тока замыкания на землю, протекающие по защищаемой линии в месте установки защиты при внешних замыканиях (точка К2). По ним определяются параметры срабатывания защиты линии Л1, обеспечивающие ее селективность.

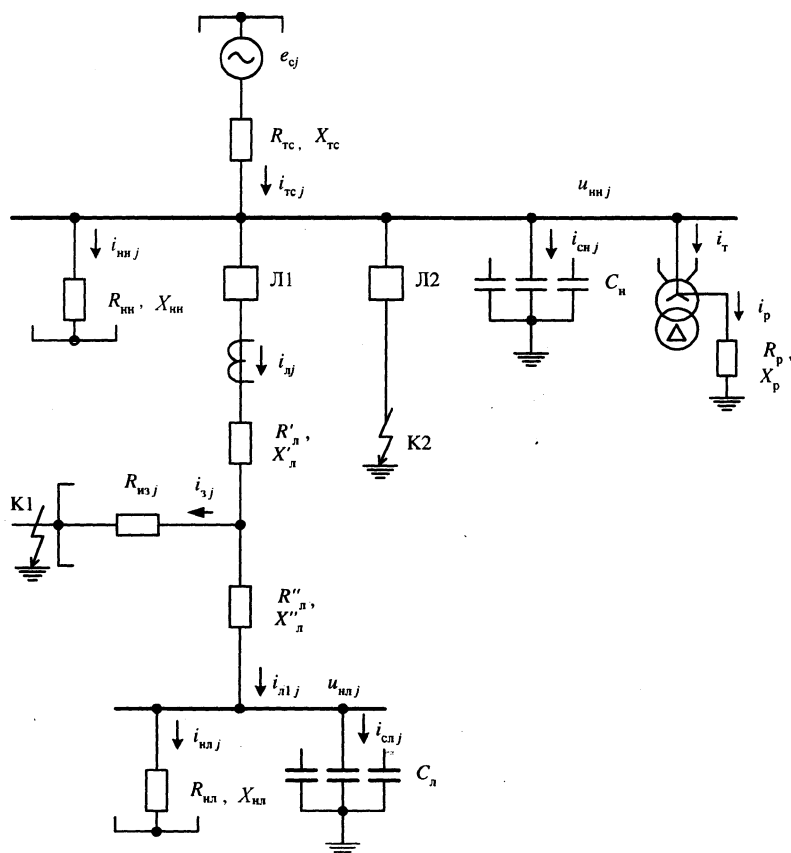


Рис. 1

Питающая система представлена трехфазной симметричной системой ЭДС e_{cj} ($j = A, B, C$) и эквивалентными активно-индуктивными сопротивлениями прямой последовательности $R_{тс}, X_{тс}$, которые состоят из сопротивлений источника питания с незаземленной нейтралью (понижительная подстанция, силовой трансформатор) и линий электропередачи, связывающих

источник питания с шинами узла нагрузки. Линия Л1 представлена актив-но-индуктивными сопротивлениями прямой и нулевой последовательно-стей: $R_{л} = R_{л}' + R_{л}''$; $X_{л} = X_{л}' + X_{л}''$; $R_{л0} = R_{л0}' + R_{л0}''$; $X_{л0} = X_{л0}' + X_{л0}''$. Активные сопротивления изоляции линии $R_{изj}$ включены в месте замыкания на землю, создаваемого уменьшением сопротивления в фазе А до нуля.

Математическая модель системы содержит дифференциальные уравнения баланса напряжений в электрических контурах схемы рис. 1 и уравнения баланса токов в узлах подключения емкостей. Дифференциальные уравнения для расчета замыкания в точке К1 приведены к следующему виду:

$$L_{тс} \frac{di_{тсk}}{dt} = e_{сk} - R_{тс} i_{тсk} - u_{ннк} + \frac{1}{3} u_{н0} \quad (k = A, B);$$

$$L_{нн} \frac{di_{ннк}}{dt} = u_{ннк} - R_{нн} i_{ннк} - \frac{1}{3} u_{н0};$$

$$L_{нл} \frac{di_{нлк}}{dt} = u_{нлк} - R_{нл} i_{нлк} - \frac{1}{3} u_{н0}; \quad (1)$$

$$C_{н} \frac{du_{ннк}}{dt} = i_{тсk} - i_{ннк} - i_{лk} - i_{т};$$

$$C_{н} \frac{du_{н0}}{dt} = -(i_{л0} + i_{п});$$

$$\frac{d}{dt} (L'_{л} i_{лj} + M'_{л} i_{л0}) = u_{ннj} - R'_{л} i_{лj} - R_{изj} i_{зj} \quad (j = A, B, C);$$

$$\frac{d}{dt} (-L''_{л} i_{л1j} - M''_{л} i_{л10}) = u_{нлj} + R''_{л} i_{л1j} - R_{изj} i_{зj};$$

$$C_{л} \frac{du_{нлj}}{dt} = i_{л1j} - i_{нлj}.$$

В этих уравнениях:

$$u_{н0} = u_{ннА} + u_{ннВ} + u_{ннС};$$

$$u_{нл0} = u_{нлА} + u_{нлВ} + u_{нлС};$$

$$i_{л0} = i_{лА} + i_{лВ} + i_{лС}; \quad i_{л10} = i_{л1А} + i_{л1В} + i_{л1С};$$

$L'_{л}$, $L''_{л}$ – индуктивности прямой последовательности частей линии;

$M'_{л} = \frac{1}{3} (L'_{л0} - L'_{л})$; $M''_{л} = \frac{1}{3} (L''_{л0} - L''_{л})$ – коэффициенты взаимной индукции

между фазами частей линии; $L'_{л0}$, $L''_{л0}$ – индуктивности нулевой последовательности частей линии.

Трансформатор, в нейтрали которого включен компенсирующий реактор, моделируется в предположении отсутствия намагничивающих токов [1]. Вследствие отсутствия вторичной нагрузки его первичные токи в режиме замыкания на землю одинаковы и описываются дифференциальным уравнением

$$(L_{\tau} + 3L_p) \frac{di_{\tau}}{dt} = -(R_{\tau} + 3R_p)i_{\tau}. \quad (2)$$

Ток компенсирующего реактора $i_p = 3i_{\tau}$.

Дифференциальные уравнения (1), (2) решаются методом Рунге-Кутты 4-го порядка (РК-4) [2]. При небольшой длине участков линии (менее 5...10 км) в результатах решения последних девяти уравнений (1) проявляется неустойчивость, для их решения применяются неявные методы [3]. Неявные методы решения дифференциальных уравнений сводятся к замене производных $\frac{dy}{dt}$ отношениями приращений $\frac{y_{(t+h)} - Y(t)}{h}$ и отнесением правых частей к моменту времени $t + h$. В этом случае дифференциальное уравнение преобразуется в алгебраическое, содержащее несколько неизвестных величин $y(t + h)$ и некоторые переменные правой части. В неявном методе РК-4 алгебраизированные уравнения на каждом такте различны

$$\frac{\bar{y}(t+h'_k) - Y_k(t)}{h_k} = f[\bar{y}_1(t+h'_k), \bar{y}_2(t+h'_k), \dots, x_1(t+h'_k), x_2(t+h'_k), \dots] \quad (k=1, 2, 3, 4), \quad (3)$$

где $h_k = h, 0,5h, 0,5h, h$; $h'_k = 0, 0,5h, 0,5h, h$; $Y_1 = y(t-h)$; $Y_{2,3,4} = y(t)$.

Упомянутые выше алгебраизированные уравнения системы (1) совместно с уравнениями баланса токов в месте замыкания на землю образуют линейную систему алгебраических уравнений с 12-ю неизвестными $i_{лj}, i_{л1j}, i_{зj}, u_{нлj}$:

$$\begin{aligned} R'_{лл}i_{лj} + R_{нзj}i_{зj} + \frac{M'_{лн}}{h_k}i_{л0} &= u_{нлj} + \frac{L'_{лн}}{h_k}I_{лj} + \frac{M'_{лн}}{h_k}I_{л0} \quad (j = A, B, C); \\ R''_{лл1}i_{л1j} - R_{нзj}i_{зj} + \frac{M''_{лн}}{h_k}i_{л10} + u_{нлj} &= \frac{C_{лн}}{h_k} \left(\frac{L''_{лн}}{h_k}I_{л1j} + \frac{M''_{лн}}{h_k}I_{л10} \right); \\ i_{л1j} - \frac{C_{лн}}{h_k}u_{нлj} &= i_{нлj} - \frac{C_{лн}}{h_k}U_{нлj}; \\ i_{лj} - i_{л1j} - i_{зj} &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь

$$R'_{лп1} = R'_л + \frac{L'_л}{h_k}; \quad R''_{лп1} = R''_л + \frac{L''_л}{h_k}.$$

Индексы такта k при переменных опущены.

Величины, содержащиеся в правых частях, известны в начале каждого шага. Система (4) должна решаться четыре раза на каждом шаге численного интегрирования дифференциальных уравнений (1). Переменные $u_{нпj}$, $i_{нпj}$ вычисляются на каждом такте при решении дифференциальных уравнений явным методом. Решение системы алгебраических уравнений с помощью библиотечной подпрограммы значительно увеличивает длительность вычислительного процесса. Для его ускорения из системы (4) исключаются переменные $i_{л1j}$, $u_{нпj}$. В результате такого преобразования она сводится к системе 6-го порядка относительно переменных $i_{лj}$, i_{3j} (индексы такта k при коэффициентах a и переменных опущены):

$$a_1 i_{лA} + a_2 i_{лB} + a_2 i_{лC} + R_{изA} i_{3A} = P_A;$$

$$a_2 i_{лA} + a_1 i_{лB} + a_2 i_{лC} + R_{изB} i_{3B} = P_B;$$

$$a_2 i_{лA} + a_2 i_{лB} + a_1 i_{лC} + R_{изC} i_{3C} = P_C;$$

$$(a_3 + a_4) i_{лA} + a_4 i_{лB} + a_4 i_{лC} - (a_5 + a_4) i_{3A} - a_4 i_{3B} - a_4 i_{3C} = P_{1A};$$

$$a_4 i_{лA} + (a_3 + a_4) i_{лB} + a_4 i_{лC} - a_4 i_{3A} - (a_6 + a_4) i_{3B} - a_4 i_{3C} = P_{1B};$$

$$a_4 i_{лA} + a_4 i_{лB} + (a_3 + a_4) i_{лC} - a_4 i_{3A} - a_4 i_{3B} - (a_7 + a_4) i_{3C} = P_{1C}.$$

В этих уравнениях:

$$P_j = u_{нпj} + \frac{L'_л}{h_k} I_{лj} + \frac{M'_л}{h_k} I_{л0} \quad (j = A, B, C);$$

$$P_{1j} = i_{нпj} - \frac{C_л}{h_k} (U_{нпj} - \frac{L''_л}{h_k} I_{л1j} - \frac{M''_л}{h_k} I_{л10});$$

$$a_1 = R'_{лп1} + \frac{M'_л}{h_k}; \quad a_2 = \frac{M'_л}{h_k}; \quad a_3 = 1 + R''_{лп1} \frac{C_л}{h_k}; \quad a_4 = \frac{C_л}{h_k} \frac{M''_л}{h_k};$$

$$a_5 = a_3 + R_{изA} \frac{C_л}{h_k}; \quad a_6 = a_3 + R_{изB} \frac{C_л}{h_k}; \quad a_7 = a_3 + R_{изC} \frac{C_л}{h_k}.$$

Математическая модель схемы рис. 1 содержит также уравнения трансформатора тока нулевой последовательности (ТТНП), установленного в

начале линии. ТТНП смоделирован как одновитковый трансформатор тока с тремя первичными обмотками [1].

Для воспроизведения описанной выше модели на ПЭВМ разработана компьютерная программа, выводящая результаты на экран дисплея в темпе расчета в виде осциллограмм. Действующие значения основных величин выдаются на экран в численном виде, мгновенные значения, необходимые для контроля работы программы, с задаваемым шагом дискретизации – во внешний файл последовательного доступа.

Однофазные замыкания на землю на линии Л1 воспроизводились снижением сопротивления изоляции фазы А (до $R_{изА} = 0$ при $I_{з\max} \geq 5 \dots 10$ А, расстоянии до места замыкания $\geq 0,1 \dots 0,2$ км, шаге интегрирования 10^{-5} с). Внешние по отношению к линии Л1 однофазные замыкания моделируются дополнительным дифференциальным уравнением баланса напряжений в фазе А линии Л2.

Ток поврежденной фазы и ток нулевой последовательности, протекающий через ТТНП при однофазных замыканиях на защищаемой линии, близко расположенных к месту установки защиты, содержат две высокочастотные составляющие с резко различающимися частотами (рис. 2). Составляющая, обусловленная емкостью C_n и индуктивностью замкнувшейся фазы L'_n с частотой несколько тысяч герц, затухает в течение 1...2 мс (рис. 3). Вторая составляющая, обусловленная емкостью C_n , суммарной индуктивностью питающей системы и индуктивностью L'_n с частотой порядка несколько сотен герц, затухает в течение 1...2 периодов промышленной частоты. Первая составляющая является помехой и вряд ли может быть использована в качестве информационного параметра. Вторая составляющая отличается большей длительностью существования и большим

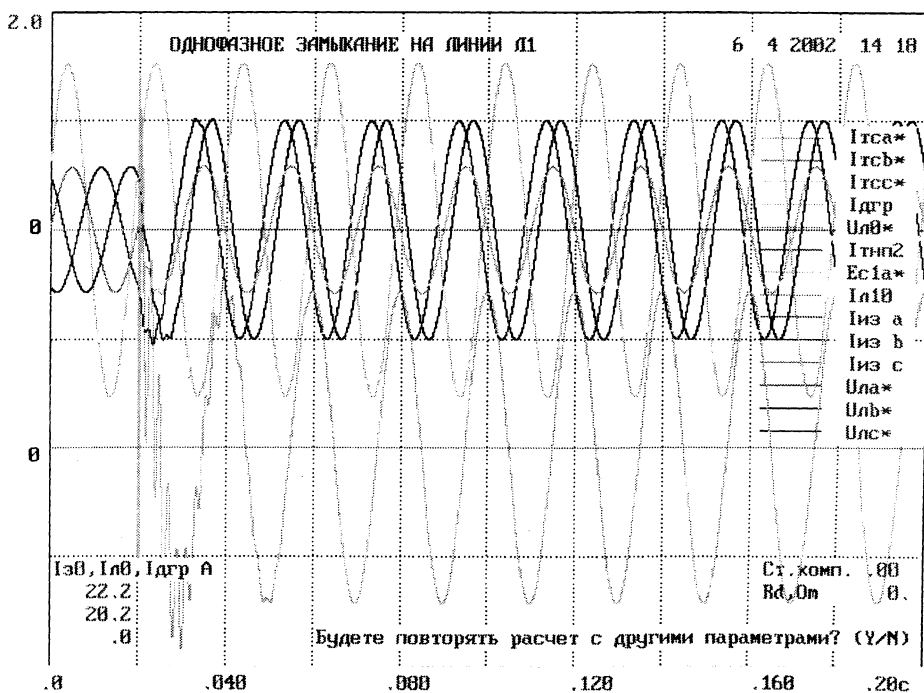


Рис. 2

долевым участием при замыканиях на защищаемой линии, чем при внешних повреждениях (рис. 4). Она может быть использована в качестве признака возникновения замыкания на землю на защищаемой линии в быстродействующих защитах.

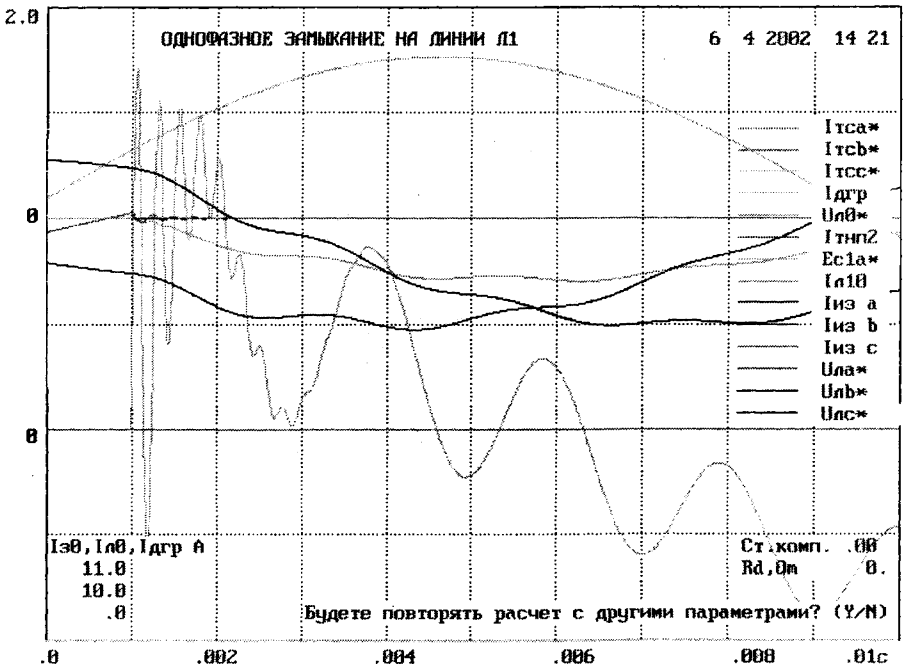


Рис. 3

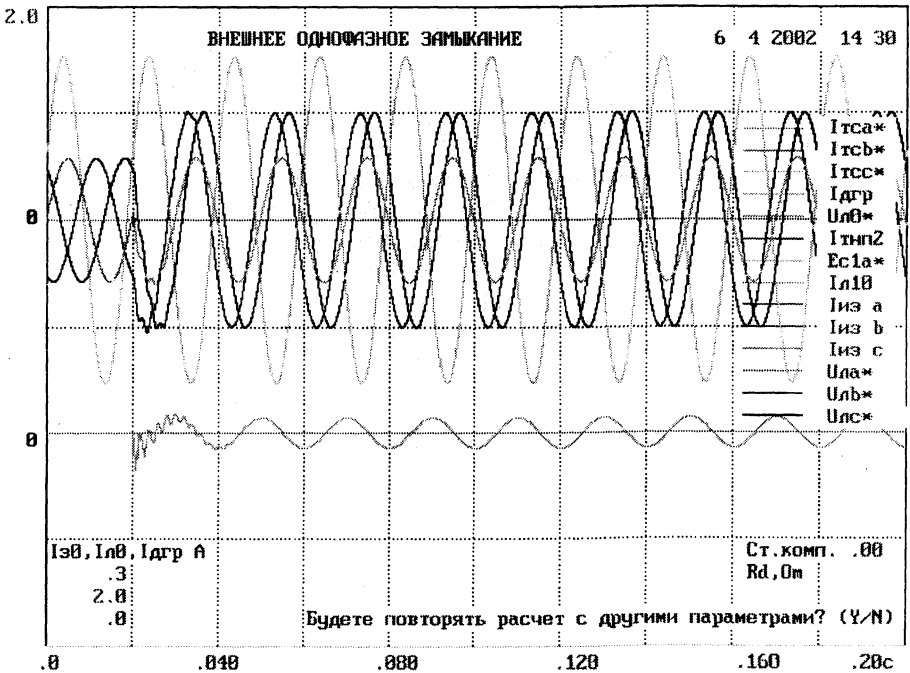


Рис. 4

Высокочастотные составляющие в токах нулевой последовательности наиболее четко выражены, если замыкание происходит при начальной фазе напряжения, отличающейся от 0° . В качестве признака повреждения на линии при высоких степенях компенсации емкостных токов замыкания на землю может быть использована аperiодическая составляющая тока нулевой последовательности (рис. 5), ярко выраженная в течение нескольких периодов промышленной частоты при близкой к нулю фазе напряжения в момент замыкания на землю. Совместно оба эти фактора могут быть использованы в защитах линий при высоких степенях компенсации емкостных токов.

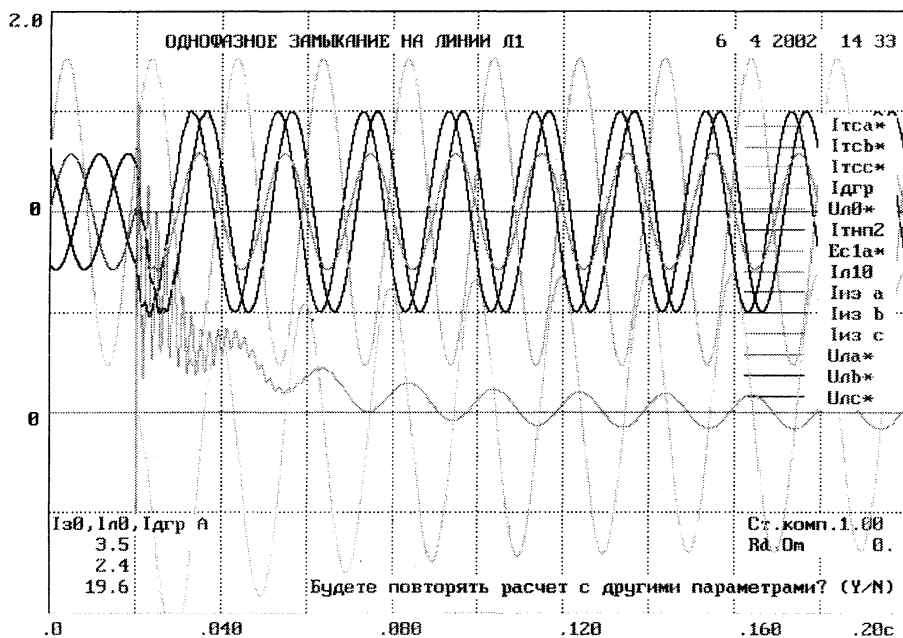


Рис. 5

ВЫВОДЫ

1. Разработаны методика и компьютерная программа расчета переходных процессов при однофазных замыканиях на землю в компенсированных сетях с учетом параметров линии.
2. Свободные высокочастотные составляющие, аperiодические составляющие токов переходного режима могут быть использованы в качестве информационных параметров быстродействующих защит линий в системе с высокими степенями компенсации емкостных токов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Романюк Ф. А., Новаш В. И. Информационное обеспечение вычислительного эксперимента в релейной защите и автоматике энергосистем. – Мн.: ВУЗ-ЮНИТИ, 1998. – 174 с.
2. Боглаев Ю. П. Вычислительная математика и программирование: Учеб. пособие для студентов вузов. – М.: Высш. шк., 1990. – 544 с.
3. Новаш И. В. Об использовании неявных методов численного решения дифференциальных уравнений в расчетах электромагнитных переходных процессов // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1994. – № 1–2. – С. 44–48.

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 19.04.2002