

Министерство высшего и среднего специального
образования Белорусской ССР

Белорусский ордена Трудового Красного Знамени
политехнический институт

На правах рукописи

Новал Владимир Иванович,
кандидат технических наук, доцент

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ
ПРОЦЕССОВ И ОЦЕНКИ ПОВЕДЕНИЯ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ
(разработка, реализация с помощью средств вычислитель-
ной техники и практическое использование)

Специальность 05.14.02 - "Электрические станции"

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Минск, 1973

~~Работа~~ выполнена на кафедре "Электрические станции" Белорусского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Павлов Г.М.,

доктор технических наук, профессор
Поляков В.Е.,

доктор технических наук, профессор
Поспелов Г.Е.

Ведущее предприятие -

Главное производственное управление
электрификации и энергетики БССР
(Белглавэнерго).

Автореферат разослан "20" апреля 1973 г.

Защита диссертации состоится "8" июня 1973 г. в _____ часов на заседании Совета по присуждению ученых степеней по энергетическим специальностям Белорусского политехнического института, г. Минск, 220027, Ленинский проспект 65, 2-й учебный корпус, ауд. 317.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Отзывы по автореферату в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: г. Минск, 220027, Ленинский проспект, 65, Белорусский политехнический институт, ученому секретарю.

Ученый секретарь совета
кандидат техн. наук, доцент

Л.Л. Червинский

Развитие энергетики, сопровождающееся увеличением единичных мощностей агрегатов, ростом мощностей электрических станций, напряжения и пропускной способности ЛЭП, ужесточает требования к устройствам релейной защиты (р.з.) в отношении быстродействия и чувствительности. Работа р.з. в современных энергосистемах осложняется несинусоидальностью и наличием свободных аperiodических и периодических составляющих в токах и напряжениях защищаемого объекта; искажениями, вносимыми измерительными трансформаторами; переходными процессами в элементах самой защиты.

В этих условиях такие широко распространенные элементы информационной части р.з., как фильтры симметричных составляющих, реле сопротивления, органы сравнения фаз и т.п. выступают в совершенно новом качестве. Они являются, по существу, преобразователями, синтезирующими из подводимых токов и напряжений выходной сигнал по некоторому сложному закону, зависящему не только от конструктивных параметров, но и от характера изменения подведенных величин. Это положение, если существенно и не ограничивает возможностей указанных элементов в новых условиях, то заставляет нас пересмотреть традиционные методы расчета и оценки их поведения в аварийных режимах.

Ввиду большого разнообразия и непостоянства степени влияния различных факторов оценка поведения устройств р.з. на основе интуитивного сопоставления параметров срабатывания и величин, характеризующих ожидающийся режим защищаемого объекта, становится практически невозможной. Само понятие параметра срабатывания для сложных быстродействующих измерительных органов теряет свое значение и определенность. В связи с этим становятся все более актуальными методы оценки поведения устройств р.з., основанные на использовании математических моделей, отражающих реально существующие физические взаимосвязи между параметрами режима и конструктивными параметрами устройства р.з.

Разработке математических методов исследования наряду с совершенствованием технических средств р.з. много внимания уделяют ведущие научно-исследовательские и проектные организации нашей страны, а также соответствующие кафедры высших учебных заведений (ВНИИЭ, Энергосетьпроект, ТЭП, ВНИИР, ЭНИН, ИЭД АН УССР, ИЭИ, ДПИ, УПИ, НПИ, ТПИ, РПИ и др.). Большой личный вклад в этой области принадлежит советским ученым Г.И.Атабекову, А.Д.Дроздову, В.И.Иванову, И.Д.Кутявину, И.М.Сироте, В.Л.Фабриканту, А.М.Федосееву,

И.И.Мадриу и др.

В последнее десятилетие проектные и исследовательские организации, крупнейшие производственные управления энергетики и электрификации получили и используют современные средства вычислительной техники: аналоговые вычислительные машины (АВМ) и электронные цифровые машины (ЭЦМ). Большая заслуга в деле внедрения методов математического моделирования и средств вычислительной техники в энергетические расчеты принадлежит В.А.Веникову, В.И.Горушкину, Н.И.Сokolovu, В.Г. Холмскому, Л.И.Цукернику и др., а в области релейной защиты А.Д.Дроздову, В.Е.Полякову, А.М.Федосееву, А.Б.Чернину и др.

Работа по применению средств вычислительной техники для исследования переходных процессов в элементах энергосистем и оценки поведения устройств р.з. в переходных режимах проводится на кафедре "Электрические станции" Белорусского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института под руководством автора с 1962 года.

Применение современных средств вычислительной техники открывает широкие возможности реализации математических моделей, построенных с учетом всех факторов, которые оказывают или предположительно могут оказать существенное влияние на поведение р.з., позволяет отказать от ряда упрощающих положений при математическом описании устройства р.з. и защищаемого объекта и быстро решать поставленную задачу с достаточной для практических целей точностью. Математическое моделирование позволяет задавать режимы защищаемого объекта, которые невозможно или затруднительно воспроизвести в энергосистеме или на электродинамической модели. Появляется возможность воспроизвести и проконтролировать характер изменения некоторых процессов, трудно доступных для непосредственных измерений.

Широкое использование математических моделей в процессе разработки устройств р.з. позволяет сократить объем испытаний при искусственно созданных аварийных режимах в энергосистемах и на электродинамических моделях, уменьшить количество образцов, устанавливаемых в опытную эксплуатацию, и сроки эксплуатационной проверки. В ряде случаев, на первых этапах разработки новых устройств, можно обойтись без изготовления опытных образцов, проведя предварительную проверку работоспособности, выявление слабых мест и уточнение некоторых конструктивных параметров на математических моделях. Все это ускоряет разработку и внедрение новых устройств р.з., упрощает их эксплуатацию, дает экономию материальных средств и инженерного труда.

В настоящей работе обобщены исследования автора по разработке комплексных математических моделей устройств р.э., по вопросам методики их воспроизведения с помощью аналоговых и цифровых вычислительных машин общего назначения; исследования, выполненные под его руководством по практическому использованию указанных моделей для оценки поведения р.э. в заданных детерминированных режимах, проверки селективности и чувствительности, уточнения конструктивных параметров ряда новых устройств р.э., разработанных под руководством автора и внедренных в эксплуатацию в Белорусской энергосистеме.

Диссертация состоит из введения, восьми глав, общих выводов, перечня литературы и приложений. Общий объем диссертации 430 страниц, в том числе 285 страниц основного текста, иллюстрированного 125 рисунками на 58 страницах. Перечень литературы включает 280 наименований.

1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ Р.Э.

В первой главе проанализированы существующие методы оценки ожидаемого поведения устройств р.э. в переходных режимах, сформулированы общие требования к математическим моделям р.э., рассмотрены общие вопросы составления математического описания элементов, входящих в состав информационной части р.э.

Математическое описание элементов р.э. составляется на основе физических законов, связывающих мгновенные значения параметров режима с конструктивными параметрами моделируемого устройства. При этом предусматривается учет как электромагнитных, так и электромеханических переходных процессов, отражающих динамику подвижных частей реле, учет нелинейности ферромагнитных сердечников и полупроводниковых приборов.

Основные требования к математическим моделям устройств р.э. заключаются в том, чтобы они, с одной стороны, как можно полнее и с достаточной точностью отражали влияние всех факторов, влияющих на поведение защиты, а с другой - могли быть реализованы с помощью существующих средств вычислительной техники. Рациональное удовлетворение этих двух взаимно противоречивых требований представляет одну из важнейших сторон данной проблемы. Безусловно излишним является чрезмерное усложнение задачи учетом факторов, оказывающих незначительное влияние или вообще не оказывающих детерминированного влияния на поведение моделируемого устройства. Следует, однако, от-

~~метод~~, что большая скорость работы и высокая точность вычислений на ЭЦВМ допускают известное усложнение задачи для выяснения влияния ряда факторов, степень влияния которых до выполнения исследований не представляется очевидной.

Основу информационной части р.з. составляют электромагнитные и магнито-полупроводниковые устройства. Математическое описание статических электромагнитных устройств, содержащих ферромагнитные и полупроводниковые элементы, включает дифференциальные и алгебраические уравнения, составляемые на основе законов Кирхгоффа для электрических и магнитных цепей. Совокупность этих уравнений совместно с характеристиками ферромагнитных элементов магнитопроводов $H = f(B)$ или $B = \varphi(H)$ и полупроводниковых элементов в виде $z_B = f(i)$ или $u_B = \varphi(i)$ дает полное описание всех электромагнитных процессов в рассматриваемом устройстве.

Динамические характеристики ферромагнитных элементов задаются в виде

$$H = f(B) + K_p \frac{dB}{dt} \quad (I-1)$$

Средняя кривая намагничивания $f(B)$ задается кусочно-параболической аппроксимацией с отдельным представлением трех участков характеристики:

$$\begin{cases} f(B) = a_1 B + a_2 B^m \quad (m = 5, 7, 9) \quad \text{при } |B| \leq B_0 \\ f(B) = \text{sign } B [a_3 + a_4 (|B| - B_0) + a_5 (|B| - B_0)^n] \\ \quad \text{при } B_0 < |B| < B_{10} \\ f(B) = \text{sign } B [a_6 + a_7 (|B| - B_{10})] \quad \text{при } |B| \leq B_{10}. \end{cases} \quad (I-2)$$

Коэффициент a_4 и B_{10} определяются из условия непрерывности производной $\frac{dH}{dB}$ в точках сопряжения отдельных участков, что способствует улучшению сходимости итерационных процессов при решении алгебраических уравнений. Погрешность аппроксимации в любой точке характеристики не превышает 5-10% от соответствующего значения напряженности на аппроксимируемой кривой.

Коэффициент K_p определяется из условия равенства потерь в реальном элементе магнитопровода и его модели согласно (I-1):

$$K_p = \frac{H_m \sin \alpha}{\omega B_m} \quad \text{или} \quad K_p = 0,154 \frac{\rho}{B_m^2},$$

где B_m , H_m - амплитуды эквивалентных синусоид индукции и напряженности,

α - угол потерь,

ρ - удельные потери при промышленной частоте, Вт/кг.

В диссертации приводятся значения K_p для различных марок электротехнических сталей, вычисленные по данным, имеющимся в справочной литературе, и экспериментальным данным, полученным автором.

Характеристики сопротивлений полупроводниковых диодов аппроксимируются с помощью дробных функций следующего вида:

$$\begin{cases} z_B = \sum_{j=1}^n \frac{1}{c_j + d_j i} & \text{при } i \geq 0 \\ z_B = \sum_{j=1}^n \frac{1}{c_j} = \frac{1}{c} & \text{при } i < 0. \end{cases} \quad (\text{I-3})$$

Прямые сопротивления германиевых и кремниевых диодов, используемых в измерительных органах р.э., при токах более $(0,1-0,2)I_{\text{ном}}$ весьма малы, и погрешность их аппроксимации в этой области даже в несколько десятков процентов не играет существенной роли. Это позволяет еще более упростить аппроксимирующие формулы для прямых сопротивлений, представив их в виде:

$$z_B = b + \frac{1}{c + di}. \quad (\text{I-4})$$

В диссертации приводятся характеристики наиболее распространенных типов полупроводниковых диодов, снятые экспериментально и построенные согласно (I-3), (I-4). При $n = 2-3$ получается хорошее совпадение аппроксимирующих и опытных характеристик во всем рабочем диапазоне выпрямленных токов.

Достоинством аппроксимации выражениями (I-3), (I-4) по сравнению с кусочно-линейной аппроксимацией является более высокая точность и простота, по сравнению с аппроксимацией логарифмическими и показательными функциями - меньший расход машинного времени при реализации на ЭЦВМ.

Вольтамперные характеристики полупроводниковых диодов выражаются зависимостями $U_B = z_B i$, где z_B определяется по (I-3) или (I-4).

Вольтамперная характеристика входной цепи транзисторного каскада с общим эмиттером, шунтированной для защиты от перенапряжений полупроводниковым диодом, аппроксимируется выражениями:

$$\begin{cases} u_B = \left[\beta_1 + \frac{1}{c_1 + d_1(i - i_0)} \right] (i - i_0) & \text{при } i \geq i_0 \\ u_B = \left[\beta_2 + \frac{1}{c_2 + d_2|i - i_0|} \right] (i - i_0) & \text{при } i < i_0. \end{cases}$$

Здесь i_0 — ток, который нужно подвести к базе от источника сигнала, для компенсации напряжения базы, вызванного протеканием тока коллектора при закрытом транзисторе. За положительное направление тока i принято направление от базы к эмиттеру.

Учет переходных процессов в полупроводниковых диодах и триодах, обусловленных их динамическими свойствами (междуэлектродные емкости, запаздывание процессов за счет конечной скорости носителей) в рассматриваемых задачах не имеет смысла.

Электромеханические элементы р.э. Математическое описание электромеханических реле информационной части р.э., время срабатывания которых соизмеримо с общим временем срабатывания защиты, содержит уравнение движения подвижной системы

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} = M_{эл} - M_{мех} - M_d.$$

В уравнение входят мгновенные значения моментов с учетом ограничений, создаваемых контактами и упорами.

Для электромагнитного реле РТ-40 мгновенные значения электромагнитного момента

$$M_{эл} = \frac{1}{2} w_s i_p B_y F_y(\alpha),$$

где

$$F_y(\alpha) = \frac{1}{f_y(\alpha)} \cdot \frac{df_y(\alpha)}{d\alpha};$$

$f_y(\alpha)$ — функция, определяющая зависимость индукции от положения якоря и зависящая от конструкции реле.

Для магнитоэлектрических реле с поворачивающейся рамкой момент инерции и жесткость пружины удобнее выразить через параметры, поддающиеся экспериментальному определению или имеющиеся в каталогах:

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} = \frac{4J_1^2}{T_{св}^2} \left(\frac{\alpha_{ср}}{I_{ср}} i_p - \alpha \right), \quad \alpha_{ср} \geq \alpha \geq 0.$$

Здесь предполагается, что демпфирование определяется величиной $\frac{d\alpha}{dt}$ и учтено при получении i_p .

В диссертации приводится общее выражение для мгновенных значений электромагнитного момента индукционного механизма с цилиндрическим ротором, полученное с учетом несимметрии магнитной системы и ротора реле. Установлено, что вращающий момент от самохода имеет две составляющие, одна из которых обусловлена несимметрией магнитной системы — другая — несимметрией электрической проводимостей ротора. При регулировке индукционного механизма на отсутствие самохода необходимо в первую очередь устранить несимметрию магнитной системы. Простейший контроль симметрии магнитной системы производится путем измерения наведенных э.д.с. или токов в парах соседних секций поляризующей обмотки и питания рабочей обмотки при вынутом роторе. В противном случае возможна компенсация указанных составляющих момента при наличии несимметрии магнитной системы, обуславливающей взаимное влияние между контурами обмоток.

II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ И ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ МОДЕЛЕЙ Р.З. НА ЭЦВМ

Комплексная математическая модель устройства р.з. содержит до 3-4 групп уравнений, описывающих измерительные трансформаторы тока, трансформаторы напряжения и реагирующие органы. Каждая такая группа обычно представляет замкнутую систему алгебраических и дифференциальных уравнений, подлежащих совместному решению:

$$\begin{cases} \frac{dy_i}{dt} = f_i(y_1, \dots, y_m, x_1, \dots, x_n, t) & i = 1, 2, \dots, m \\ \varphi_j(x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_m, t) = 0 & j = 1, 2, \dots, n. \end{cases}$$

Численное интегрирование дифференциальных уравнений производится шаговыми методами. Поскольку приведение дифференциальных уравнений к нормальному виду в большинстве случаев практически невозможно ввиду нелинейности системы алгебраических уравнений, последние должны решаться на каждом шаге численного интегрирования. Вследствие того, что в процессе решения производится изменение ряда задаваемых параметров, имитирующих переход одного вида к.з. в другой, отключение к.з., погасание дуги и т.п., предпочтение отдается методам, не требующим использования информации с предыдущих шагов.

В работе используются метод Рунге-Кутта 4-го порядка и метод Рунге-Кутта 2-го порядка (среднеинтервальный) с использованием во втором такте значений неинтегрируемых переменных x_1, x_2, \dots, x_n , полученных путем экстраполяции на конец шага. Последний дает

значительную экономию машинного времени, так как требует лишь однократного решения алгебраических уравнений на каждом шаге, в то время как метод Рунге-Кутты 4-го порядка требует их четырехкратного решения. Метод Рунге-Кутты 4-го порядка целесообразно использовать в тех случаях, когда алгебраические уравнения удается разрешить в общем виде и их решение не требует много машинного времени.

В большинстве задач, связанных с воспроизведением комплексных математических моделей р.э., основные трудности встречаются при решении алгебраических уравнений. Так как характеристики ферромагнитных и полупроводниковых элементов не могут быть заданы в виде непрерывных аналитических зависимостей во всей области реально возможных значений воспроизводимых величин, решение алгебраических уравнений производится методом итерации. Для обеспечения сходимости в областях с большой крутизной характеристик нелинейных элементов предложено использовать метод Вегстейна, описанный Лансом^{*} применительно к решению одного нелинейного алгебраического или трансцендентного уравнения. При решении систем нелинейных уравнений знаменатель корректирующего члена в формуле Вегстейна может принимать нулевые значения, что нарушает вычислительный процесс на ЭЦВМ. Эффективным мероприятием является контроль знаменателя корректирующего члена и приравнивание нулю вносимой поправки при нулевых значениях знаменателя.

Монотонность характеристик нелинейных элементов и физическая природа моделируемых процессов дают основания считать, что каждому реально возможному сочетанию значений интегрируемых переменных и заданных функций времени соответствует единственная группа вещественных корней алгебраических уравнений. Это обстоятельство снимает ограничения с выбора начальных приближений и позволяет контролировать в ходе вычислительного процесса не все величины $\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n$, а лишь некоторые из них, являющиеся "ключевыми". Выбору таких величин в конкретных задачах уделяется большое внимание.

В общем случае в качестве ключевых величин удобно выбирать переменные, определяемые по характеристикам ферромагнитных и полупроводниковых элементов, и задаваться этими переменными. В этом случае на каждой итерации решается система линейных алгебраических уравне-

^{*} Дж.Н.Ланс. Численные методы для быстродействующих вычислительных машин. Изд. иностр. литер., М., 1962.

ний, разрешенная в общем виде или любым из численных методов, а итерационный процесс замыкается вычислением "ключевых" величин по характеристикам. Схождение "ключевых" величин является признаком схождения всех остальных переменных вследствие однозначности характеристик нелинейных элементов и линейности остальных уравнений системы.

В качестве "ключевых" величин можно принимать также переменные, являющиеся явными функциями величин, определяемых по характеристикам нелинейных элементов. Ограничение количества контролируемых переменных особенно эффективно в условиях использования метода Вегстейна, который требует запоминания ряда вспомогательных величин и выполнения довольно большого количества арифметических и логических операций.

Рассматриваемые ниже комплексные математические модели конкретных устройств р.з. воспроизводились на ЭЦВМ типа "Минск-2", "Минск-32" и БЭСМ-4. Программирование на ЭЦВМ типа "Минск" наиболее удобно производить в алгоритмическом языке АКИ-Т. Последний обеспечивает получение рабочих программ, по своим показателям мало отличающихся от программ, полученных при ручном программировании в машинных кодах, а его количественные параметры достаточны для программирования задач рассматриваемого типа. Для БЭСМ-4 программирование выполняется в "АЛГОЛе" применительно к имеющимся трансляторам.

Программы численного интегрирования дифференциальных уравнений выполнены с постоянным шагом с величиной, задаваемой в зависимости от условий работы моделируемого устройства р.з. В отдельных случаях, там где это дает существенный эффект, предусматривается изменение длительности шага в процессе счета на некоторое другое значение, задаваемое в зависимости от скорости изменения интегрируемых переменных.

Ш. ПРИМЕНЕНИЕ АВМ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ Р.З.

В третьей главе рассмотрена методика воспроизведения на АВМ математических моделей статических электромагнитных устройств со сложными магнитопроводами и электромеханических реле. Описаны новые практические приемы и технические усовершенствования, внесенные в решающие блоки серийных электронно-моделирующих установок, позволившие более полно использовать операционные усилители и рас-

ширить возможности серийных АВМ при моделировании элементов р.э. энергосистем.

Дифференциальные уравнения сложных электромагнитных устройств содержат большое количество членов с производными неизвестных величин, причем количество таких производных часто превышает количество независимых дифференциальных уравнений. При воспроизведении "избыточных" производных на дифференцирующих блоках нарушается непрерывность потокосцеплений контуров при скачкообразных возмущениях. Нарушается также очевидный принцип равенства порядка системы независимых дифференциальных уравнений и количества используемых в структурной схеме АВМ решающих блоков, содержащих накопители энергии. Последнее может явиться причиной нарушения структурной устойчивости модели, не говоря уже о трудностях, связанных с практической реализацией операции дифференцирования в электронных моделирующих устройствах.

В настоящей работе дифференциальные уравнения, содержащие избыточное количество производных, разрешаются относительно производных независимых линейных комбинаций искоемых переменных, число которых равно числу дифференциальных уравнений. Указанные линейные комбинации получаются методом понижения порядка на интегрирующих блоках. Для получения отдельных переменных, входящих в линейные комбинации, дополнительно решаются соответствующие алгебраические уравнения, предварительно разрешенные относительно этих величин в общем виде.

Так, дифференциальное уравнение

$$zi + L \frac{di}{dt} + w_1 s_1 \frac{dB_1}{dt} + w_2 s_2 \frac{dB_2}{dt} = e,$$

приводится к виду

$$\frac{d}{dt} (B_1 + K_1 B_2 + K_2 i) = K_3 e - K_4 i$$

и разрешается на интеграторе относительно $B_1 + K_1 B_2 + K_2 i$.

Величина $B_1 + K_1 B_2 + K_2 i$ при принятых по обычным соображениям масштабах B_1, B_2, i может выходить за установленные для машинных переменных пределы. Поэтому на выходе интегратора следует получать величину $\frac{1}{m} (B_1 + K_1 B_2 + K_2 i)$, уменьшенную в m раз. Соответствующим образом должно быть уменьшено задаваемое на выходе интегратора начальное значение интегрируемой переменной $(B_1 + K_1 B_2 + K_2 i)_0$. При соблюдении предлагаемой методики обеспечивается вы-

текащая из физической сущности решаемых уравнений непрерывность указанных линейных комбинаций искоемых переменных.

С целью получения устойчиво работающей модели рекомендуется соблюдать следующие правила:

1) целесообразно исключать из исходных алгебраических уравнений в общем виде как можно большее количество переменных, в том числе и те, ради определения которых ведется моделирование. Эти величины при необходимости бывает удобнее получить на сумматорах, не входящих в общие контуры схемы решения алгебраических уравнений;

2) в качестве характеристик намагничивания предпочтительнее использование зависимостей $H = f(B)$ вместо $B = \varphi(H)$, так как в последнем случае исходный режим модели получается менее устойчивым вследствие большой крутизны начального участка характеристики;

3) нежелательно наличие среди машинных уравнений зависимостей, определяющих какую-либо переменную как разность близких по величине значений, и использование этой переменной после многократного усиления.

Моделирование ведется в замедленном масштабе времени $m_t = 100-300$. Для изображения и анализа структурных схем моделей широко используются направленные графы, обеспечивающие компактность и наглядность даже в случаях моделирования сложных трехфазных устройств.

Одним из мероприятий, позволяющим существенно уменьшить количество сумматоров и инверторов в схеме модели без нарушения тождественности исходных и машинных уравнений, является совмещение операций функционального преобразования и суммирования нескольких переменных на диодных нелинейных блоках АВМ. Выходной операционный усилитель блока, воспроизводящего зависимость $-H = f(B)$, можно использовать для суммирования напряженности с одной или несколькими переменными. Выходное напряжение блока при его комбинированном использовании:

$$U_{вых} = -(K_1 H + K_2 U_2 + K_3 U_3 + \dots),$$

где

$$K_1 = \frac{R_1}{R_0}; \quad K_2 = \frac{R_1}{R_2}; \quad K_3 = \frac{R_1}{R_3}; \dots$$

U_2, U_3, \dots — машинные переменные, подаваемые на дополнительные входы операционного усилителя;

R_0 — сопротивление в цепи обратной связи выходного усилителя, при котором напряженность H воспроизводится в при-

нятом для нее масштабе;

R_1 - сопротивление в цепи обратной связи выходного усилителя, необходимое для получения передаточного коэффициента K_I по основному входу;

R_2, R_3, \dots - сопротивления в цепях дополнительных входов, обеспечивающие значения передаточных коэффициентов K_2, K_3, \dots по этим входам.

На блоках - В = φ (Н) с включенными в цепь обратной связи операционного усилителя диодными элементами, имеющими характеристики в I и III квадрантах, можно получить зависимость вида

$$B = - \varphi(K_1 u_1 + K_2 u_2 + K_3 u_3 + \dots),$$

где

$$K_1 = \frac{R_0}{R_1}; \quad K_2 = \frac{R_0}{R_2}; \quad K_3 = \frac{R_0}{R_3}; \quad \dots$$

R_0 - сопротивление в цепи основного входа, при котором зависимость $B = - \varphi$ (Н) воспроизводится в принятых масштабах;

R_1, R_2, R_3, \dots - сопротивления в цепях основного и дополнительных входов, обеспечивающие необходимые значения передаточных коэффициентов.

Для получения динамических петель согласно (I-I) на один из дополнительных входов включается пассивный R - C дифференциатор индукции.

Немаловажным достоинством совмещения операций на диодных функциональных преобразователях помимо уменьшения количества решающей аппаратуры следует считать повышение надежности и устойчивости моделирующей схемы за счет ее упрощения и сокращения количества усилителей в замкнутых контурах.

Значительное расширение возможностей моделирующих установок блочного типа достигается за счет использования операционных усилителей блоков специальных нелинейностей и электромеханических блоков в качестве сумматоров. С этой целью указанные усилители снабжаются 2-3 дополнительными входами и выводом суммирующей точки. Благодаря этому установка МНБ-I получает дополнительно до 12 сумматоров, что позволяет использовать все 13 интеграторов по их прямому назначению.

Разработаны специальные устройства для измерения действующих значений низкочастотных несинусоидальных напряжений, трехфазный ис-

точник низкочастотных напряжений, которые освобождают решающие блоки серийных АВМ от выполнения указанных вспомогательных операций, расширяя тем самым их возможности для решения основных задач.

В диссертации описывается методика моделирования наиболее распространенных электромеханических элементов р.э.: электромагнитных реле с поперечным движением якоря и индукционных механизмов с цилиндрическим ротором.

Отмечая высокую эффективность АВМ при моделировании сложных электромагнитных устройств, следует указать на малый динамический диапазон машинных переменных как на основное препятствие их широкого использования для моделирования защит с полупроводниковыми и электромеханическими нуль-индикаторами высокой чувствительности.

IV. ПРИМЕНЕНИЕ АВМ И ЭЦВМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ И БЛОКАХ ГЕНЕРАТОР-ТРАНСФОРМАТОР

Поведение быстродействующих устройств р.э. генераторов, силовых трансформаторов, блоков генератор-трансформатор и питающихся от них присоединений определяют электромагнитные переходные процессы в течение нескольких десятых долей секунды после возникновения возмущающего воздействия. Для проверки чувствительности и селективности защиты этих объектов в первую очередь необходимо знать характер изменения токов и напряжений при к.э. всех видов в защищаемой зоне и вне ее, восстановлении напряжения после отключения внешних к.э., несинхронных включениях, самосинхронизации, включении силовых трансформаторов под напряжение.

Совместное протекание всех процессов наряду с наличием нелинейных элементов, а также совместное влияние их на поведение р.э. делает нецелесообразным отдельный анализ и оценку свободных и вынужденных составляющих. Рассматриваемые в настоящей главе математические модели генераторов, силовых трансформаторов и блоков генератор-трансформатор отражают взаимосвязи между мгновенными значениями полных токов и напряжений и конструктивными параметрами этих объектов.

Синхронные генераторы описываются уравнениями равновесия э.д.с. в контурах статора, демпферных контурах, обмотке возбуждения и уравнением движения ротора под действием электромагнитного момента и неизменного момента первичного двигателя. В работе используются полные уравнения синхронной машины с одной обмоткой

возбуждения и двумя эквивалентными демпферными обмотками в продольной и поперечной осях ротора, записанные в координатах α , β для цепей статора, в которых α , β составляющие токов и напряжений статора заменены фазными величинами. Такая линейная модель достаточно хорошо воспроизводит токи статора генератора, работающего в блоке с трансформатором, в перечисленных выше режимах. Следует отметить, что вследствие отсутствия многих параметров генератора возможности даже принятой линейной модели используются не полностью.

Силовые трансформаторы. В основу математического описания силовых трансформаторов положена универсальная модель однофазного трансформатора, пригодная для определения электромагнитных переходных процессов при любых изменениях схемы внешней сети. Особенностью модели является выделение в виде отдельно классифицируемой величины потока взаимоиנדукции, замыкающегося вне стального магнитопровода, и включение этого потока в полный поток взаимоиנדукции, по которому определяется индукция в элементах магнитопровода.

В трехфазных трехстержневых трансформаторах предлагается раздельно учитывать магнитные потоки, замыкающиеся с основного магнитопровода через бак и окружающее пространство. Эти потоки оказывают существенное влияние на величину и характер изменения во времени броска намагничивающего тока (б.т.н.) при глубоком насыщении стержней и яра магнитопровода. Их изучение само по себе представляет практический интерес, имея целью оценку возможности использования в качестве дополнительных диагностических факторов, пригодных для дифференциации режимов трансформатора.

Уравнения трехфазного трехстержневого трансформатора с группой соединений обмоток Y/Δ - II с принятым распределением магнитных потоков имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{1j} = z_{r1} i_{1j} + L_{s1} \frac{di_{1j}}{dt} + w_1 s_c \frac{dB_j}{dt} \quad (j = A, B, C) \\ u_{2j} - u_{2k} = z_{r2} i_{2j} + L_{s2} \frac{di_{2j}}{dt} + w_2 s_c \frac{dB_j}{dt} \quad (k = C, A, B) \\ w_1 i_{1j} + w_2 i_{2j} = \ell_c H_j + \Delta F_j \\ \Delta F_\ell = 2\ell_y H'_\ell + \Delta F_B \\ \Delta \Phi'_\ell = \Phi'_\ell - \Phi'_\ell \quad (\ell = A, C) \\ \Delta \Phi_B = \Phi'_A + \Phi'_B + \Phi'_C, \end{array} \right. \quad (4-I)$$

где $\Phi_j = S_c B_j$ - полные магнитные потоки взаимоиנדукции стержней;
 $\Phi'_j = S_y B'_j$ - магнитные потоки в элементах ярма;
 $\Delta\Phi_j = \frac{\Delta F'_j}{K_j}$ - магнитные потоки, замыкающиеся со стержней через бак и окружающее пространство.

Магнитные сопротивления K_j для потоков $\Delta\Phi_j$ в первом приближении определяются через реактанс намагничивания нулевой последовательности трансформатора:

$$K_A = K_C \approx K_B = 3\omega_0 W_1^2 \frac{1}{X_{\mu 01}} = 3\omega_0 W_2^2 \frac{1}{X_{\mu 02}}.$$

Характеристики намагничивания стержней $H = f(B)$ задаются с учетом магнитных потоков в стали и околостержневом пространстве. При этом эквивалентная индукция, определяемая как отношение полного потока взаимоиנדукции к сечению стали,

$$B = B_c + B_B = B_c + \frac{S_B}{S_c} \mu_0 H.$$

В качестве характеристик намагничивания элементов ярма используются те же зависимости, что и для стержней.

Для правильного воспроизведения потоков $\Delta\Phi_j$ и их производных обязательна непрерывность производных $\frac{dH}{dB}$ в местах стыковки отдельных участков характеристик, что обеспечивается только при их кусочно-параболической аппроксимации (1-2).

Блок генератор-трансформатор. Математическое описание блока генератор-трансформатор включает полные уравнения синхронного генератора и уравнения (4-1) силового трансформатора, решаемые совместно относительно токов на стороне высшего и низшего напряжения. В полное описание блока входят также уравнения цепей, включенных на стороне высшего напряжения: связь с внешней системой, цепи местной нагрузки, ветвь к.э. и т.п.

Уравнения (4-1) положены в основу математической модели для определения б.т.н. трехфазного трехстержневого трансформатора с группой соединений Y_0/Δ - II при его включении со стороны высшего напряжения. В диссертации описывается воспроизведение этой модели на АВМ, алгоритм и программа ее воспроизведения на ЭЦВМ "Минск-22". Результаты определения б.т.н. хорошо согласуются с опытными данными, полученными в лабораторных условиях на трансформаторе ТС-20 380/220В и качественно с приводимыми в литературе осциллограммами и результатами расчетов по другим уточненным методикам.

Анализ б.т.н. при восстановлении напряжения после отключения внешнего к.э. усложняется необходимостью учета параметров предмест-

временно режима, который является нестационарным. Здесь необходимо учитывать такие факторы как вид к.з., наличие свободных составляющих в токах к.з. в момент отключения, наличие остаточных индукций в элементах магнитопровода трансформатора и неодновременность отключения токов к.з. в разных фазах.

В диссертации рассматривается методика моделирования на АВМ блочного трансформатора по уравнениям (4-1) при упрощенном представлении генератора неизменными индуктивностями фаз статора и симметричной системой синусоидальных э.д.с. за этими индуктивностями. Ветвь к.з. описана таким образом, чтобы можно было воспроизводить процессы при всех видах к.з. и при восстановлении напряжения после их отключения с учетом неодновременности погасания дуги на контактах выключателя различных фаз.

Структурная схема модели выполнена с совмещением операций на нелинейных преобразователях. Изменения в схеме в зависимости от вида к.з. и хода его отключения задаются с помощью релейных блоков, воспроизводящих логику работы высоковольтного выключателя.

Представление синхронной машины в математическом описании блока полными уравнениями позволяет сохранить в воспроизводимых электромагнитных процессах ряд качественных особенностей, отсутствующих при ее представлении симметричной системой синусоидальных э.д.с. за неизменным сопротивлением. Разработан алгоритм совместного решения полных уравнений синхронного генератора, силового трансформатора (4-1) и уравнений внешней сети, составлена программа реализации алгоритма на ЭЦВМ типа "Минск-22". Предусматривается возможность расчета процессов при всех видах к.з. на стороне высшего напряжения блока, после их отключения с учетом неодновременности погасания дуги на контактах выключателя, несинхронных включениях и др. Расчет переходного процесса длительностью 0,2-0,3 с ($t_K = 0,1-0,2$ с и $t_{откл} = 0,1-0,2$ с) при шаге интегрирования 0,0002 - 0,0005 с и точности вычисления токов на стороне высшего напряжения 0,1 - 1 А требует 15-20 мин машинного времени.

Установлено, что раздельный учет потоков отдельных фаз в окружающем пространстве приводит к снижению максимальных значений б.т.н. в крайних фазах до 20-30% и сближению их с максимальным значением б.т.н. в средней фазе (различие не более 10-15%) по сравнению с расчетами по модели с единым потоком нулевой последовательности. Характерным является наличие больших медленно затухающих апероди-

ческих составляющих б.т.н. на стороне высшего и низшего напряжений блочного трансформатора с амплитудами, при малых нагрузках превышающими амплитуды периодических составляющих, что может вызвать глубокое одностороннее намагничивание т.т. и ложное действие дифференциальных защит после неуспешного АПВ ЛЭП.

У. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИ- СЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

Пятая глава посвящена математическому моделированию измерительных трансформаторов тока и напряжения по физическим параметрам, определяющим влияние этих аппаратов на поведение устройств р.з. На основе математического описания единичных трансформаторов рассмотрены математические модели их трехфазных групп с различными схемами соединения обмоток и методика реализации этих моделей на АВМ и ЭЦВМ.

Трансформаторы тока (т.т.). Уравнения одиночного т.т., положенные в основу математических моделей трехфазных групп т.т., токовых цепей дифференциальных защит, каскадных т.т. выполнены универсальными по форме в смысле пригодности их как для т.т. с намагнитным зазором в магнитопроводе, так и без него:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} (B - m_T L_2 i_2) = m_T z_2 i_2 \\ i_2 = \frac{1}{n_T} i - \theta_c H_3 \\ H_3 = H_c + \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\ell_{\text{ср}}}{\ell_c} B = f_1(B), \end{cases}$$

где $m_T = \frac{1}{W_2 S}$; $n_T = \frac{W_2}{W_1}$; $\theta_c = \frac{\ell_c}{W_2}$. (5-1)

Полное математическое описание каскадного т.т. с четырьмя сердечниками второй ступени содержит 5 дифференциальных уравнений. Оно существенно упрощается, если в дифференциальном уравнении первой ступени вторичные токи всех сердечников второй ступени принять равными вторичному току интересующего нас сердечника. После исключения вторичного тока первой ступени уравнения одиночного т.т. каскадного типа приводятся к виду:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(B' + m'_T L'_{s2} \theta'_c H' - \frac{m'_T}{n'_T} L'_{s2} i_1 - \frac{m'_T}{n'_T} L_{2\varepsilon} i_2 \right) = \\ = \frac{m'_T}{n'_T} z'_2 i_1 + \frac{m'_T}{n'_T} z_{2\varepsilon} i_2 - m'_T z'_2 \theta'_c H \\ \frac{d}{dt} (B'' - m''_T L_2 i_2) = m''_T z_2 i_2 \\ i_2 = \frac{1}{n'_T n''_T} i_1 - \frac{\theta'_c}{n''_T} H' - \theta''_c H''; \quad H' = f_1(B'); \quad H'' = f_2(B''). \end{aligned} \right. \quad (5-2)$$

Одним штрихом помечены величины, относящиеся к сердечнику первой ступени, двумя штрихами - второй ступени.

В главе подробно рассмотрено моделирование на АВМ трехфазных групп т.т. обычной конструкции и каскадного типа со схемами соединения вторичных обмоток в звезду и треугольник с учетом неодинаковости нагрузок в отдельных фазах. Моделирование выполняется в соответствии с основными принципами, изложенными в III главе. Было выполнено моделирование групп т.т. совместно с трехфазным трехстержневым трансформатором в режиме б.т.н. Схемы моделей трехфазных групп каскадных т.т. с соединением вторичных обмоток сердечников второй ступени в звезду и треугольник содержат 23 - 24 решающих блока, в том числе 6 интеграторов и 6 нелинейных блоков. Поскольку для воспроизведения первичных токов аварийного режима (б.т.н. силового трансформатора или токов к.з. с апериодическими составляющими) также требуется значительное количество решающей аппаратуры, моделирование трехфазных групп каскадных т.т. находится на пределе возможностей АВМ среднего класса (МНБ-I и т.п.).

Реализация моделей трехфазных групп т.т. на ЭЦВМ выполняется с использованием итераций при решении алгебраических уравнений. Для одиночных т.т. обычного типа и группы таких т.т. с соединением вторичных обмоток в звезду при отсутствии индуктивности в цепи нулевого провода возможно приведение уравнений к такому виду, когда алгебраические уравнения разрешаются в общем виде. Для более сложных схем такое приведение возможно лишь при условии достаточно грубых приближений (например, пренебрежение индуктивными составляющими нагрузок).

Трансформаторы напряжения (т.н.). Математическое описание однофазного электромагнитного т.н. аналогично описанию однофазного силового трансформатора. В описание емкостного т.н. дополнительно входят уравнения емкостного делителя. Моделирование т.н. и их трехфаз-

ных групп выполняется совместно с вторичной нагрузкой, представляемой в виде активных, активно-индуктивных и активно-емкостных цепей. Полное математическое описание трехфазной группы т.н. с их нагрузками образует систему дифференциальных уравнений 15-18 порядка.

Реализация математических моделей устройств р.э., в состав которых входит полное описание т.н., практически осуществимо с помощью ЭЦВМ. Дифференциальные уравнения т.н. и комплексных нагрузок приводятся к виду, позволяющему производить вычисление их правых частей без использования итераций при решении алгебраических уравнений. Это дает существенную экономию машинного времени при воспроизведении моделей.

Вследствие очень малых значений постоянных времени вторичной обмотки электромагнитных т.н. численное интегрирование их дифференциальных уравнений обычными методами необходимо вести с очень малым шагом, что, однако, не гарантирует необходимой точности вычислений из-за накопления ошибки и увеличивает длительность счета. С целью ускорения счета дифференциальное уравнение вторичной обмотки разрешается в конечных разностях относительно вторичного напряжения. При этом через вторичные токи определяются лишь отклонения мгновенных значений вторичных напряжений от заданных величин приведенных первичных напряжений. Погрешности определения вторичных напряжений в самых наихудших случаях остаются меньше погрешностей вычисления токов в ветвях нагрузки.

У1. КОМПЛЕКСНЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГОСИСТЕМ

В шестой главе рассмотрено математическое моделирование элементов продольных дифференциально-токовых и дифференциально-фазных защит сосредоточенных объектов энергосистем и воспроизведение комплексных математических моделей этих защит на АВМ и ЭЦВМ. Сосредоточенными называются объекты с небольшим территориальным удалением т.т. от места установки защиты, допускающим непосредственную связь вторичных обмоток групп т.т. между собой и реагирующими органами.

Токовые цепи дифференциальных защит. Разработан универсальный алгоритм воспроизведения на ЭЦВМ математической модели токовых це-

цепи четырехплечевой дифференциальной защиты. Математическое описание токовых цепей защиты, содержащей n трехфазных групп т.т. с соединением вторичных обмоток в звезду и треугольник, содержит $3n$ дифференциальных уравнений

$$\frac{dy_{jk}}{dt} = m_k \left[z_{обк} i_{втjk} + z_{пjk} i_{jk} + z_{dj} i_{dj} + z_{ок} i_{ок} - M_k (z_{пек} i_{ек} + z_{де} i_{де}) \right]; \quad (6-1)$$

$(j = a, b, c; \ell = c, a, b; k = 1, 2, \dots, n).$

и алгебраические уравнения

$$\begin{cases} y_{jk} = v_{jk} - m_k \left[L_{ск} i_{втjk} + L_{пjk} i_{jk} + L_{dj} i_{dj} + L_{ок} i_{ок} - M_k (L_{пек} i_{ек} + L_{де} i_{де}) \right] \\ i_{втjk} = \frac{1}{n_{тк}} i_{тк} - v_k H_{jk}; \quad i_{jk} = i_{втjk} - M_k i_{вт'ек} \\ i_{dj} = \sum_k i_{jk}; \quad i_{ок} = \sum_j i_{jk}; \quad H_{jk} = f_k(v_{jk}) \\ (J = A, B, C; \ell' = b, c, a). \end{cases} \quad (6-2)$$

Параметр M_k определяет схему соединения обмоток т.т. k -ой группы. Для схемы их соединения в звезду $M_k = 0$, для схемы соединения в треугольник $M_k = 1$, $L_{ок} = 0$, $z_{ок} = 0$.

Первичные токи i_{jk} задаются в виде синусоидальных зависимостей основной частоты с аperiodическими составляющими и составляющими высших гармоник. Предусматривается индивидуальное задание амплитуд и фаз периодических составляющих, начальных значений и постоянных времени затухания аperiodических составляющих первичных токов.

Уравнения решаются относительно токов в плечах защиты i_{jk} и токов в дифференциальной цепи i_{dj} . Решение дифференциальных уравнений производится методом Рунге-Кутты 2-го порядка с одноразовым решением алгебраических уравнений и экстраполяцией токов на конец шага во втором такте. Алгоритм реализован на ЭЦВМ "Минск-22" применительно к четырехплечевой защите. Длительность расчета переходного процесса протяженностью 0,2-0,3 с при шаге интегрирования 0,0002 - 0,0005 с и точности вычисления токов 0,1 А составляет 15-20 мин.

На АВМ было выполнено моделирование токовых цепей двухплечевой дифференциальной защиты с разнородными группами т.т. в трехфазном исполнении. Исследовались режимы внешних к.з. с аperiodическими составляющими в первичных токах к.з., а также режимы включения силовых трансформаторов под напряжение. Исследование наглядно показало, что при внешних к.з. основной причиной возникновения периодических токов небаланса с разнополярными значениями является насыщение т.т., соединенных в треугольник, наступающее при наличии остаточных индукций даже при небольших нагрузках.

Применение т.т. с немагнитными зазорами в обоих плечах защиты приводит к уменьшению токов небаланса, носящих периодический знакопеременный характер, при условии согласования величин немагнитных зазоров и сопротивлений плеч.

Рассмотрено моделирование на АВМ дифференциальных токовых реле типа РНТ и ДЭТ с учетом переходных процессов в элементах реле и динамики подвижной системы исполнительного электромагнитного реле РТ-40. Исследование поведения реле РНТ в составе дифференциальной защиты силовых трансформаторов при внешних к.з. и б.т.н. установило невозможность существенного повышения чувствительности дифференциальных защит с разнородными схемами вторичных обмоток т.т. вследствие чувствительности РНТ к периодическим токам небаланса знакопеременной формы. Реле ДЭТ в сочетании с т.т., имеющими немагнитные зазоры, позволяют повысить чувствительность дифференциальных защит блоков генератор-трансформатор до $0,5-0,6 I_{ном}$. Дальнейшее повышение чувствительности возможно только при условии применения более совершенных реле в сочетании с устройствами блокировки при б.т.н. и новых принципов защиты.

В Белорусском филиале ЭНИИ им.Г.М.Кржижановского под руководством автора разработана и внедрена в эксплуатацию в Белорусской энергосистеме полупроводниковая дифференциально-фазная защита сосредоточенных объектов. Защита выполнена на принципе непрерывного сравнения фаз выходных напряжений фильтров типа $K_1 \dot{I}_1 + K_2 \dot{I}_2$, присоединенных ко вторичным цепям т.т. на границах защищаемой зоны. Рабочий и блокирующий сигналы формируются из выходных напряжений фильтров с помощью схем ИЛИ на полупроводниковых диодах. Полупроводниковое реле сравнения фаз представляет собой логический элемент типа ЗАПРЕТ с поляризованным исполнительным реле.

Исследование фильтровых измерительных органов с нагрузкой фильтре на линейный резистор совместно с т.т., выполненное на АЭМ, показало, что в переходных режимах выходные напряжения фильтров сильно искажены и говорить о сравнении их по фазе можно только условно. В нагрузку фильтров, кроме входных резисторов реле сравнения фаз, входят цепи база-эмиттер транзисторов и диоды схем ИЛИ. Прямые сопротивления этих элементов соизмеримы с сопротивлениями входных резисторов, но не настолько велики, чтобы можно было рассматривать фильтры работающими в режиме холостого хода. Это не позволило производить исследование поведения защиты методами математической логики и потребовало учета вышеуказанных факторов при разработке комплексной математической модели защиты.

Комплексная математическая модель 2-4 плечевой защиты содержит математическое описание 2-4 трехфазных групп т.т. по уравнениям (6-1), 2-4 комбинированных фильтров совместно с полупроводниковыми диодами схем ИЛИ, полупроводникового реле сравнения фаз и выходного поляризованного реле. Всего задача содержит 13-25 дифференциальных уравнений первого порядка и систему алгебраических уравнений с 16-32 нелинейными зависимостями.

Реализация модели осуществлена на ЭЦВМ "Минск-22". Программа предусматривает возможность задания всех конструктивных параметров элементов защиты. Расчет переходного процесса длительностью 0,2-0,3 с на ЭЦВМ "Минск-22" занимает около 1 часа машинного времени, на "Минск-32" - 12-15 минут.

Разработаны варианты модели, учитывающие насыщение трансреакторов фильтра, некоторые схемные изменения и т.п. Разработана также модель односистемного устройства блокировки защиты при б.т.н. по второй гармонике выходного напряжения одного из плеч фильтра с торможением полным сигналом второго плеча.

Результаты моделирования проверялись путем сопоставления с экспериментальными данными, полученными при лабораторных испытаниях образцов защиты. Характеристики переходных процессов, рассчитанные для установившегося режима, полностью совпадали с осциллограммами, снятыми на образце реле при синусоидальных токах на входах фильтров.

Описанные выше алгоритмы и программы были практически использованы в процессе отработки схем и уточнения конструктивных параметров полупроводниковой дифференциально-фазной защиты сборных шин IIО кв с сильно нагруженными т.т., блока генератор-трансформатор.

В диссертации приводятся кривые, иллюстрирующие поведение защиты при к.з., построенные по результатам расчета.

УП. ИССЛЕДОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ ЭЦВМ ПОВЕДЕНИЯ ЗЕМЛЯНЫХ ЗАЩИТ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ, РАБОТАЮЩИХ В БЛОКЕ С ТРАНСФОРМАТОРАМИ

В УП главе рассматривается разработанная под руководством автора в Бел. филиале ЭНИНа им. Г. М. Кржижановского защита блочных генераторов от замыканий на корпус в обмотке статора. Защита осуществлена на принципе переноса на цепь статора выпрямленного напряжения, подводимого со стороны нейтрали первичных обмоток т.н. генератора, заземленной по переменному току через разделительную емкость. Замыкание на землю в любой точке схемы генераторного напряжения блока создает путь для тока в цепи накладываемого напряжения, который и обуславливает действие защиты.

Описанный принцип позволяет осуществить 100% -ную защиту обмотки статора с чувствительностью, не зависящей от места повреждения. Если действие защиты при металлических замыканиях и устойчивых замыканиях через переходное сопротивление представляется очевидным, то этого нельзя сказать о замыканиях через электрическую дугу. Интуитивная оценка характера изменения тока вспомогательного источника, коммутируемого попеременно зажигающейся и гаснущей дугой переменного тока в цепи с огромными индуктивностями и противо-э.д.с. первичных обмоток т.н., практически невозможна. Очень большие трудности вызывает и постановка соответствующего эксперимента. Представляет интерес ток в первичных обмотках т.н., работающих в режиме подмагничивания постоянным током, величины напряжений на разделительной емкости, вентилях выпрямителя накладываемого напряжения и др.

Моделирование защиты на АВМ, осуществленное в однофазном исполнении по схеме нулевой последовательности, позволило установить общую работоспособность защиты, но не дало ответа на многие из поставленных вопросов. Для их решения была разработана комплексная математическая модель, включающая описание всех трех фаз обмотки статора генератора, трансформаторов напряжения и устройства защиты.

Синхронный генератор был представлен сосредоточенными индуктивностями фаз (индуктивности рассеяния) и емкостями по отношению

к земле. Трансформаторы напряжения моделировались как однофазные силовые трансформаторы небольшой мощности с учетом нелинейности характеристик намагничивания. Устройство защиты описано уравнениями, связывающими параметры режима с конструктивными параметрами всех элементов. Вентили выпрямителя накладываемого напряжения представлены неизменными прямым и обратным сопротивлениями, задаваемыми на уровне их средних значений в зависимости от направления токов.

Ввиду отсутствия конкретных данных об условиях гашения дуги при замыканиях на корпус внутри генератора в модели предусматривается возможность воспроизведения дуговых замыканий с вариантами гашения дуги при прохождении через нуль полного тока дуги и составляющей промышленной частоты установившегося режима. Условием отсутствия дуги в месте повреждения является истинность логического выражения

$$|U_{\partial}| < U_{np} \text{ И } |i_{\partial(перед)}| < i_{\partial 0} \text{ И } \left| \left(\frac{di_{\partial}}{dt} \right)_{перед} \right| < i'_{\partial 0}$$

где U_{np} , $i_{\partial 0}$, $i'_{\partial 0}$ - задаваемые константы.

Сопротивление дуги в случае ее горения задается неизменной величиной или определяется по вольтамперной характеристике.

В одном из вариантов модели, реализованном на ЭЦВМ "Минск-22", генератор представлен Г-образными R-C звеньями. Ввиду очень быстрого затухания свободных токов разряда генераторных емкостей расчет приходилось вести с шагом порядка 10^{-5} с. Длительность расчета переходного процесса протяженностью 0,1-0,2 с составляла до 2-3 часов при использовании метода Рунге-Кутты 4-го порядка.

Во втором варианте модели, кроме емкостей, учитывались также и индуктивности обмотки, что позволило воспроизводить колебательный характер разряда емкостей статора. Такая, более полная модель была реализована на ЭЦВМ БЭСМ-4, программа составлена в АЛГОЛе. В диссертации приводится подробное описание алгоритмов и программ по обоим вариантам и алгоритмическая программа для БЭСМ-4.

В результате расчетов, выполненных для защиты блочного турбогенератора ТВВ-165, было установлено, что в переходных режимах нейтраль т.н. приобретает дополнительное смещение относительно земли. Это смещение обусловлено протеканием через разделительную емкость аperiodических составляющих намагничивающих токов т.н. неповрежденных фаз.

Величина и знак смещения зависят от характера повреждения и фазы напряжения в момент пробоя. При дуговых замыканиях и неблагоприятной полярности аperiodических составляющих в результате многократно повторяющихся бросков намагничивающего тока смещение нейтральной т.н. в течение $0,05-0,1$ с достигает $1,5-2,0$ кв, запирает вентили выпрямителя накладываемого напряжения и препятствует сработке защиты.

Для ограничения напряжения на разделительной емкости и обеспечения четкого действия защиты при дуговых замыканиях использован линейный резистор, включаемый бесконтактным ключом на базе динистора параллельно разделительной емкости. В математическое описание защиты по второму варианту включено и описание этой цепи. Проведенные расчеты подтвердили эффективность принятого способа и работоспособность защиты при дуговых замыканиях.

УШ. ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ ДИСТАНЦИОННЫХ ЗАЩИТ ЛЭП

Восьмая глава посвящена математическим моделям информационной части дистанционных защит ЛЭП. В главе рассмотрена методика моделирования основных типов реле сопротивления первых ступеней дистанционных защит ЛЭП напряжением 220-330 кв и выше, наиболее подверженных влиянию переходных процессов. На их поведение существенное влияние могут оказывать свободные периодические и аperiodические составляющие первичных токов и напряжений, переходные процессы в измерительных трансформаторах, схемах формирования сравниваемых напряжений, контурах "памяти", исполнительных органах, нелинейности полупроводниковых диодов и триодов в схемах сравнения и входных цепях нуль-индикаторов.

Для направленных реле сопротивления, выполненных на базе индукционного механизма с цилиндрическим ротором, наибольший интерес представляет исследование поведения при близких к.з. и сильном искажении вторичных токов т.т. вследствие их насыщения аperiodическими составляющими. Моделирование этих реле на АБМ совместно с трехфазной группой т.т., имеющих соединение вторичных обмоток в звезду, выполнено в соответствии с основными принципами, изложенными в гл. III.

Модель состоит из четырех автономных схем: схема моделирования т.т., схема моделирования рабочего контура индукционного меха-

~~наиме~~ **Схема моделирования поляризующего контура и схема моделирования уравнения движения ротора индукционного механизма.** Автономность отдельных схем существенно облегчает наладку модели. При воспроизведении режимов к.з. необходима тщательная предварительная регулировка всех решающих элементов, особенно множительных блоков, работающих с малыми значениями одного из сомножителей, и решающих блоков в схеме моделирования поляризующего контура.

Дистанционные защиты с полупроводниковыми направленными реле сопротивления, основанными на принципе сравнения двух напряжений по модулю, в более сильной степени подвержены влиянию свободных составляющих первичных токов и напряжений, и особенно высших гармоник, наличие которых свойственно современным энергосистемам с мощными выпрямительными нагрузками или связанным с электропередачами постоянного тока. Это в первую очередь относится к вариантам защит с полупроводниковыми нуль-индикаторами, обладающим повышенным быстродействием. Можно ожидать заметного влияния на их поведение переходных процессов в т.н. и их вторичных нагрузках.

Комплексные математические модели дистанционных защит с полупроводниковыми реле сопротивления выполнены с расчетом их реализации на ЭЦВМ. В диссертации приводится математическое описание направленного реле сопротивления на выпрямленных токах со схемой сравнения, выполненной на баланс напряжений, и чувствительным полупроводниковым нуль-индикатором с выходным поляризованным реле. Описание реле содержит 9 дифференциальных уравнений первого порядка и систему алгебраических уравнений с 5 нелинейными зависимостями.

Комплексная математическая модель информационной части защиты содержит также уравнения трехфазной группы т.н. с нагрузками и уравнения трехфазной группы т.т. Первичные токи и напряжения задаются в виде синусоидальных зависимостей с аperiodическими составляющими. Модель реализована на ЭЦВМ "Минск-22". Длительность расчета переходного процесса протяженностью 0,2-0,3 с составляет около 1 часа. Приводится алгоритм реализации варианта модели с емкостными т.н. и каскадными т.т.

В главе рассмотрен отдельный вопрос о возможности и целесообразности использования программ, реализующих комплексные математические модели р.з. наиболее ответственных объектов, в составе математического обеспечения автоматизированных систем управления на уровне энергосистемы. Эти программы с успехом могут быть использованы

диспетчерской службой, ЦС РЗАИ при анализе аварий, выяснении причин аварийных отключений, разработке профилактических мероприятий по предотвращению аварий и их развития, а также в условиях нормальной эксплуатации для уточненного выбора уставок и проверки селективности при изменении схемы энергосистемы, введении новых объектов и т.п.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ, ВЫВОДЫ, ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы сводятся к следующему:

1. Предложена общая методика исследования поведения сложных быстродействующих устройств р.з. на базе комплексных математических моделей, содержащих математическое описание физических процессов в защищаемом объекте, измерительных трансформаторах и элементах устройства р.з. по мгновенным значениям и конструктивным параметрам.

2. Разработаны общие алгоритмы и практические приемы, позволившие осуществить практическую реализацию комплексных математических моделей сложных быстродействующих устройств р.з. с помощью серийных АВМ и ЭЦВМ общего назначения уже на существующем этапе оснащения энергосистем, проектных и исследовательских организаций средствами вычислительной техники.

3. Выполнено исследование с помощью комплексных математических моделей наиболее распространенных устройств р.з. ответственных объектов энергосистем, в том числе ряда новых устройств, разработанных под руководством автора и внедренных в эксплуатацию в Белорусской энергосистеме. Обнаружены и количественно оценены некоторые новые явления и особенности поведения новых устройств р.з., своевременно произведена корректировка схем и параметров этих устройств, что обеспечило их быстрый ввод в эксплуатацию и высокую эффективность.

В диссертации разработан ряд новых математических моделей элементов энергосистем и устройств р.з., по-новому решены отдельные вопросы методики реализации этих моделей средствами вычислительной техники:

1. Разработаны математические модели наиболее распространенных типов электромеханических реле с учетом динамики подвижной системы по мгновенным значениям параметров режима, положенные в основу комплексных моделей дифференциальных и дистанционных защит.

2. Предложена аппроксимация характеристик полупроводниковых приборов в виде дробно-линейных функций и кусочно-параболическая аппроксимация характеристик ферромагнитных элементов, позволившие сформулировать задачи в виде систем дифференциальных и нелинейных алгебраических уравнений и решать их регулярными численными методами математического анализа.

3. Разработана методика воспроизведения на АВМ математических моделей электромагнитных устройств со сложными магнитопроводами и сложными схемами соединения обмоток, основанная на разрешении дифференциальных уравнений относительно линейных комбинаций искомых переменных и совмещении операций на нелинейных блоках, воспроизводящих характеристики намагничивания.

4. Разработан итерационный метод решения систем нелинейных алгебраических уравнений сложных электромагнитных и магнито-полупроводниковых устройств, основанный на замыкании итерационного процесса по "ключевым" переменным, входящим в характеристики нелинейных элементов или являющимся их линейными функциями, и использовании метода Вегстейна для обеспечения сходимости во всей области значений искомых величин.

5. Предложена новая математическая модель трехфазного трехстержневого трансформатора с отдельным учетом магнитных потоков фаз в окружающем пространстве. На базе этой модели разработана универсальная математическая модель блока генератор-трансформатор для расчета электромагнитных переходных процессов в различных аварийных и послеаварийных режимах, разработан алгоритм и программа реализации этой модели на ЭЦВМ.

6. Разработана методика моделирования на АВМ среднего класса трехфазного трехстержневого трансформатора, токовых цепей продольной дифференциальной защиты с разнородными схемами соединения вторичных обмоток т.т. обычной конструкции и с немагнитными зазорами, дифференциальных токовых реле с насыщающимися трансформаторами, индукционных реле сопротивления.

7. Разработаны алгоритмы и реализующие их программы воспроизведения на ЭЦВМ комплексных математических моделей токовых цепей многоплечевой дифференциальной защиты, дифференциально-фазной защиты сосредоточенных объектов, защиты генераторов от замыканий на корпус с наложенным выпрямленным напряжением, информационной части дистанционной защиты с направленными полупроводниковыми реле сопротивления.

На основании выполненного исследования ряда конкретных устройств получены следующие результаты и выводы прикладного характера:

1. Броски намагничивающего тока силового трансформатора блока, возникающие при восстановлении напряжения после отключения внешних к.з., содержат медленно затухающие аperiodические составляющие, начальные значения которых могут превосходить амплитуду переменных составляющих. Это может вызвать большие токи небаланса и ложное срабатывание дифференциальных защит при неуспешном АПВ присоединений.

2. Раздельный учет магнитных потоков фаз в околостержневом пространстве силовых трансформаторов приводит к снижению максимальных значений б.т.н. в крайних фазах до 20-30% и сближению их с максимальными значениями б.т.н. в средней фазе.

3. Лучшими возможностями в отношении повышения чувствительности среди типовых дифференциальных реле обладают реле с магнитным торможением ДЗТ. В защитах блока генератор-трансформатор при их использовании с т.т. обычной конструкции начальный ток срабатывания может быть снижен до уровня $I_{ном}$, а в ряде конкретных случаев и несколько ниже. Выбор параметров срабатывания и проверка селективности должны проводиться в этих случаях на базе комплексных математических моделей.

4. Т.т. с немагнитными зазорами, выбранными по условию снятия остаточных индукций в сердечниках, обеспечивают повышение чувствительности дифференциальной защиты блока с реле ДЗТ до 0,5-0,6 $I_{ном}$.

5. Разработанная в Бел. филиале ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского полупроводниковая дифференциально-фазная защита сосредоточенных объектов в сочетании с односистемным устройством блокировки при б.т.н. обеспечивает чувствительность защит блока генератор-трансформатор порядка 0,5-0,6 $I_{ном}$ при симметричных к.з. и 0,1 $I_{ном}$ при несимметричных к.з.

6. Ввиду того, что т.т. с соединением вторичных обмоток в треугольник при прочих равных условиях более подвержены насыщению, представляют практический интерес защиты силовых трансформаторов и блоков генератор-трансформатор с соединением вторичных обмоток т.т. высшего напряжения в звезду и компенсацией фазного сдвига первичных токов и токов нулевой последовательности в реагирующих органах.

7. В защитах блочных генераторов с наложением на цепь статора выпрямленного напряжения, подвдимого со стороны нейтрали первичных обмоток т.н., возможно значительное повышение напряжения на разде-

лительной емкости в переходных режимах вследствие протекания по ней апериодических составляющих бросков тока намагничивания т.н. неповрежденных фаз. Шунтирование разделительной емкости линейным резистором с помощью динисторного ключа является эффективным средством ограничения перенапряжений и обеспечения четкого действия защиты при дуговых замыканиях.

В заключение следует отметить, что рассмотренные в настоящей работе комплексные математические модели являются эффективным и наиболее достоверным расчетным средством, позволяющим путем "математического эксперимента" воспроизвести поведение рассматриваемого устройства р.з. в любых заданных режимах защищаемого объекта. Такое воспроизведение в условиях повышенных требований к устройствам р.з. следует считать необходимым для окончательной проверки чувствительности и селективности защит ответственных объектов энергосистем как при проектировании, так и в условиях эксплуатации.

Применение комплексных математических моделей требует знания многих конструктивных параметров элементов защит, измерительных трансформаторов и защищаемых объектов. Уже сейчас необходимо проводить работу по их определению и систематизации. В технической документации заводов-изготовителей должны приводиться геометрические размеры и характеристики магнитопроводов, постоянные инерции подвижных частей реле, параметры противодействующих пружин и другие конструктивные параметры, используемые в комплексных математических моделях.

Модели рассмотренного типа, позволяющие получить точный ответ на вопрос о поведении конкретного устройства защиты в заданной сложной ситуации, могут быть использованы для проверки различных положений упрощенных методик, а также для получения исходной информации, необходимой при разработке и практическом применении вероятностных методов решения назревших вопросов выбора исходных режимов, оценки селективности и чувствительности.

По материалам диссертации были сделаны доклады, сообщения на Всесоюзной межвузовской объединенной конференции по физическому моделированию и кибернетике энергетических систем (г.Баку, 1972), IУ Всесоюзной межвузовской конференции по теории и методам расчета нелинейных электрических цепей и систем (г.Ташкент, 1971), УП научно-технической конференции по статическим преобразователям в автоматике и электроприводе (г.Томск, 1971), республиканском научно-техниче-

ском совещании по автоматизации управления Белорусской энергосистемой (г.Минск, 1972), II и III республиканских научно-технических конференциях по применению вычислительной техники в энергетике Белоруссии (г.Минск, 1968, 1970), заседании секции релестроения научно-технического совета Всесоюзного научно-исследовательского института релестроения (г.Чебоксары, 1972), производственном совещании по итогам эксплуатации устройств релейной защиты и автоматики в объединенной энергосистеме Северо-Запада (г.Минск, 1971), объединенном научно-техническом семинаре кафедр "Электрические аппараты" и "Электроснабжение промышленных предприятий" Чувашского государственного университета (г.Чебоксары, 1972), научно-техническом совещании по вопросам релейной защиты мощных генераторов, работающих в блоке с трансформаторами (г.Москва, 1972), научном семинаре кафедры "Электрические станции, сети и системы" Уральского политехнического института (г.Свердловск, 1972), заседании кафедры "Электрические станции" Новочеркасского политехнического института (г.Новочеркасск, 1972), научном семинаре кафедры "Электрические станции" Томского политехнического института (г.Томск, 1971), заседании кафедры "Электрические станции" Ленинградского политехнического института (г.Ленинград, 1973), научном семинаре кафедры "Электрические станции, сети и системы" и проблемной лаборатории по применению полупроводников в релейной защите Рижского политехнического института (г.Рига, 1973), итоговых научно-технических конференциях Белорусского политехнического института (г.Минск, 1965-1971).

Перечень печатных работ автора по вопросам, рассмотренным в диссертации:

1. Новаш В.И. Некоторые вопросы моделирования ферромагнитных устройств со сложными магнитопроводами на математических машинах непрерывного действия. "Изв.вузов - энергетика", 1966, № 8.

2. Новаш В.И. Совмещение операций на диодных функциональных преобразователях АВМ при моделировании ферромагнитных устройств. "Изв.вузов - энергетика", 1966, № 12.

3. Новаш В.И. Моделирование статических электромагнитных аппаратов на аналоговых вычислительных машинах. Материалы II республиканской научно-технической конференции по применению вычислительной техники в энергетике. Минск, 1968.

4. Новаш В.И., Румянцев Ю.Г. Учет воздушных везоров в стыках при расчете параметров шихтованных магнитопроводов. "Изв.вузов -

энергетика", 1964, № 7.

5. Новаш В.И., Стрелюк М.И. Из опыта эксплуатации математических машин непрерывного действия блочного типа МНБ-1. "Изв.вузов - энергетика", 1966, № 4.

6. Новаш В.И., Дорошевич Т.М. Моделирование трансформаторов с подмагничиваемым шунтом на АВМ. "Изв.вузов - энергетика", 1967, № 8.

7. Новаш В.И. Математическое моделирование электромагнитических элементов релейных защит. "Изв.вузов - энергетика", 1968, № 10.

8. Новаш В.И. Применение вычислительной техники для исследования и оценки поведения устройств релейной защиты. Тезисы докл. III республиканской научно-технической конференции по применению вычислительной техники в энергетике Белоруссии. Минск, 1970.

9. Глинский Е.В., Новаш В.И., Матюш А.Н. Аналоговое моделирование продольной дифференциальной защиты ЛЭП. "Изв.вузов - энергетика", 1968, № 6.

10. Новаш В.И. К расчету погрешностей холостого хода трансформаторов напряжения. "Изв.вузов - энергетика", 1960, № 10.

11. Новаш В.И., Тимечкин А.А. О моделировании трансформаторов тока на АВМ. "Изв.вузов - энергетика", 1968, № 8.

12. Новаш В.И., Стрелюк М.И. Моделирование электромагнитных реле с поперечным движением якоря средствами аналоговой вычислительной техники. "Изв.вузов - энергетика", 1968, № 11.

13. Новаш В.И., Рогов Л.Д., Мороз В.К. О защите блочных генераторов от замыканий на корпус в обмотках статора и ротора. В сб. "Опыт эксплуатации автоматических устройств в Белорусской энергосистеме", Минск, 1968.

14. Новаш В.И., Бараш Н.В., Тимечкин А.А. Об уточнении параметров ветви намагничивания в схеме замещения трансформатора. "Изв.вузов - энергетика", 1969, № 7.

15. Новаш В.И., Тимечкин А.А. Исследование бросков тока намагничивания в блоках генератор-трансформатор. "Изв.вузов - энергетика", 1969, № 10.

16. Новаш В.И., Рогов Л.Д., Мороз В.К. Защита от замыканий. "Промышленность Белоруссии", 1969, № 10.

17. Новаш В.И., Соколик Л.И., Тимечкин А.А. Исследование на АВМ фильтровых органов дифференциально-фазной защиты трансформаторов и блоков генератор-трансформатор. "Изв.вузов - энергетика", 1969, № 12.

18. Новаш В.И., Тишечкин А.А., Гутик И.Л., Гернович И.Д. Исследование на АВМ некоторых вариантов исполнения продольных дифференциальных защит. Тезисы докладов научно-технической конференции молодых ученых Белоруссии. Минск, 1969.

19. Новаш В.И., Стрелюк М.И., Глинский Е.В., Кавцевич Е.Н., Речин Ш.Ш. К методике моделирования на аналоговых вычислительных машинах индукционных реле направления мощности. "Изв.вузов - энергетика", 1970, № 4.

20. Новаш В.И. Применение математического моделирования и средств вычислительной техники для оценки поведения устройств релейной защиты в переходных режимах. "Изв.вузов - энергетика", 1970, № 7.

21. Новаш В.И., Тишечкин А.А. Токи небаланса в схеме продольной дифференциальной защиты трансформаторов и блоков генератор-трансформатор. "Изв.вузов - энергетика", 1970, № 10.

22. Новаш В.И., Глинский Е.В., Сопьяник В.Х. О применении ЦВМ для расчета и оценки поведения релейных защит в энергосистемах. Тезисы докл. III республиканской научно-технической конференции по применению вычислительной техники в энергетике Белоруссии. Минск, 1970.

23. Новаш В.И., Рогов Л.Д., Мороз В.К. О применении вычислительных устройств для исследования защиты статора от замыканий на корпус с наложенным выпрямленным напряжением. Тезисы докладов III республиканской научно-технической конференции по применению вычислительной техники в энергетике Белоруссии. Минск, 1970.

24. Новаш В.И., Тишечкин А.А., Соколик Л.И. Исследование на АВМ некоторых элементов дифференциально-фазных защит. Тезисы докладов III республиканской научно-технической конференции по применению вычислительной техники в энергетике Белоруссии. Минск, 1970.

25. Новаш В.И. (руковод. работы) и др. Математическое моделирование рабочих органов дистанционных и высокочастотных защит. Отчет по НИР ВПИ, тема № 257/2-69, гос.регистр. № 69034216, микрофильм БИ15502, 1970.

26. Новаш В.И., Рогов Л.Д., Мороз В.К. Устройство для защиты статора синхронного генератора, работающего в блоке с трансформатором, от замыканий на корпус. Авторское свид. на изобр. № 279758. Бюлл. изобр. и товарных знаков, 1970, № 27.

27. Новаш В.И. Некоторые вопросы математического моделирования релейных защит на полупроводниках. "Изв.вузов - энергетика", 1971, № 2.

28. Новаш В.И., Рогов Л.Д., Мороз В.К. Чувствительность земляных защит генераторов, работающих в блоке с трансформаторами. "Электрические станции", 1971, № 3.

29. Новаш В.И., Рогов Л.Д., Мороз В.К. Повышение надежности земляной защиты статора. "Промышленность Белоруссии", 1971, № 6.

30. Новаш В.И., Тищенко А.А., Сопьяник В.Х. О влиянии переходных процессов в трансформаторах тока на работу быстродействующих релейных защит. "Электрические станции", 1971, № 9.

31. Новаш В.И., Стрельюк М.И., Глинский Е.В. Измерение действующих значений несинусоидальных величин и гармонический анализ низкочастотных несинусоидальных напряжений средствами аналоговой вычислительной техники. В республиканском межведомственном сборнике "Электроэнергетика", вып. I, Минск, 1971.

32. Новаш В.И. О применении АВМ и ЦВМ для исследования переходных процессов в электрических аппаратах с ферромагнитными элементами и полупроводниковыми вентилями. Доклады УП научно-технической конференции "Статические преобразователи в автоматике и электроприводе", Томск, 1971.

33. Новаш В.И., Абраменко В.М. Алгоритм и программа для расчета бросков намагничивающего тока силовых трансформаторов на ЭЦВМ "Минск-22" при кусочно-параболической аппроксимации кривых намагничивания. Тезисы докладов IУ всесоюзной межвузовской конференции по теории и методам расчета нелинейных электрических цепей и систем, вып. I, Ташкент, 1971.

34. Новаш В.И., Громов Д.И. Исследование на ЭЦВМ "Минск-22" электромагнитных переходных процессов в блоках генератор-трансформатор с учетом нелинейности характеристик намагничивания. Тезисы докладов IУ всесоюзной межвузовской конференции по теории и методам расчета нелинейных электрических цепей и систем, вып. I, Ташкент, 1971.

35. Новаш В.И. О применении математического моделирования и средств вычислительной техники для оценки поведения направленных реле сопротивления в переходных режимах. В сб. "Применение автоматической и вычислительной техники для повышения надежности и экономичности работы энергосистемы", изд. "Наука и техника", Минск, 1971.

36. Громов Д.И., Новаш В.И., Рогов Л.Д. Исследование защиты статора от замыканий на корпус с наложенным выпрямленным напряже-

нием при дуговых замыканиях. В сб. "Применение автоматики и вычислительной техники для повышения надежности и экономичности работы энергосистемы", изд. "Наука и техника", Минск, 1971.

37. Новаш В.И., Рогов Л.Д., Мороз В.К. Исследование на АВМ защиты статора блочного генератора от замыканий на корпус. В республиканском сборнике "Электроэнергетика", вып.2, изд. "Высшая школа", Минск, 1972.

38. Новаш В.И., Тишечкин А.А. Моделирование трехфазного трансформатора блока на АВМ. В республиканском сборнике "Электроэнергетика", вып.2, изд. "Высшая школа", Минск, 1972.

39. Новаш В.И., Тишечкин А.А., Громов Д.И. Алгоритм и программа расчета электромагнитных переходных процессов в блоке генератор-трансформатор. "Изв.вузов - энергетика", 1971, № 10.

40. Новаш В.И., Громов Д.И., Спьяник В.Х. Математическая модель полупроводниковой дифференциально-фазной защиты и ее реализация на ЭЦВМ "Минск-2?". "Изв.вузов - энергетика", 1971, № 11.

41. Новаш В.И., Рогов Л.Д. О замыкании на корпус в обмотке статора генератора, работающего в блоке. "Электрические станции", 1972, № 3.

42. Новаш В.И., Королев О.П., Коренько В.Н., Сэвин С.Н. Математическая модель информационной части направленной полупроводниковой дистанционной защиты. "Изв.вузов - энергетика", 1972, № 4.

43. Новаш В.И. Об алгоритмах реализации математических моделей трансформаторов напряжения на ЭЦВМ. "Изв.вузов - энергетика", 1972, № 10.

44. Новаш В.И. Комплексные математические модели релейной защиты как элементы математического обеспечения АСУП энергосистемы. Тезисы докладов к научно-техническому совещанию "Автоматизация управления Белорусской энергосистемой". Минск, 1972.

45. Новаш В.И. Математические модели устройств релейной защиты, их реализация с помощью АВМ и ЭЦВМ и практическое использование. Доклады всесоюзной объединенной межвузовской конференции по физическому моделированию (VI) и кибернетике энергетических систем (II). Баку, 1972.

46. Новаш В.И., Абраменко В.М. О расчетах броска намагничивающего тока в трехфазных силовых трансформаторах с учетом потоков в околостержневом пространстве. "Изв.вузов - энергетика", 1973, № 1.