

УДК 621.316.925

ИНФОРМАЦИОННОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА В ИССЛЕДОВАНИИ ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ ДИСТАНЦИОННЫХ ЗАЩИТ ЛИНИЙ 6–10–35 кВ

**Докт. техн. наук, доц. РОМАНЮК Ф. А., доц. БОБКО Н. Н., инж. ГЛИНСКИЙ Е. В.,
кандидаты техн. наук, доценты НОВАШ И. В., РУМЯНЦЕВ В. Ю., ТИШЕЧКИН А. А.,
инженеры КУЦЫЛО А. В., ЧЕРНЫШЕВИЧ А. В.**

Белорусская государственная политехническая академия

Вычислительный эксперимент предназначен для оценки показателей технического совершенства измерительных органов (ИО) сопротивления в аварийных и послеаварийных режимах линии, на которой установлена дистанционная защита. Для ИО I и II ступеней трехступенчатой защиты оценивается селективность и защитоспособность, для ИО I ступени представляет интерес также быстрота срабатывания. Для ИО III ступени оценивается чувствительность и отстроенность от максимальных рабочих режимов с учетом самозапуска электродвигателей потребителей. Оценка селективности, чувствительности, защитоспособности, отстроенности от рабочих режимов заключается в определении вектора входного сопротивления линии в исследуемом режиме и оценке положения вектора по отношению к характеристике ИО на комплексной плоскости сопротивлений.

Основным элементом математического обеспечения вычислительного эксперимента является программный комплекс, воспроизводящий комплексную математическую модель узла распределительной сети с защищаемой линией. Комплексная математическая модель содержит математическое описание защищаемой линии и соседних элементов распределительной сети, оказывающих заметное влияние на параметры аварийных режимов, а также математические модели измерительных трансформаторов и алгоритм функционирования ИО сопротивления. В программный комплекс наряду с программами расчета режимов узла сети входят программы обработки исходной информации и графического представления результатов в темпе расчета. В состав информационного обеспечения вычислительного эксперимента входят параметры всех элементов узла распределительной сети и защищаемой линии, измерительных трансформаторов тока и напряжения, ИО сопротивления, параметры исходного установившегося режима узла сети, временные параметры протекания исследуемого режима. ИО сопротивления наряду с алгоритмом определения входного сопротивления линии представлен параметрами, по которым строится его характеристика в комплексной плоскости входных сопротивлений.

Узел распределительной сети содержит элементы сети, оказывающие заметное количественное и качественное влияние на характер первичной информации, определяющей поведение ИО сопротивления. Количественное влияние следует считать существенным, если оно предположительно оценивается величинами порядка 3–5 % и более от расчетных действующих значений токов и напряжений, подводимых к защите в режимах КЗ. Качественное влияние оценивается примерно таким же содержанием свободных составляющих переходного процесса, высших гармоник в токах и напряжениях защищаемого объекта при коротких замыканиях и после их отключения. Исходя из этих соображений в основу расчетной схемы распределительной сети для исследования работы дистанционной защиты линий 6–10–35 кВ с двухсторонним питанием положена схема узла распределительной сети, питающегося от энергосистемы через понизительный трансформатор. Однолинейная расчетная схема узла сети приведена на рис. 1.

Основная питающая система представлена как система конечной мощности с неизменными ЭДС и частотой, связанная с шинами высшего напряжения (ВН) узла сети линиями электропередачи. Силовой трансформатор – трехстержневой двухобмоточный трансформатор со схемой соединения обмоток – $Y_0/\Delta-11$ и заземлением нейтрали через активно-индуктивное сопротивление. Последнее позволяет при $X_{ТН} = 0$ учесть реальное активное сопротивление заземления нейтрали, а при задании достаточно больших значений $X_{ТН}$, $R_{ТН}$ исследовать режимы сети НН при незаземленной нейтрали трансформатора без изменения структуры математической модели. Линия Л1 на стороне НН, защита которой является предметом исследования, имеет дополнительный источник питания, также представленный как система конечной мощности $S_{сн1}$ с неизменными ЭДС и частотой. Для того чтобы можно было проверить работу защит линии Л1 при КЗ в зоне дальнего резервирования, в расчетную схему введены линии Л2 и Л3, в различных точках которых можно задавать короткие замыкания. Для исследования поведения ИО сопротивления защит Л1 и Л2 при КЗ на линии Л2 и наличии подпитки места КЗ также предусмотрен источник питания $S_{сн2}$, задаваемый аналогичными параметрами. Воспроизведение КЗ, усложненных токами предшествующего режима, обеспечивается наличием в расчетной схеме активно-индуктивных нагрузок на шинах ВН, НН подстанции и в промежуточных точках сети НН. Линия Л4 введена для оценки селективности защиты линии Л1 при КЗ «за спиной» ее защиты (точка К4).

Математическое описание узла распределительной сети составлено в соответствии с трехлинейной электрической схемой, приведенной на рис. 2. Питающая система на стороне ВН представлена симметричной системой ЭДС прямой последовательности e_j ($j = A, B, C$) и результирующими сопротивлениями прямой последовательности X_c , R_c . Для учета взаимоиндукций между фазами и землей при расчете КЗ на землю в нейтраль системы введена ветвь, параметры которой определяются через сопротивления прямой и нулевой последовательностей системы.

Нагрузка на стороне ВН представлена трехфазной ветвью с индивидуальными значениями сопротивлений в фазах и цепи заземления нейтрали, что позволяет воспроизводить на этой стороне все виды междуфазных КЗ и КЗ на землю. Нагрузки на стороне НН представляются симметричными активно-индуктивными ветвями с незаземленными

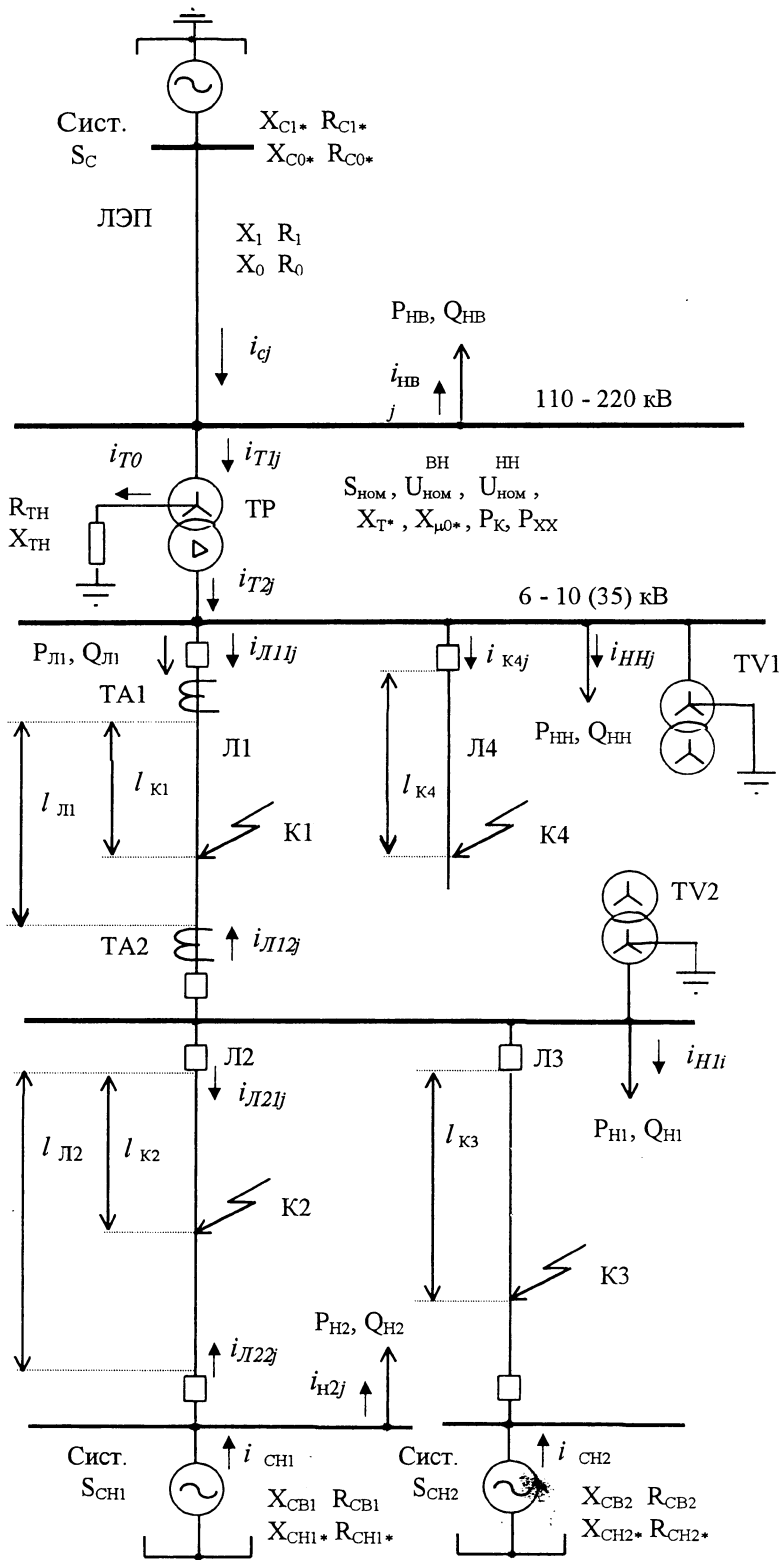
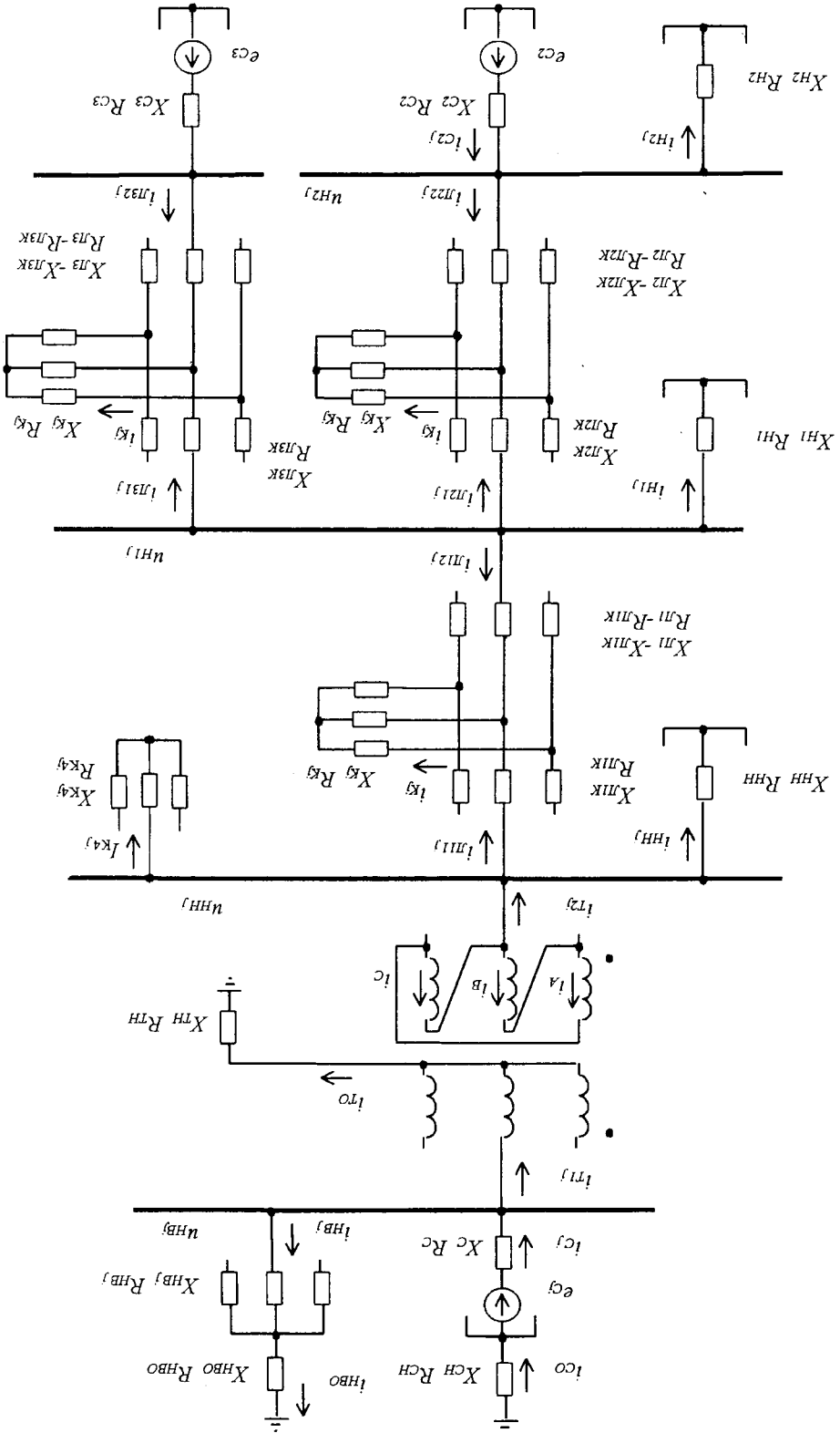


Рис. 1

Рис. 2



нейтралями. Источники питания на стороне НН представлены симметричными системами ЭДС прямой последовательности с незаземленными нейтралями и ее активно-индуктивными сопротивлениями. При задании мощностей систем $S_{сн1}$, $S_{сн2}$ равными нулю соответствующая ветвь представляется как нагрузочная, если этому не противоречат направления мощностей в исходном режиме.

Математическим аппаратом для получения входных сигналов цифровых устройств релейной защиты — выборки мгновенных значений токов и напряжений защищаемого объекта — являются обыкновенные дифференциальные и алгебраические уравнения, которые составляются для всех элементов схем рис. 1, 2.

Математическая модель содержит дифференциальные уравнения баланса ЭДС и падений напряжений в замкнутых контурах схемы сети, алгебраические уравнения баланса токов в узлах схемы сети, баланса МДС в магнитных контурах, баланса магнитных потоков в узлах магнитопровода трансформатора. Дифференциальные уравнения замкнутых контуров схемы сети получаются из уравнений элементов схемы путем исключения из них напряжений $u_{ннj}$, $u_{нвj}$, $u_{н1j}$, $u_{н2j}$. После ряда преобразований дифференциальные уравнения приводятся к виду, требуемому для их численного интегрирования шаговыми методами.

Дифференциальные уравнения замкнутых контуров на стороне ВН:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dy_1}{dt} = e_A - e_B - R_C(i_{CA} - i_{CB}) - R_{нВА}i_{нВА} + R_{нВВ}i_{нВВ}; \\ \frac{dy_2}{dt} = e_B - e_C - R_C(i_{CB} - i_{CC}) - R_{нВВ}i_{нВВ} + R_{нВС}i_{нВС}; \\ \frac{dy_3}{dt} = -R_{C0}i_{C0} - R_{нВА}i_{нВА} - R_{нВВ}i_{нВВ} - R_{нВС}i_{нВС} - 3R_{нВ0}i_{нВ0}; \\ \frac{dy_4}{dt} = e_A - e_B - R_C(i_{CA} - i_{CB}) - R_{Т1}(i_{Т1А} - i_{Т1В}); \\ \frac{dy_5}{dt} = e_B - e_C - R_C(i_{CB} - i_{CC}) - R_{Т1}(i_{Т1В} - i_{Т1С}); \\ \frac{dy_6}{dt} = -R_{C0}i_{C0} - (R_{Т1} + 3R_{ТН})i_{Т0}. \end{array} \right. \quad (1)$$

Интегрируемые переменные y_1, \dots, y_6 , имеющие размерности потокоцеплений, являются функциями токов в контурах схемы сети:

$$\left\{ \begin{array}{l} y_1 = L_C(i_{CA} - i_{CB}) + L_{нВА}i_{нВА} - L_{нВВ}i_{нВВ}; \\ y_2 = L_C(i_{CB} - i_{CC}) + L_{нВВ}i_{нВВ} - L_{нВС}i_{нВС}; \\ y_3 = L_{C0}i_{C0} + L_{нВА}i_{нВА} + L_{нВВ}i_{нВВ} + L_{нВС}i_{нВС} + 3L_{нВ0}i_{нВ0}; \\ y_4 = L_C(i_{CA} - i_{CB}) + w_1 S_C(B_A - B_B) - w_1(\Phi_{КА} - \Phi_{КВ}); \\ y_5 = L_C(i_{CB} - i_{CC}) + w_1 S_C(B_B - B_C) - w_1(\Phi_{КВ} - \Phi_{КС}); \\ y_6 = L_{C0}i_{C0} + (L_{Т0} + 3L_{ТН})i_{Т0} + w_1 \frac{R_{\mu К}}{R_{\mu 0} + R_{\mu К}} \Phi_0. \end{array} \right. \quad (2)$$

Здесь $\Phi_0 = S_c(B_A + B_B + B_C)$; $B_j = \Phi_j/S_c$ ($j = A, B, C$) – индукции в стержнях магнитопровода трансформатора.

Аналогичный вид имеют дифференциальные и алгебраические уравнения на стороне низкого напряжения. В состав математической модели узла сети входят также уравнения трехфазных групп ТТ и ТН [1].

Система уравнений узла сети содержит в зависимости от вида исследуемого режима 15–17 дифференциальных и 60–66 алгебраических уравнений, а система уравнений трансформаторов тока – 2–3 дифференциальных и 7–10 алгебраических уравнений в зависимости от количества ТТ в группе. Полная система трехфазной группы трансформаторов напряжения содержит 6 дифференциальных и 25 алгебраических уравнений. Результаты решения уравнений расчетной схемы используются в качестве исходных данных – первичных токов и напряжений – при решении уравнений измерительных трансформаторов.

Учет самозапуска электродвигателей потребителей при расчете послеаварийных режимов осуществляется изменением сопротивления нагрузок Н1 и Н2, вычисленных исходя из увеличенных в $K_{зап}$ раз их реактивных мощностей.

Виды КЗ на стороне ВН задаются малыми значениями (вплоть до нулевых) сопротивлений соответствующих фаз и нейтрали нагрузочной ветви $R_{НВj}$, $X_{НВj}$, $R_{НВ0}$, $X_{НВ0}$. В исходном режиме эти сопротивления определяются в соответствии с заданными нагрузками на стороне ВН.

При рассмотрении режимов КЗ на стороне НН силового трансформатора нагрузочная ветвь на стороне ВН считается симметричной с параметрами $R_{НВ}$, $X_{НВ}$, $R_{НВ0}$, $X_{НВ0}$, а в цепь линии Л1, Л2 или Л3, на которой рассматривается КЗ, вводится несимметричная трехфазная цепь с активно-индуктивными сопротивлениями R_{Kj} , X_{Kj} , соответствующим образом учитываемая в уравнениях математической модели.

В исходном режиме R_{Kj} , L_{Kj} задаются высокими значениями, чтобы токи в ветви не оказывали заметного влияния на токи линии Л1. Короткие замыкания того или иного вида задаются нулевыми значениями сопротивлений R_{Kj} и индуктивностей L_{Kj} соответствующих фаз. Переходные сопротивления в составе R_{Kj} при двухфазных КЗ задаются в одной фазе, при трехфазных КЗ – в двух фазах.

Параметры L_{K4j} , R_{K4j} при расчете нормального и послеаварийного режимов задаются достаточно высокими, чтобы линия Л4 не оказывала заметного влияния на режим системы. При расчете КЗ в точке К4 эти величины определяются в зависимости от параметров линии Л4 и расстояния до места КЗ.

Вычислительный эксперимент реализуется с помощью компьютерной программы, воспроизводящей нормальный установившийся режим, предшествующий короткому замыканию, режим развивающегося короткого замыкания, режим отключения КЗ и послеаварийный режим системы после КЗ. Программа на алгоритмическом языке Фортран состоит из головной программы и ряда подпрограмм. В головной программе вычисляются наиболее часто используемые константы, начальные значения некоторых переменных, реализуется временная последовательность исследуемых режимов и укрупненный алгоритм решения дифференциальных уравнений. Подпрограммы реализуют алгоритмы ввода исходных данных, расчета исходного режима и начальных условий, решения алгебраических уравнений, вычисления правых частей диффе-

ренциальных уравнений, изменения режимов, вывода результатов с их графическим и численным представлением на экране дисплея.

Решение дифференциальных уравнений выполняется методом Рунге-Кутты 2-го порядка с определением неинтегрируемых переменных на втором такте путем экстраполяции. Шаг интегрирования, обеспечивающий устойчивость и точность решения на интервале времени до 1–2 с с сохранением 3–4 правильных значащих цифр результатов, принимается порядка 50–100 мкс. Системы алгебраических уравнений узла сети решаются итерационным методом с уточнением очередных приближений по формуле Вегстейна, обеспечивающим быстроту решения и сходимость итерационного процесса. Линейная часть системы алгебраических уравнений сводится к девяти уравнениям, решаемым с помощью библиотечной подпрограммы.

Исходными данными для расчета указанных режимов наряду с параметрами схем рис. 1, 2 являются параметры предшествующего установившегося режима, признаки вида и места КЗ, время возникновения КЗ, переходов развивающегося КЗ из одного вида в другой, момента начала расчета режима отключения КЗ, момента окончания послеаварийного режима.

Параметрами исходного режима являются действующее значение и начальная фаза линейного напряжения U_{AB} на шинах НН, мощности активных и реактивных нагрузок на шинах НН и ВН, активная и реактивная мощности линии Л1 и Л3, частота ЭДС питающих систем. Место КЗ – расстояние от начала соответствующей линии до точки КЗ, а также величина переходного сопротивления в месте КЗ задаются по запросу ЭВМ с клавиатуры.

Состав и форма представления результатов расчета задаются кодами, содержащимися в исходных данных. В режимах проверки работоспособности программы, правильности задания исходных данных, выбора варианта расчета наиболее характерные параметры режима сети выдаются на экран дисплея в темпе расчета в виде осциллограмм, а также записываются во внешний файл в численном виде с повышенной разрядностью – до шести-семи значащих цифр.

Оценка основных показателей технического совершенства ИО производится визуально по положению точки конца вектора входного сопротивления относительно графического изображения характеристики соответствующей ступени защиты на экране дисплея. Количественная оценка некоторых показателей осуществляется по численным величинам активной и реактивной составляющих вектора входного сопротивления, их отклонениям от расчетных значений, полученных в соответствии с известными нормативными документами и литературными источниками. На рис. 3 представлены траектории векторов входных сопротивлений защищаемой линии 10 кВ при развивающемся металлическом трехфазном КЗ фаз $AB - C$ в конце первой ступени защиты. Входные сопротивления определялись по алгоритму, основанному на модели линии [2]. Погрешности входных сопротивлений не превышают 1 %. На рис. 4 показаны те же величины при трехфазном КЗ через переходные сопротивления электрической дуги между фазами B и C . Погрешности входных сопротивлений достигают 15–20 %.

Расчет режима длительностью 0,5–1 с на современных ПЭВМ требует не более 1 минуты машинного времени.

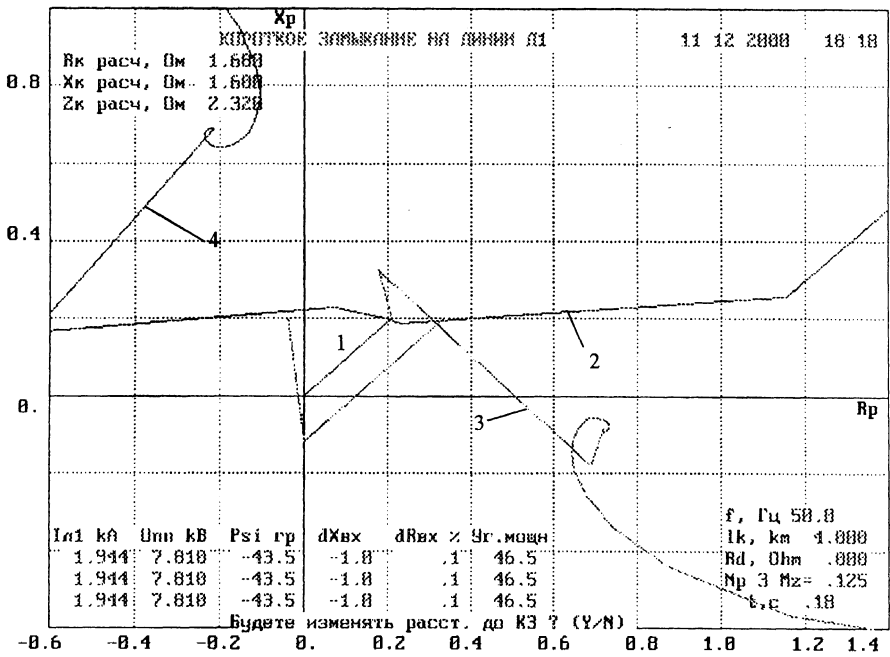


Рис. 3. 1 – вектор \underline{Z}_{vx} расч; 2 – годограф $\underline{Z}_{vx AB}$; 3 – годограф $\underline{Z}_{vx BC}$; 4 – годограф $\underline{Z}_{vx CA}$

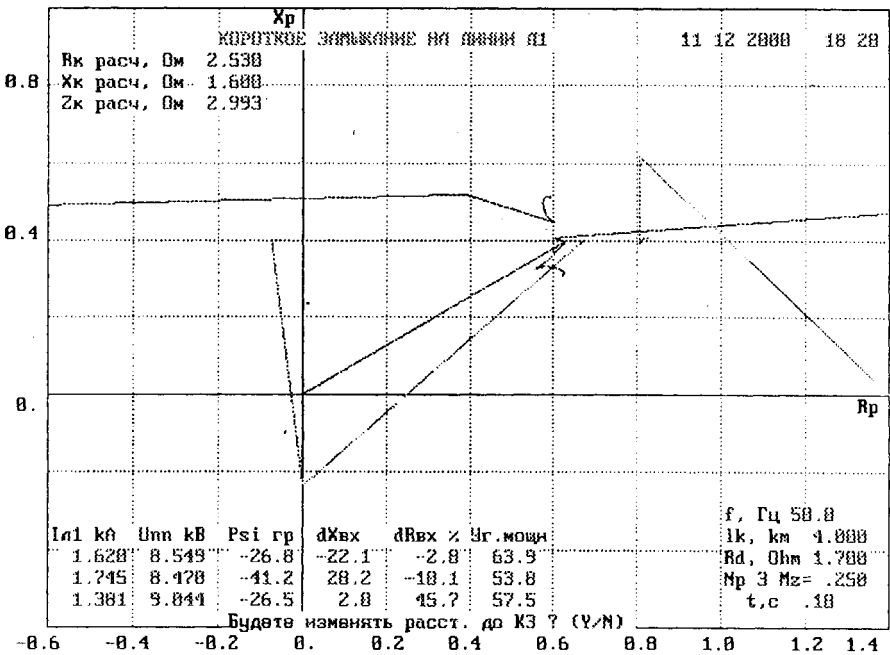


Рис. 4

ВЫВОДЫ

1. Вычислительный эксперимент является эффективным средством оценки работоспособности цифровых измерительных органов сопротив-

ления в процессе разработки микропроцессорных дистанционных защит линий 6–10–35 кВ с двухсторонним питанием.

2. Компьютерная программа вычислительного эксперимента может быть использована для уточнения параметров срабатывания, оценки селективности и защитоспособности ИО сопротивления дистанционных защит линий 6–10–35 кВ любого аппаратного исполнения.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Романюк Ф. А., Новаш В. И. Информационное обеспечение вычислительного эксперимента в релейной защите и автоматике энергосистем. — Мн.: ВУЗ-ЮНИТИ, 1998. — 174 с.

2. Шнейерсон Э. М. Дистанционные защиты. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 448 с.

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 1.02.2001

УДК 621.3.066.6

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СЛОИСТЫХ ПРОВОДНИКАХ И СТРУКТУРАХ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Докт. техн. наук, проф. ГЕРАСИМОВИЧ А. Н., инж. ГЕРАСИМОВИЧ Д. А.

Белорусская государственная политехническая академия

Инж. ЯКОВЛЕВ Г. В.

ПО «Витебскэнерго»

Канд. техн. наук МИШКИНА М. А., инж. ЕЖЕНКОВ Г. Г.

НИЛ упрочняющих технологий при БГПА

Контактные соединения для электромагнитного поля представляют многослойную проводящую среду. Обусловлено это применением в них специальных защитных мер. Поверхности от окисления и коррозии покрывают оловом, цинком, кадмием [1, 2] или электропроводящим хромоникелевым сплавом [3]. В силу отмеченного успешное проектирование контактного соединения возможно при решении задачи расчета токораспределения в многослойной проводящей среде. Такие же задачи возникают при исследовании процессов в сложных структурах других электротехнических устройств, из-за чего их решение представляет практическую и теоретическую ценность.

Расчет электромагнитного поля в многослойных структурах в преобладающем большинстве случаев основан на аппроксимации такой среды однородной с эквивалентными характеристиками [4]. Это позволяет приближенно отражать только качественную картину распределения поля в рассматриваемой структуре. Достоверные количественные оценки