

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

# **МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ СРЕДСТВА УПРАВЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ**

## *Часть 4*

# **ПРОГНОЗИРУЮЩИЕ ГИБКИЕ УСТРОЙСТВА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ**

*Методические указания к практическим занятиям*

Благовещенск

Издательство АмГУ

2017

***Разработано в рамках реализации гранта «Подготовка высококвалифицированных кадров в сфере электроэнергетики и горно-металлургической отрасли для предприятий Амурской области» по заказу предприятия-партнера – акционерного общества «Дальневосточная распределительная сетевая компания» (АО «ДРСК»)***

*Рецензент:*

*А.В. Михалев, зам. генерального директора по техническим вопросам – главный инженер акционерного общества «Дальневосточная распределительная сетевая компания» (АО «ДРСК»).*

**М59 Микропроцессорные средства управления в электроэнергетике. Часть 4. Прогнозирующие гибкие устройства релейной защиты: методические указания к практическим занятиям /сост. А.Н. Козлов. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2017. – 16 с.**

Методические указания предназначены для подготовки бакалавров по направлению «Электроэнергетика и электротехника». Соответствуют рабочей программе дисциплины и федеральному государственному стандарту ВО РФ.

Рассмотрено использование для выполнения цифровых защит от повреждений электрооборудования таких информативных параметров, как первая, вторая производные тока и их функции.

***В авторской редакции.***

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Использование вычислительной техники для создания устройств релейной защиты и автоматики – вопрос не новый. Но использовать для этой цели стационарные ЭВМ не имело смысла. Требовалось очень большое число датчиков и, соответственно, каналов связи их с машиной. Кроме того, поскольку алгоритмы работы большинства устройств защиты достаточно просты, машина загружалась слабо.

Бурное развитие цифровых технологий в релейной защите началось с появлением микропроцессоров. У цифровых защит есть ряд существенных преимуществ по сравнению с электромеханическими и электронными устройствами. Заключаются они, прежде всего, в следующем [1]:

- уменьшение массы и габаритов устройств, повышение аппаратной надежности за счет наличия функции самодиагностики;
- расширение и улучшение качества защитных функций;
- возможность непосредственной регистрации процессов и событий и их анализа;
- появление принципиально новых возможностей управления защитой и передачи от нее информации;
- технологичности производства микропроцессорных терминалов [1].

Однако указанное повышение эффективности может быть достигнуто лишь при правильном понимании и применении функций цифровой релейной защиты (ЦРЗ). Структура построения ЦРЗ, в которой нет физических блоков, соответствующих отдельным защитным функциям, требует изменения подхода к проверке ЦРЗ. В цифровых терминалах существенно возросло количество параметров, установка которых производится пользователем; в сложных защитах наличествует большое число сообщений различного вида. Все это в определенной степени усложняет обслуживание и требует квалифицированного персонала [1].

Охватить многообразие возможных реализаций функций цифровых защит невозможно ни в одной, ни в нескольких книгах. Цель настоящих методических указаний – рассмотреть некоторые принципы реализации прогнозирующих цифровых защит. В основу пособия положены материалы [1] и [2].

Настоящее учебное пособие – очередная часть комплекта учебно-методических материалов, разрабатываемого кафедрой энергетики

Амурского государственного университета в рамках реализации гранта Министерства образования и науки Российской Федерации «Подготовка высококвалифицированных кадров в сфере электроэнергетики и горно-металлургической отрасли для предприятий Амурской области» по заказу предприятия-партнера - акционерного общества «Дальневосточная распределительная сетевая компания» (АО «ДРСК»)

## **ВВЕДЕНИЕ**

Как показывает статистика, общий процент неправильных действий ЦРЗ особенно сложных устройств в начальный период эксплуатации не снижается по сравнению с электромеханическими и статическими устройствами защитами, а в некоторых случаях даже возрастает. Это определяется не отказами аппаратуры, а, в первую очередь, ошибками при проектировании и обслуживании, связанными с неправильным использованием отдельных функций защит, ошибками при выборе и установке их параметров и уставок.

Эффективным средством снижения ошибок является использование программ расчета уставок и автоматизированных средств проверки. Важным также является обеспечение допустимой электромагнитной обстановки на объекте для снижения влияния помех и исключения возможности повреждения ЦРЗ. Таким образом, реальная эксплуатационная эффективность ЦРЗ может быть достигнута лишь при правильном использовании ее функций и грамотной эксплуатации, что обуславливает необходимость соответствующей подготовки проектирующего и эксплуатационного персонала энергосистем.

## КРИТЕРИИ ДОСТИЖЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО БЛОКУ ПРАКТИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН

Балл	Критерии оценки (содержательная характеристика)
«1»	Работа выполнена полностью. Студент практически не владеет теоретическим материалом, допуская грубые ошибки, испытывает затруднения в формулировке собственных суждений, неспособен ответить на дополнительные вопросы.
«2»	Работа выполнена полностью. Студент не владеет теоретическим материалом, допуская ошибки по существу рассматриваемых (обсуждаемых) вопросов, испытывает затруднения в формулировке собственных обоснованных и аргументированных суждений, допускает ошибки при ответе на дополнительные вопросы.
«3»	Работа выполнена полностью. Студент владеет теоретическим материалом на минимально допустимом уровне, отсутствуют ошибки при описании теории, испытывает затруднения в формулировке собственных обоснованных и аргументированных суждений, допуская незначительные ошибки на дополнительные вопросы.
«4»	Работа выполнена полностью. Студент владеет теоретическим материалом, отсутствуют ошибки при описании теории, формулирует собственные, самостоятельные, обоснованные, аргументированные суждения, допуская незначительные ошибки на дополнительные вопросы.
«5»	Работа выполнена полностью. Студент владеет теоретическим материалом, отсутствуют ошибки при описании теории, формулирует собственные, самостоятельные, обоснованные, аргументированные суждения, представляет полные и развернутые ответы на дополнительные вопросы.

**Работа, оцененная менее, чем 3 баллами, НЕ МОЖЕТ БЫТЬ «ЗАЧТЕНА» и передается.**

## ПРОГНОЗИРУЮЩИЕ ГИБКИЕ УСТРОЙСТВА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ НА БАЗЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ МИКРОПРОЦЕССОРОВ [2]

**Цель практического занятия.** Известно, что операция прогнозирования (предсказания), состоящая в точном или приближенном определении последующего значения функции по некоторой имеющейся совокупности данных, зависящих от ее предыдущих значений, находит достаточно широкое применение в теории и практике процессов управления. Во многих случаях доступным является только неполное описание состояния системы в настоящем и прошлом, на основании которого можно сделать лишь вероятностные оценки о состоянии системы в будущем. В этих случаях используется математический аппарат теории предсказания, предметом которой является разработка и исследование статистических методов оптимального прогнозирования (предсказания). Статистические методы предсказания требуют большого объема вычислений, и поэтому их применение для прогнозирования остродинамических аварийных процессов в реальном, а тем более ускоренном масштабе времени встречает серьезные затруднения. Весьма перспективными в этой связи являются методы прогнозирования, основанные на моделировании аварийного процесса в ускоренном масштабе времени. Они наиболее целесообразны, когда процесс изучен и с определенными допущениями может рассматриваться как детерминированный. Для таких процессов увеличение периода прогнозирования не снижает точности прогноза.

**Цель занятия** – сопоставить возможности прогнозирующих релейных защит (ПРЗ), использующих различные контролируемые параметры и убедиться, что у таких защит существенно повышается надежность функционирования, особенно при воздействии помех.

**Порядок проведения практического занятия.** В аудитории выполняется разбор теоретической части занятия. При подготовке отчета может потребоваться дополнительная информация, поиск которой следует провести самостоятельно в системе «Интернет».

**Теоретическая часть.** В энергетических установках и ЭЭС (автономных и объединенных) для целей прогноза максимальных значений токов КЗ могут применяться простейшие прогнозирующие релейные защиты (ПРЗ), основанные на использовании таких информативных параметров, как первая, вторая производные тока и их функции.

Прогнозирующие защиты повышенного уровня технического совершенства должны основываться на использовании моделей переменной составляющей тока КЗ, а в пределе – модели полного тока КЗ с учетом его апериодической слагающей. При этом ПРЗ в начальный момент развития повреждения прогнозируют развитие аварийной ситуации и принимают решение об отключении объекта защиты (ОЗ) задолго до наступления максимальных значений тока КЗ. В совокупности с быстродействующими автоматическими выключателями (АВ) ПРЗ осуществляют токоограничивающее отключение цепей КЗ. Такая потребность уже давно существует в автономных ЭЭС низкого напряжения, где быстродействующие АВ имеют времена срабатывания около единиц миллисекунд, что вызывает необходимость срабатывания устройств РЗ за время менее 1 мс. Аналогичная ситуация возникает и в объединенных ЭЭС высокого напряжения, где появляются криогенные преобразователи, позволяющие в миллисекундном временном диапазоне ограничить токи КЗ, в первую очередь на атомных и гидроаккумулирующих станциях, так как токи повреждения в их генераторных цепях могут достигать 100–200 кА [2].

Для качественного прогнозирования ПРЗ должны производить упреждающий расчет параметров контролируемого процесса, что позволяет прогнозировать его дальнейшее развитие и заранее вычислять максимальное значение тока КЗ. Так как ПРЗ должны принимать решения за время примерно 1 мс, при сложных функциях изменения контролируемого тока это встречает определенные затруднения. Поэтому в тех случаях, когда соответствующее качество прогнозирования удовлетворяет требованиям, можно учитывать только периодическую слагающую тока КЗ и распознавание вести по значению первой производной тока  $i'$ . Более точный прогноз осуществляется (в том числе и при наличии апериодической слагающей тока), если использовать для распознавания функции двух производных контролируемого первичного тока:  $\sup(i', i'')$ ;  $\Sigma(i', i'')$  [2]. В ПРЗ может использоваться также разность между фактическим и смоделированным в устройстве РЗ аварийным током. Необходимо учитывать, что в автономных ЭЭС постоянные времени затухания апериодической слагающей тока КЗ примерно на порядок меньше, чем в объединенных ЭЭС.

Первым шагом по пути создания ПРЗ можно считать импульсные защиты, которые получили применение в системах электроснабжения железных дорог, в первую очередь в ЭРС постоянного тока. Представляет



интерес сравнительный анализ принципов построения различных типов токовых ПРЗ с целью оценки их функциональных возможностей в качестве устройств управления токоограничивающими АВ [2].

Проведем сравнение по относительным значениям основных показателей: быстродействия, чувствительности и аппаратной сложности. За базовые значения принимаем параметры традиционной токовой отсечки, реагирующей на текущие (фактические) значения (например, мгновенные) контролируемых токов и, следовательно, не обладающей функциями прогноза. При оценке параметров ПРЗ считаем, что токовая отсечка функционирует в предельном режиме (при КЗ в конце защищаемой зоны), когда ее коэффициент чувствительности  $k_{ч.отс.} = I_{ImK} / I_{мс.з.} = 1$ , т.е. контролируемый ток повреждения  $i_{IK}$  достигает своего амплитудного значения  $I_{ImK}$ . Прогнозирующие токовые отсечки, реагирующие на производные тока, срабатывают в начальный момент нарастания тока КЗ, когда его мгновенные значения еще далеко не достигли максимального уровня. Это определяет их существенно большую чувствительность и быстродействие. Для сравнения используем значения относительной чувствительности ПРЗ  $k_{р.ч.} = k_{ч.ПРЗ} / k_{ч.отс.}$ , причем за базу сравнения примем чувствительность токовой отсечки описанного выше предельного режима, для которого  $k_{р.ч.} = 1$ . Коэффициент аппаратной сложности также используем относительный, принимая за базу аппаратную сложность токовой отсечки, для которой  $k_{р.анн.} = 1$ . Анализ проводим при двухфазном КЗ с первичным током, изменяющимся по закону

$$i_l = I_{Im} [\sin(\omega t + \psi_{нач.}) - \sin(\psi_{нач.}) \cdot \exp(-t/T_1)], \quad (1)$$

где  $I_{Im}$  – амплитуда периодической составляющей установившегося значения первичного тока КЗ;  $T_1$  – постоянная времени затухания аperiodической составляющей первичного тока КЗ;  $\psi_{нач.}$  – начальная фаза напряжения в момент возникновения тока КЗ;  $\omega = 100\pi$  – угловая частота тока.

При этом учитываем, что аperiodическая составляющая тока максимальна при  $\psi_{нач.} = \pm\pi/2$ . В табл. 1 приведены алгоритмы функционирования ПРЗ и значения их параметров в порядке возрастания аппаратной сложности.

Время срабатывания токовой отсечки может изменяться в зависимости от значения  $\psi_{нач.}$  в пределах от  $t_{с.з.} = 5$  мс при  $\psi_{нач.} = 0$  до  $t_{с.з.} = 10$  мс при

$\psi_{нач.} = \pi/2$ . Следует отметить, что время срабатывания отсечки изменяется также обратно пропорционально коэффициенту кратности тока КЗ.

Наибольшее распространение в автономных ЭЭС получили ПРЗ, реагирующие на первую производную контролируемого тока. Срабатывание ПРЗ происходит в режиме превышения значением производной первичного тока значения заданной уставки  $i'_1 > I_{уст}$ . Для анализа характеристик устройств, в основу которых положен рассматриваемый принцип, продифференцируем по  $t$  выражение (1)

Таблица 1.

Контролируемые параметры	Алгоритм функционирования ПРЗ	$t_{с,з}$ , мс	$K_{рч}$	$K_{рапп}$
$i_1$	$i_1 > I_{уст}$	5–10	1	1
$i'_1$	$i'_1 > I_{уст}$	0,4–5	1,8–10	2
$i'_1, i''_1$	$\sup(i'_1, i''_1) > I_{уст}$	0,4	7,5–10	3
$i'_1, i''_1$	$\Sigma(i'_1, i''_1) > I_{уст}$	0,4	9–10	3
$i_1, i_{1\text{мод}}$	$\Delta i_1 / \Delta i_{1\text{мод}} > 1$	0,4–2,5	2,5–10	6
$i_1, i_{1\text{мод}}$	$t_{и}$ $\int_0^{t_{и}} [(i_1 - i_{1\text{нач}}) - (i_{1\text{мод}} - i_{1\text{мод,нач}})] dt > I_{уст}$	0,4	10	10

$$i'_1 = I_{1m} [\omega \cos(\omega t + \psi_{нач.}) + (\sin(\psi_{нач.}) / T_1) \cdot \exp(-t / T_1)], \quad (2)$$

и рассмотрим кривые  $i'_1$  с различными  $\psi_{нач.}$  и их огибающие в относительных единицах;  $i'_{r1} = i'_1 / (\omega T_{1m})$ ;  $i'_{r1m} = i'_{1\text{max}} / (\omega T_{1m})$ . При  $\psi_{нач.} = 0$   $i'_{r1} = \cos(\omega t)$  и, следовательно,  $i'_{r1}$  максимальна в момент  $t = 0$ . Если  $0 < \psi_{нач.} < \pm \pi/2$ , то максимум  $i'_{r1}$  наступает с задержкой и  $t_{с.з.}$  увеличивается до 5 мс. В связи с этим быстродействие уменьшается и для конкретного значения  $i'_{r1}$  определяется из трансцендентного уравнения  $\cos(\omega t) = (-1 / \omega^2 T_1^2) \exp(-t / T_1)$ . Таким образом, зависимость  $i'_{r1m}$  от  $\psi_{нач.}$  подтверждает принципиальное наличие задержки в срабатывании рассматриваемого устройства ПРЗ. Повысить быстродействие можно снижением уставки, чтобы срабатывание происходило при меньшем уровне  $i'_1$ . Однако эта мера соответственно снижает чувствительность РЗ, а

поэтому не всегда эффективна. Чувствительность ПРЗ также зависит от  $\psi_{нач.}$  и  $T_I$  и рассчитывается по формуле

$$K_{r.ч} = \left\{ \sin(2\psi_{нач.}) - \sin(\psi_{нач.}) \exp(-\psi_{нач.} / \omega T_I) \right\}^{-1},$$

Коэффициент  $K_{r.ч}$  изменяется в диапазоне от 1,8 при наибольшей апериодической составляющей до 10 при симметричном токе КЗ с быстродействием ПРЗ, равным 0,4 мс. Следует отметить также, что кривая  $i'_{rIm}$  практически линейна (нелинейность не более 3%), что является следствием малого значения свободной составляющей тока в (2). В результате пропорциональность между  $I_{Im}$  и  $i'_I$  сохраняется во всех режимах протекания тока КЗ. Это позволяет по значению  $i'_I$  с высокой точностью прогнозировать амплитуду периодической составляющей первичного тока, хотя принципиальное запаздывание в выполнении этой операции для таких ПРЗ достигает 5 мс.

Технически более совершенные устройства ПРЗ, использующие первую и вторую производные первичного тока, устраняют недостаток защит, использующих только первую производную тока – задержку в срабатывании и связанное с этим снижение чувствительности. Расчетные кривые изменения второй производной тока и их огибающие в относительных единицах  $i''_{rI} = i''_I / (\omega^2 T_{Im}^2)$  и  $i''_{rIm} = i''_{Im} / (\omega^2 T_{Im}^2)$  при различных значениях времени определяются из выражения

$$i''_I = I_{Im} \left[ -\omega^2 \sin(\omega t + \psi_{нач.}) - (\sin(\psi_{нач.}) / T_I^2) \cdot \exp(-t / T_I) \right],$$

При наибольшей апериодической составляющей, возникающей при  $\psi_{нач.} = \pm \pi / 2$ , в первый момент времени вторая производная тока  $i''$  имеет максимальное значение, соответствующее протеканию синусоидального тока с амплитудой  $I_{Im}$ . Первая же производная тока  $i'_I$  при этом минимальна. При  $-\pi / 2 < \psi_{нач.} < +\pi / 2$  если свободная составляющая тока  $I_{Im} \sin(\psi_{нач.}) \exp(-t / T_I)$  суммируется с вынужденной  $I_{Im} \sin(\omega t + \psi_{нач.})$ , то по мере уменьшения  $\psi_{нач.}$  значения  $i'_{rI}$  в первый момент времени увеличиваются, а  $i''_{rI}$  соответственно уменьшаются. Это позволяет обеспечить высокие показатели по быстродействию и чувствительности устройств ПРЗ. В ПРЗ, работающей по алгоритму  $\sup(i', i'')$ , выявляются максимальные значения  $i'_I$  и  $i''_I$  при

$sign i_1 = sign i'_1 = sign i''_1$ . Этим достигается надежность ее функционирования при эксплуатационных переходных процессах в автономной ЭЭС. Быстродействие такой ПРЗ определяется длительностью переходных процессов в измерительных преобразователях тока (ИПТ) и электронной схеме защиты и составляет 0,4—0,5 мс. Коэффициент относительной чувствительности  $K_{r,ч}$  зависит от  $\psi_{нач.}$  и  $T_1$  и, как показали расчеты, находится в пределах 7,5—10.

В ПРЗ, осуществляющей суммирование величин  $i'_1$  и  $i''_1$ , также производится сравнение полярностей тока и его производных. Параметр срабатывания формируется следующим образом:  $\Sigma(i', i'')$ , если  $sign i_1 = sign i'_1 = sign i''_1$  и  $i'_1$ , если  $sign i_1 = sign i'_1$ . Срабатывание такого устройства по значению первой производной тока происходит при фазе  $\psi_{нач.}$ , близкой к нулю (или равной  $\pm\pi$ ). Суммирование не нарушает пропорциональности между параметрами срабатывания и  $I_{1m}$  аварийного тока во всех режимах КЗ, а также отстройку от ложных срабатываний.

На рис. 1 показаны режим протекания тока и изменение параметра срабатывания  $\Sigma(i', i'')$  при  $\psi_{нач.} = \pi/2$ .

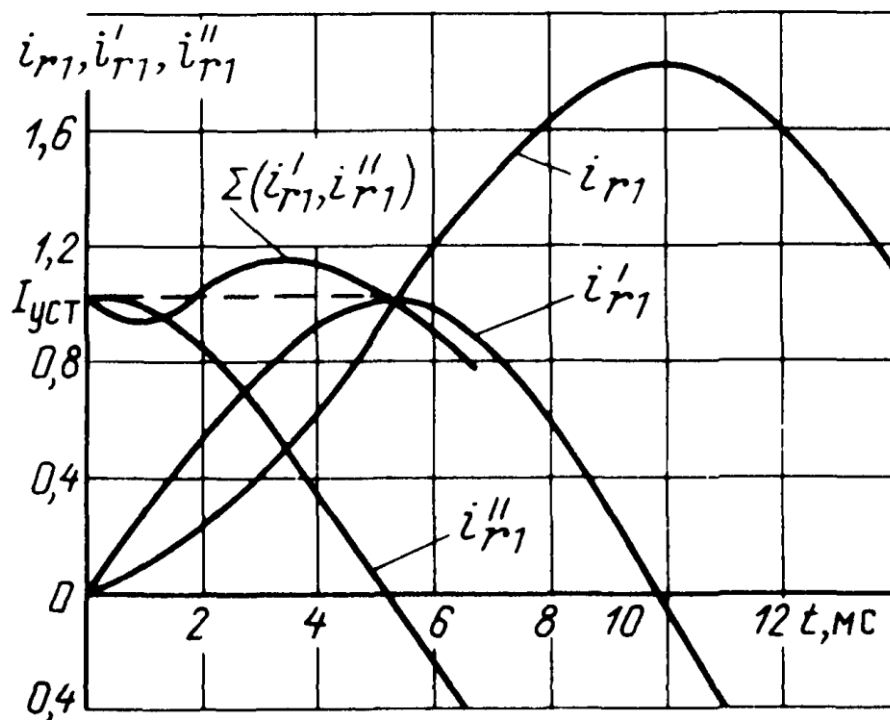


Рис.1. Кривые изменения относительных значений токов [2]

Из результатов проведенного расчета и анализа кривых на рис. 1 с другими значениями  $\psi_{нач.}$  следует, что контролируемый параметр во временном диапазоне 0—5 мс изменяется по амплитуде не более чем на  $\pm 8\%$  относительно значения  $I_{уст.}$  Малые изменения сформированного параметра в относительно большом временном диапазоне существенно повышают надежность функционирования устройства ПРЗ, особенно при воздействии на него помех.

Представляется перспективным использование для реализации ПРЗ специализированных МП, которые обрабатывают информацию в виде одноразрядных или многоразрядных приращений переменных. Применение инкрементного принципа (принципа приращений) сокращает объем перерабатываемой информации и используемого оборудования, повышает помехоустойчивость устройств обработки. Прогнозирование параметров функций физических систем связано с применением методов интерполирования и экстраполирования. Эта задача решается с использованием методов аналитического приближения функций. Для реализации ПРЗ особый интерес представляют методы экстраполирования. Прогнозирующие РЗ можно отнести к техническим устройствам, осуществляющим краткосрочный прогноз на несколько упреждаемых значений [2].

**Требования к отчету.** Отчет должен содержать описание работы нескольких вариантов реализации ПРЗ (в соответствии с заданием преподавателя) и выводы о целесообразности применения того или иного варианта. При сдаче отчета необходимо уметь давать пояснения по существу выполненного задания и показать знание соответствующих разделов дисциплины в объеме программы.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.
2. Микропроцессорные гибкие системы релейной защиты./ В.В. Михайлов, Е.В. Кириевский, Е.М. Ульяницкий и др.; / Под ред. В.П. Морозкина. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 240 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	<b>3</b>
Введение	<b>5</b>
Критерии достижения результатов обучения по блоку практических дисциплин	<b>6</b>
Прогнозирующие гибкие устройства релейной защиты на базе специализированных микропроцессоров	<b>7</b>
Библиографический список	<b>14</b>

Учебное издание

**Козлов Александр Николаевич,**  
*доцент кафедры энергетики АмГУ, канд. техн. наук;*

**Микропроцессорные средства управления в электроэнергетике. Часть 4.**  
**Прогнозирующие гибкие устройства релейной защиты:**  
*методические указания к практическим занятиям*

---

Издательство АмГУ. Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 0,87.