



*Уважаемые читатели!*

*Перед вами издание из серии «Мир энергетики». В нее вошли работы ученых с мировым именем, ранее не издававшиеся на русском языке. Книги отобраны членами Технического совета Российского национального комитета СИГРЭ и посвящены наиболее актуальным темам развития электрических сетей. Отрасль в России и во всем мире переживает период активной технологической трансформации. Именно поэтому серия «Мир энергетики» будет интересна как действующим специалистам, так и будущим энергетикам.*

*Председатель Правления ПАО «ФСК ЕЭС»,  
Председатель Российского национального комитета СИГРЭ  
А.Е. Муров*



## **РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ СЕРИИ КНИГ «МИР ЭНЕРГЕТИКИ»**

**Муров Андрей Евгеньевич** председатель правления ПАО «ФСК ЕЭС», председатель РНК СИГРЭ

### ***Председатель Технического комитета РНК СИГРЭ***

**Шаров Юрий Владимирович** генеральный директор, ООО «Интер РАО – Инжиниринг»

### ***Заместитель председателя Технического комитета РНК СИГРЭ***

**Шунтов Андрей Вячеславович** (С4, «Технические характеристики энергосистем»), заместитель заведующего кафедрой электроэнергетических систем НИУ МЭИ

### ***Члены Технического комитета РНК СИГРЭ:***

**Ануфриев Андрей Сергеевич** (А2, «Трансформаторы»), главный инженер по инновациям и стандартизации, ООО «Тольяттинский трансформатор»

**Баркин Олег Геннадьевич** (С5, «Рынки электроэнергии и регулирование»), член правления – заместитель председателя правления ассоциации «НП Совет рынка»

**Беляков Виктор Владимирович** (А1, «Вращающиеся машины»), директор по развитию газовой генерации ООО «Интер РАО – Инжиниринг»

**Водеников Дмитрий Александрович** (В3, «Подстанции»), заместитель председателя правления – главный инженер, ПАО «ФСК ЕЭС»

**Демченко Денис Александрович** (С3, «Экологические характеристики работы энергосистем»), руководитель управления реализации инжиниринговых проектов ООО «Интер РАО – Инжиниринг»

**Динмухаметов Фаниль Фаритович** (В1, «Изолированные кабели»), исполнительный директор ООО «Таткабель»

**Дьячков Владимир Анатольевич** (С2, «Функционирование и управление энергосистем»), заместитель главного диспетчера по режимам АО «СО ЕЭС»

**Елифанов Андрей Михайлович** (А3, «Высоковольтное оборудование»), генеральный директор АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

**Жуков Андрей Васильевич** (В5, «Релейная защита и автоматика»), заместитель директора по управлению режимами ЕЭС АО «СО ЕЭС»

**Илюшин Павел Владимирович** (С6, «Системы распределения электроэнергии и распределенная генерация»), проректор по научной работе Петербургского энергетического института повышения квалификации Минэнерго России

**Ляпунов Евгений Викторович**, генеральный директор ПАО «ФСК ЕЭС» – «МЭС Западной Сибири»

**Осинцев Кирилл Анатольевич** (ученый секретарь Технического комитета РНК СИГРЭ), начальник управления международных проектов ПАО «Российские сети»

**Синенко Ольга Викторовна** (D2, «Информационные системы и телекоммуникации»), генеральный директор АО «РТСофт»

**Славинский Александр Зиновьевич** (D1, «Материалы и разработка новых методов испытаний и средств диагностики»), председатель совета директоров ООО «Масса»

**Сулов Константин Витальевич** (С1, «Планирование развития энергосистем и экономика»), профессор кафедры электроснабжения и электротехники ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»

**Сулова Ольга Владимировна** (В4, «Электропередача постоянным током высокого напряжения»), ведущий научный сотрудник АО «НТЦ ЕЭС»

**Архипов Игорь Леонидович**, начальник Департамента инновационного развития ПАО «ФСК ЕЭС»

**Новиков Сергей Васильевич**, заместитель генерального директора АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», к.т.н.



# М И Р Э Н Е Р Г Е Т И К И

Арун Г. Фадке,  
Джеймс С. Торп

Компьютерная релейная  
защита в энергосистемах  
Второе издание

перевод с английского  
под редакцией  
проф., к.т.н. Г.С. Нудельмана

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2019



Издание осуществлено при поддержке  
ПАО «ФСК ЕЭС» и РНК СИГРЭ

УДК 621.316.925 + 621.311

ББК 31.27-05

Ф15

Ф15 Фадке Арун Г., Торп Джеймс С.

**Компьютерная релейная защита в энергосистемах. Второе издание**

**Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2019. – 370 с. ISBN 978-5-94836-552-7**

Это второе издание книги, посвященное адаптивной релейной защите. В него включено несколько новых аналитических методов в сфере релейной защиты, но следует подчеркнуть, что большинство из них пока еще не нашли воплощения на практике в проектах релейной защиты.

Эта книга остается научно-исследовательской работой и справочником. По существу, проблема, обозначенная в конце каждой главы, часто является формулировкой темы для исследования. Некоторые задачи довольно сложны, и каждая из них оставляет место для индивидуальных интерпретаций и разработок. Поэтому в книге не предлагается решение этих задач и оставляется их решение на откуп читателям.

Книга предназначена для магистрантов и аспирантов по электроэнергетическим специальностям, исследователей, работающих в этой области, и для всех, кто хочет разобраться в новой технологии.

Copyright © 2009 Research Studies Press Limited, 16 Coach House Cloisters, 10 Hitchin Street, Baldock, Hertfordshire, SG7 6AE  
Published by John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England  
Telephone (+44) 1243 779777

*Все права защищены. Авторизованный перевод английского издания «Джон Вайли энд Санс Лимитед».*  
*АО РИЦ «ТЕХНОСФЕРА» несет полную ответственность за правильность перевода. «Джон Вайли энд Санс Лимитед» освобождается от этой ответственности.*  
*Ни одна часть книги не может быть воспроизведена в какой-либо форме без письменного разрешения правообладателя оригинала «Джон Вайли энд Санс Лимитед».*

## COMPUTER RELYING FOR POWER SYSTEMS

Second Edition

Arun G. Phadke

University Distinguished Professor Emeritus  
The Bradley Department of Electrical and Computer Engineering  
Virginia Tech, Blacksburg, Virginia, USA

James S. Thorp

Hugh P. and Edith C. Keller Professor and Department Head  
The Bradley Department of Electrical and Computer Engineering  
Virginia Tech, Blacksburg, Virginia, USA

WILEY

A John Wiley and Sons, Ltd., Publication



Research Studies Press Limited

УДК 621.316.925 + 621.311

ББК 31.27-05

© АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», перевод на русский язык, оригинал-макет, оформление, 2019

ISBN 978-5-94836-552-7

ISBN 978-0-470-05713-1 (англ.)

# Содержание

|                                                                         |           |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Об авторах</b>                                                       | <b>11</b> |
| <b>Предисловие к первому изданию</b>                                    | <b>13</b> |
| <b>Предисловие ко второму изданию</b>                                   | <b>15</b> |
| <b>Список сокращений</b>                                                | <b>17</b> |
| <b>Глава 1. Введение в компьютерную релейную защиту</b>                 | <b>20</b> |
| 1.1. Развитие компьютерной релейной защиты                              | 20        |
| 1.2. Исторические предпосылки                                           | 21        |
| 1.3. Ожидаемые преимущества компьютерной релейной защиты                | 23        |
| 1.3.1. Стоимость                                                        | 23        |
| 1.3.2. Самодиагностика и надежность                                     | 24        |
| 1.3.3. Системная интеграция и цифровая среда                            | 24        |
| 1.3.4. Функциональная гибкость и адаптивная релейная защита             | 25        |
| 1.4. Архитектура компьютерной системы релейной защиты                   | 27        |
| 1.5. Аналого-цифровые преобразователи                                   | 34        |
| 1.5.1. АЦП последовательного приближения                                | 35        |
| 1.5.2. Дельта-сигма-АЦП                                                 | 37        |
| 1.6. Сглаживающие фильтры                                               | 38        |
| 1.7. Иерархия компьютеров на подстанции                                 | 42        |
| 1.8. Краткие выводы                                                     | 44        |
| Контрольные задачи                                                      | 45        |
| Список литературы                                                       | 46        |
| <b>Глава 2. Техника релейной защиты</b>                                 | <b>48</b> |
| 2.1. Введение в системы защиты                                          | 48        |
| 2.2. Функции системы защиты                                             | 50        |
| 2.3. Защита линий электропередачи                                       | 55        |
| 2.3.1. Реле максимальной токовой защиты                                 | 55        |
| 2.3.2. Реле направления                                                 | 57        |
| 2.3.3. Дистанционные реле                                               | 60        |
| 2.3.4. Векторные диаграммы в комплексной плоскости<br>и в плоскости R-X | 63        |
| 2.3.5. Основная релейная защита с абсолютной селективностью             | 65        |
| 2.4. Защита трансформаторов, реакторов и генераторов                    | 66        |
| 2.4.1. Защита трансформаторов                                           | 66        |
| 2.4.2. Защита реактора                                                  | 69        |
| 2.4.3. Защита генератора                                                | 69        |
| 2.5. Защита шин                                                         | 70        |
| 2.6. Работа трансформаторов тока и напряжения                           | 72        |
| 2.6.1. Трансформаторы тока                                              | 72        |
| 2.6.2. Трансформаторы напряжения                                        | 74        |
| 2.6.3. Электронные преобразователи тока и напряжения                    | 75        |

|                                                                  |            |
|------------------------------------------------------------------|------------|
| 2.6.3.1. Электронные преобразователи тока [12]                   | 75         |
| 2.6.3.2. Электронные преобразователи напряжения [13]             | 76         |
| 2.6.3.3. Катушки Роговского                                      | 77         |
| 2.7. Краткие выводы                                              | 78         |
| Контрольные задачи                                               | 78         |
| Список литературы                                                | 81         |
| <b>Глава 3. Математические основы алгоритмов релейной защиты</b> | <b>82</b>  |
| 3.1. Введение                                                    | 82         |
| 3.2. Ряды Фурье                                                  | 83         |
| 3.2.1. Экспоненциальные ряды Фурье                               | 85         |
| 3.2.2. Ряд Фурье в тригонометрической форме                      | 87         |
| 3.2.3. Комплексные амплитуды                                     | 88         |
| 3.3. Другие ортогональные разложения                             | 89         |
| 3.3.1. Функции Уолша                                             | 89         |
| 3.4. Преобразования Фурье                                        | 90         |
| 3.4.1. Свойства преобразования Фурье                             | 96         |
| 3.5. Использование преобразования Фурье                          | 106        |
| 3.5.1. Дискретизация                                             | 106        |
| 3.6. Дискретное преобразование Фурье                             | 109        |
| 3.7. Введение в теорию вероятностей и теорию случайных процессов | 111        |
| 3.7.1. Случайные переменные и вероятностные распределения        | 112        |
| 3.7.2. Распределение вероятностей и плотность вероятности        | 113        |
| 3.7.3. Математическое ожидание                                   | 114        |
| 3.7.4. Совместно распределенные случайные переменные             | 115        |
| 3.7.5. Независимость                                             | 117        |
| 3.7.6. Линейная оценка                                           | 117        |
| 3.7.7. Взвешенные наименьшие квадраты                            | 118        |
| 3.8. Случайные процессы                                          | 119        |
| 3.8.1. Фильтрация случайных процессов                            | 122        |
| 3.9. Фильтрация Калмана                                          | 123        |
| 3.10. Выводы                                                     | 128        |
| Контрольные задачи                                               | 128        |
| Список литературы                                                | 133        |
| <b>Глава 4. Цифровые фильтры</b>                                 | <b>134</b> |
| 4.1. Введение                                                    | 134        |
| 4.2. Системы дискретного времени                                 | 134        |
| 4.2.1. Операции с последовательностями дискретного времени       | 135        |
| 4.2.2. Свертка                                                   | 135        |
| 4.3. Системы дискретного времени                                 | 136        |
| 4.4. Z-преобразования                                            | 138        |
| 4.4.1. Степенной ряд                                             | 138        |
| 4.4.2. Z-преобразования                                          | 139        |

|                                                                               |            |
|-------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.4.3. Обратное Z-преобразование                                              | 140        |
| 4.4.4. Свойства Z-преобразования                                              | 141        |
| 4.4.5. Преобразование Фурье для дискретного времени                           | 143        |
| 4.5. Цифровые фильтры                                                         | 144        |
| 4.6. Окна и оконное преобразование                                            | 145        |
| 4.7. Линейная фаза                                                            | 148        |
| 4.8. Аппроксимация — синтез фильтра                                           | 149        |
| 4.9. Вейвлеты                                                                 | 151        |
| 4.10. Элементы искусственного интеллекта                                      | 154        |
| 4.10.1. Искусственные нейронные сети                                          | 154        |
| 4.10.2. Деревья решений                                                       | 156        |
| 4.10.3. Агенты                                                                | 158        |
| 4.11. Заключение                                                              | 159        |
| Контрольные задачи                                                            | 159        |
| Список литературы                                                             | 161        |
| <b>Глава 5. Релейная защита линий электропередачи</b>                         | <b>163</b> |
| 5.1. Введение                                                                 | 163        |
| 5.2. Источники ошибок                                                         | 168        |
| 5.3. Релейная защита как оценка параметров                                    | 174        |
| 5.3.1. Алгоритмы аппроксимации кривой                                         | 175        |
| 5.3.2. Алгоритмы Фурье                                                        | 176        |
| 5.3.3. Алгоритмы Фурье с более узкими окнами                                  | 178        |
| 5.3.4. Рекурсивные формы                                                      | 179        |
| 5.3.5. Алгоритмы функции Уолша                                                | 180        |
| 5.3.6. Алгоритмы в дифференциальных уравнениях                                | 182        |
| 5.3.6.1. Анализ ошибок для алгоритмов в дифференциальных уравнениях           | 185        |
| 5.3.7. Алгоритмы фильтрации Калмана                                           | 189        |
| 5.3.8. Удаление ошибки смещения, обусловленной составляющей постоянного тока  | 190        |
| 5.4. Другие задачи, помимо оценки параметров                                  | 193        |
| 5.4.1. Алгоритмы релейной защиты, основанные на классификации неисправности   | 194        |
| 5.5. Дистанционная релейная защита с использованием симметричных составляющих | 197        |
| 5.5.1. ДПФ симметричных составляющих                                          | 200        |
| 5.5.2. Алгоритм сегментации переходного процесса                              | 201        |
| 5.5.3. Соотношения быстродействия защиты и величины защищаемой зоны           | 203        |
| 5.5.4. Алгоритм релейной защиты                                               | 207        |
| 5.6. Новые аналитические методы                                               | 210        |
| 5.6.1. Применение вейвлетов                                                   | 210        |
| 5.6.2. Применение исполнительных устройств                                    | 211        |

|                                                                                     |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.7. Защита ЛЭП с продольной емкостной компенсацией.....                            | 211        |
| 5.8. Выводы.....                                                                    | 213        |
| Контрольные задачи.....                                                             | 214        |
| Список литературы.....                                                              | 215        |
| <b>Глава 6. Защита трансформаторов, электрических машин и шин.....</b>              | <b>218</b> |
| 6.1. Введение.....                                                                  | 218        |
| 6.2. Алгоритмы защиты силовых трансформаторов.....                                  | 219        |
| 6.2.1. Загруженность по току.....                                                   | 220        |
| 6.2.2. Ограничения на основе напряжений.....                                        | 223        |
| 6.2.3. Ограничение на основе магнитного потока.....                                 | 225        |
| 6.2.4. Функция ограничения на основе провала при броске тока.....                   | 230        |
| 6.3. Защита генератора.....                                                         | 230        |
| 6.3.1. Дифференциальная защита обмотки статора.....                                 | 231        |
| 6.3.2. Другие функции защиты генератора.....                                        | 233        |
| 6.3.3. Частота дискретизации, привязанная к частоте системы.....                    | 234        |
| 6.4. Защита двигателя.....                                                          | 235        |
| 6.5. Цифровая защита шины.....                                                      | 236        |
| 6.6. Выводы.....                                                                    | 241        |
| Контрольные задачи.....                                                             | 241        |
| Список литературы.....                                                              | 243        |
| <b>Глава 7. Организация аппаратного обеспечения в интегрированных системах.....</b> | <b>246</b> |
| 7.1. Характер проблем аппаратного обеспечения.....                                  | 246        |
| 7.2. Компьютеры для релейной защиты.....                                            | 247        |
| 7.3. Условия окружающей среды на подстанции.....                                    | 250        |
| 7.4. Промышленные стандарты условий окружающей среды.....                           | 251        |
| 7.5. Защита от ЭМП.....                                                             | 255        |
| 7.6. Дополнительное оборудование.....                                               | 257        |
| 7.6.1. Источник питания.....                                                        | 257        |
| 7.6.2. Вспомогательные реле.....                                                    | 258        |
| 7.6.3. Переключатели испытательного режима.....                                     | 258        |
| 7.6.4. Панель управления.....                                                       | 258        |
| 7.7. Избыточность и резервирование.....                                             | 259        |
| 7.8. Обучение, эксплуатация и техническое обслуживание.....                         | 261        |
| 7.9. Краткие выводы.....                                                            | 263        |
| Список литературы.....                                                              | 263        |
| <b>Глава 8. Релейная защита и управление системой.....</b>                          | <b>265</b> |
| 8.1. Введение.....                                                                  | 265        |
| 8.2. Измерение частоты и фазы.....                                                  | 266        |
| 8.2.1. Оценка $f$ и $df/dt$ методом наименьших квадратов.....                       | 269        |
| 8.3. Синхронизация частоты выборки.....                                             | 270        |



|                                                                             |            |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------|
| 8.4. Применение измерений комплексных амплитуд для оценки состояния         | 271        |
| 8.4.1. ВНК-оценитель, включающий измерения углов                            | 274        |
| 8.4.2. Линейный оценитель состояния                                         | 275        |
| 8.4.3. Многораздельные оценители состояния                                  | 279        |
| 8.4.4. Размещение УВИ                                                       | 281        |
| 8.5. Измерения комплексных амплитуд в оценке динамического состояния        | 282        |
| 8.5.1. Уравнение состояния                                                  | 285        |
| 8.6. Мониторинг                                                             | 285        |
| 8.6.1. Анализ последовательности событий                                    | 285        |
| 8.6.2. Обнаружение медленно развивающихся повреждений                       | 286        |
| 8.6.3. Мониторинг технического состояния выключателя                        | 287        |
| 8.7. Управляющие программы                                                  | 287        |
| 8.8. Краткие выводы                                                         | 288        |
| Контрольные задачи                                                          | 289        |
| Список литературы                                                           | 290        |
| <b>Глава 9. Применение бегущих волн в релейной защите</b>                   | <b>293</b> |
| 9.1. Введение                                                               | 293        |
| 9.2. Бегущие волны в однолинейных сетях                                     | 293        |
| 9.3. Бегущие волны в трехфазных линиях                                      | 300        |
| 9.3.1. Бегущие волны, обусловленные замыканиями <sup>5</sup>                | 303        |
| 9.4. Реле направленной волны                                                | 305        |
| 9.5. Дистанционная релейная защита с использованием бегущей волны           | 308        |
| 9.6. Дифференциальная релейная защита с использованием комплексных амплитуд | 312        |
| 9.7. Дифференциальная релейная защита с использованием бегущей волны        | 315        |
| 9.8. Определение места короткого замыкания                                  | 316        |
| 9.8.1. Определение места замыкания на основе оценки сопротивления           | 316        |
| 9.8.2. Определение места замыкания на основе бегущих волн                   | 318        |
| 9.9. Другие новые разработки                                                | 320        |
| 9.10. Выводы                                                                | 321        |
| Контрольные задачи                                                          | 321        |
| Список литературы                                                           | 323        |
| <b>Глава 10. Приложения сегментации переходных режимов</b>                  | <b>325</b> |
| 10.1. Введение                                                              | 325        |
| 10.2. Адаптивная релейная защита                                            | 325        |
| 10.3. Примеры функций адаптивной релейной защиты                            | 327        |
| 10.3.1. Защита линии электропередачи [8]                                    | 327        |
| 10.3.2. Защита трансформаторов                                              | 329        |

|                                                                                                  |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 10.3.3. Повторное включение.....                                                                 | 330        |
| 10.4. Системы мониторинга переходных режимов (СМНР).....                                         | 332        |
| 10.5. Архитектура СМНР.....                                                                      | 333        |
| 10.6. Принципы защиты на базе СМНР.....                                                          | 334        |
| 10.6.1. Адаптивная безотказность и безопасность.....                                             | 334        |
| 10.6.2. Мониторинг приближения кажущихся полных<br>сопротивлений к релейным характеристикам..... | 336        |
| 10.6.3. Релейная защита от асинхронного хода на базе СМНР.....                                   | 338        |
| 10.6.4. Управление зонами резервирования.....                                                    | 342        |
| 10.6.5. Интеллектуальная аварийная разгрузка.....                                                | 344        |
| 10.6.6. Адаптивная защита от потери возбуждения.....                                             | 345        |
| 10.6.7. Интеллектуальное секционирование.....                                                    | 346        |
| 10.6.8. Общесистемная интеграция СЗЦС.....                                                       | 347        |
| 10.6.9. Сброс и восстановление нагрузки.....                                                     | 348        |
| 10.7. Краткие выводы.....                                                                        | 349        |
| Контрольные задачи.....                                                                          | 349        |
| Список литературы.....                                                                           | 350        |
| <b>Приложение А</b>                                                                              |            |
| Репрезентативные системные данные.....                                                           | 352        |
| Линии электропередачи [1].....                                                                   | 352        |
| Трансформаторы.....                                                                              | 354        |
| Генераторы.....                                                                                  | 354        |
| Энергосистема.....                                                                               | 354        |
| Список литературы.....                                                                           | 355        |
| <b>Приложение Б</b>                                                                              |            |
| Стандартные частоты дискретизации.....                                                           | 356        |
| Список литературы.....                                                                           | 358        |
| <b>Приложение В</b>                                                                              |            |
| Преобразование между различными частотами дискретизации.....                                     | 359        |
| Список литературы.....                                                                           | 362        |
| <b>Приложение Г</b>                                                                              |            |
| Стандарт обмена параметрами переходного состояния.....                                           | 363        |
| Список литературы.....                                                                           | 364        |
| <b>Предметный указатель.....</b>                                                                 | <b>365</b> |

## Об авторах

**Профессор Арун Г. Фадке** проработал в электроэнергетической промышленности 13 лет, прежде чем начал преподавать в Политехническом университете Вирджинии в 1982 году. В 1985 году ему было присвоено звание American Electric Power Professor of Electrical Engineering, в котором он работал вплоть до 2000 года, когда был признан заслуженным профессором университета (University Distinguished Professor). В 2003 году он стал заслуженным профессором университета в отставке (University Distinguished Professor Emeritus) и остается членом научного коллектива кафедры электротехники и вычислительной техники Политехнического университета Вирджинии. В 1980 году профессор Фадке был избран заслуженным членом (Fellow) Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (IEEE), а в 1993 году вошел в состав Национальной инженерной академии. Он был главным редактором Transactions of IEEE on Power Delivery и занимал кресло председателя Комитета по релейной защите энергосистем IEEE в 1999–2000 годах. В 2000 году профессор Фадке получил присуждаемую IEEE премию Германа Гальперина. Исследователь также принимал активное участие в деятельности Международного совета по большим электрическим системам высокого напряжения (СИГРЭ). Он был членом Исполнительного комитета и председателем Технического комитета Национального комитета СИГРЭ США, а до того занимал должность вице-президента Национального комитета СИГРЭ США и выполнял обязанности секретаря/казначей. В 2002 году Административный совет СИГРЭ проголосовал за избрание профессора Фадке заслуженным членом СИГРЭ. Ученый несколько лет входил в исследовательский комитет 34 СИГРЭ и был председателем некоторых из его рабочих групп. В 1999 году профессор вместе с коллегами из Европы и с Дальнего Востока учредил Международный институт критических инфраструктур (CRIS) и стал его первым президентом (1999–2002 гг.), в настоящее время он является членом его административного совета. Профессор Фадке получил звание «Почетный доктор» (Docteur Honoris Causa) Национального политехнического института Гренобля в 2006 году. В 2008 году он был награжден премией имени Владимира Карапетова (Karapetoff Award) общества «Эта Каппа Нью» (HKN Society) и медалью Бенджамина Франклина по электротехнике.

**Профессор Джеймс С. Торп** является профессором (титулованным Hugh P. and Ethel C. Kelley Professor) и заведующим кафедрой электротехники и вычислительной техники имени Брэдли в Политехническом университете Вирджинии. С 1994 по 2004 годы ученый работал в должности профессора, титулованного Charles N. Mellowes Professor in Engineering, в Корнеллском университете. В 1959 году он получил степень бакалавра электротехнических наук, а в 1962 году — доктора наук (PhD) в Корнеллском университете, с 1994 по 2001 годы был директором школы

электротехники и вычислительной техники Корнелла, повышал квалификацию в Американской электроэнергетической компании (American Electric Power Service Corporation) в 1976–1977 годах, а также проходил стажировку в качестве Overseas Fellow в колледже Черчилля Кембриджского университета в 1988 году. Профессор Торп предоставлял консультационные услуги таким компаниям, как Mehta Tech, Inc., Basler Electric, RFL Dowty Industries, American Electric Power Service Corporation и General Electric, получал национальную стипендию фонда Альфреда Слоуна и был избран заслуженным членом IEEE в 1989 году, а также членом Национальной инженерной академии в 1996 году. В 2001 году профессор Торп был удостоен награды от Электроэнергетического сообщества IEEE (Power Engineering Society) за профессиональную службу (Career Service), в 2006 году — премии IEEE за выдающиеся заслуги в области преподавания энергетических дисциплин (Outstanding Power Engineering Educator Award), а 2007 году — медали Бенджамина Франклина (вместе с А. Г. Фадке).

## Предисловие к первому изданию

Концепция использования цифровых ЭВМ для релейной защиты возникла около 25 лет назад. С тех пор эта сфера деятельности пережила бурное развитие. Вычислительные машины претерпели значительные изменения — они стали более мощными, более дешевыми и отказоустойчивыми. На сегодняшний день компьютерная защита является приоритетной задачей как по экономическим, так и по техническим причинам. Вышеперечисленным достижениям в компьютерной технике сопутствовали теоретические исследования в области релейной защиты. Благодаря деятельности ученых в университетах и на промышленных предприятиях теория релейной защиты электроэнергетических систем обрела математическую основу. Следует отметить, что в большинстве случаев математические изыскания подтвердили, что реле традиционных конструкций были оптимальным или почти оптимальным решением для релейной защиты. Это выглядит убедительным: теоретические и практические аспекты релейной защиты получили подтверждение одновременно.

Описания этих разработок разбросаны по всей технической литературе: материалам различных конференций, трудам инженерных сообществ, техническим описаниям и инструкциям по эксплуатации разных производителей оборудования. Эта книга является нашей попыткой представить логически целостное описание области компьютерной релейной защиты. Мы принимаем активное участие в изучении этой предметной области (по большей части в тесном сотрудничестве друг с другом) с середины 1970-х годов. Мы попытались представить взвешенный обзор всех разработок в этой области, хотя может показаться, что порой мы уделяем больше внимания тем разделам, в которые внесли вклад сами. Приносим извинения за наше пристрастное отношение, если читатель рассматривает это таким образом.

Книга предназначена для магистрантов и аспирантов по электроэнергетическим специальностям, исследователей, работающих в этой области, и для всех, кто хочет разобраться в новой технологии, будучи потенциальным пользователем или производителем компьютерных реле. При создании обучающего курса на основании этой книги мы рекомендуем следовать порядку изложения материала. Если такому курсу предшествует курс по традиционным защитам, то главу 2 можно опустить. Математические основы релейной защиты изложены в главе 3 и адресованы тем, кто в настоящее время не имеет ношения к академической среде. Этот материал необходим для того, чтобы понять, почему алгоритм релейной защиты работает так, как он работает, хотя принцип его работы, т. е. блок-схему алгоритма, можно понять и в отсутствие глубоких математических знаний. Читатель, преследующий такую узкую цель, может пропустить

математическое обоснование и сразу перейти к разделам, представляющим для него непосредственный интерес.

Наше длительное сотрудничество с Американской электроэнергетической компанией (АЕР) стало важнейшим элементом для поддержания нашего интереса к компьютерной релейной защите. Атмосфера в старом отделе применения ЭВМ АЕР под руководством Тони Габриэлле (Tony Gabrielle) была особенно подходящей для инновационных инженерно-конструкторских работ. Тони отвечал за введение нас в курс дела и за предоставление необходимой поддержки, когда казалось, что практические результаты будут достигнуты только в далеком будущем. В АЕР также работал Стэн Горовиц (Stan Horowitz), наш коллега и наставник, без чьей помощи мы бы утратили связь с реальным положением дел в области релейной защиты как практической инженерной сферы деятельности. Стэн Горовиц, Эрик Удрен (Eric Udren) и Питер МакЛарен (Peter McLaren) прочитали нашу рукопись и внесли ряд конструктивных замечаний. Мы благодарны им за их помощь. Но, разумеется, ответственность за эту книгу и за любые оставшиеся в ней ошибки лежит на нас.

Мы по-прежнему получаем огромное удовольствие от работы в этой области. Надеемся, что благодаря этой книге мы сможем поделиться нашей радостью с читателем.

*Арун Г. Фадке*  
*г. Блэксберг*

*Джеймс С. Торп*  
*г. Итака*  
*1988 год*

## Предисловие ко второму изданию

Первая редакция этой книги была издана в 1988 году. За два прошедших десятилетия мы стали свидетелями широкого распространения компьютерных реле по всему миру. Во многих странах компьютерные реле являются фактически стандартом для устройств релейной защиты, и найти электромеханическое или электронное реле с сопоставимыми возможностями крайне сложно. В том, что это сделалось возможным, сыграла важную роль очевидная экономическая рентабельность производства реле нового поколения, а улучшение характеристик, возможность самопроверки и дистанционный доступ к настройкам реле с использованием линий связи стали основными особенностями этой технологии, которые привели к столь широкомасштабному ее принятию.

Большинством проектировщиков реле было признано (и авторы этой книги придерживаются того же мнения), что принципы защиты, по существу, недалеко ушли от тех, которые были сформулированы в прошлом столетии. Компьютерные реле обеспечивают, в общем, те же возможности, что и традиционные реле, но делают это более эффективно. Вместе с тем общепризнанным фактом является то, что некоторые изменения в принципах защиты произошли исключительно в силу возможностей компьютеров и имеющихся средств связи. Таким образом, адаптивная релейная защита не могла быть реализована без этой новой технологии. Адаптивной релейной защите, наряду с такой новой областью, как мониторинг переходных режимов, которая возникла в рамках компьютерной релейной защиты, посвящена значительная часть настоящего издания нашей книги.

Обзор опубликованных научных работ по релейной защите показывает, что исследователи продолжают изучать применение новых аналитических методов в сфере релейной защиты. Мы включили в это издание описание нескольких таких методов, но следует подчеркнуть, что большинство из них пока еще не нашли воплощения на практике в проектах релейной защиты. Возможно, это подтверждает мнение авторов о том, что принципы исполнения защиты, по существу, диктуются физическими процессами в электроэнергетических системах, а методы проектирования систем защиты, разработанные в далеком прошлом, очень практичны и близки к оптимальным. Новые аналитические методы, которые являются объектом изучения, предлагают в лучшем случае лишь незначительные улучшения, и то, когда или в каких областях применения мы увидим явное преимущество этих новых методов, остается под вопросом.

Наша книга остается научно-исследовательской работой и справочником. По существу, проблема, обозначенная в конце каждой главы, часто является формулировкой темы для исследования. Некоторые задачи довольно сложны, и каждая из них оставляет место для индивидуальных интерпретаций

и разработок. Поэтому мы не предлагаем решения этих задач и оставляем их на откуп читателям. Конечно, мы заинтересованы в получении любых комментариев, которые пользователи нашей книги сочтут нужным предоставить.

Авторы с самого начала (2008 год) принимали участие в главном научно-исследовательском проекте «111» Университета электроэнергии Северного Китая под руководством профессора Ян Цисюня (Yang Qixun). Помимо поощрения исследований многих вопросов компьютерной релейной защиты, в которых авторы продолжают участвовать, материальная база, предоставленная в Пекине в рамках данного проекта, способствовала своевременному завершению настоящего второго издания нашей книги.

Мы по-прежнему получаем огромное удовольствие от работы в этой области и надеемся, что благодаря второму изданию данной книги сможем поделиться нашей радостью с читателем.

*Арун Г. Фадке*

*г. Блэксберг*

*Джеймс С. Торп*

*г. Блэксберг*

*2009 год*



## Список сокращений

|         |                                                                                  |         |                                                  |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------|---------|--------------------------------------------------|
| AEP     | Американская электроэнергетическая компания                                      | AEP     | American Electric Power Service Corporation      |
| AR      | Автоматическое повторное включение                                               | AR      | Auto Reclose                                     |
| ANSI    | Американский национальный институт стандартов                                    | ANSI    | American National Standards Institute            |
| BEAMA   | Британская ассоциация производителей электротехнического и смежного оборудования | BEAMA   | British Electrical and Allied Manufacturers      |
| EPRI    | Научно-исследовательский институт электроэнергетики                              | EPRI    | Electric Power Research Institute                |
| IEEE    | Институт инженеров по электротехнике и радиоэлектронике                          | IEEE    | Institute of Electronic and Electrical Engineers |
| MUX     | Мультиплексор                                                                    | MUX     | Multiplexer                                      |
| NAVSTAR | NAVSTAR не является аббревиатурой; это система GPS                               | NAVSTAR | NAVSTAR is not an acronym. It represents GPS     |
| RTU     | Дистанционная оконечная аппаратура                                               | RTU     | Remote Terminal Units                            |
| АЦ      | Аналого-цифровой                                                                 | A/D     | Analog to Digital                                |
| АЦП     | Аналого-цифровой преобразователь                                                 | ADC     | Analog to Digital Converter                      |
| ИНС     | Искусственная нейронная сеть                                                     | ANN     | Artificial Neural Network                        |
| ФСВ     | Флаг срабатывания (фиксируется отключение) выключателей                          | CBF     | Circuit-Breaker Failure Flag                     |
| СИГРЭ   | Международный совет по крупным электрическим системам                            | CIGRE   | International Council on Large Electric Systems  |
| ЕТН     | Емкостный трансформатор напряжения                                               | CVT     | Capacitive Voltage Transformer                   |
| ОДПФ    | Обратное дискретное преобразование Фурье                                         | IDFT    | Inverse Discrete Fourier Transform               |
| ЦАП     | Цифроаналоговый преобразователь                                                  | DAC     | Digital to Analog Converter                      |
| ДПФ     | Дискретное преобразование Фурье                                                  | DFT     | Discrete Fourier Transform                       |
| СВН     | Сверхвысокое напряжение                                                          | EHV     | Extra High Voltage                               |

|             |                                                                                    |       |                                                  |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------|--------------------------------------------------|
| ЭМП         | Электромагнитные помехи                                                            | EMI   | Electromagnetic Interference                     |
| СППЗУ       | Стираемое программируемое постоянное запоминающее устройство                       | EPROM | Erasable Programmable Read Only Memory           |
| БПФ         | Быстрое преобразование Фурье                                                       | FFT   | Fast Fourier Transform                           |
| GPS         | Система глобального позиционирования                                               | GPS   | Global Positioning System                        |
| Вх./вых.    | (Вход/выход)                                                                       | I/O   | Input Output                                     |
| МЭК         | Международная электротехническая комиссия                                          | IEC   | International Electrotechnical Commission        |
| ЛПП-система | Линейная система с постоянными параметрами                                         | LTI   | Linear Time Invariant System                     |
| MOV         | Металлооксидный варистор                                                           | MOV   | Metal Oxide Varistors                            |
| КВД         | Концентраторы векторных данных                                                     | PDC   | Phasor Data Concentrator                         |
| УСВИ        | Устройства синхронизированных векторных измерений                                  | PMU   | Phasor Measurement Unit                          |
| PROM        | Программируемое постоянное запоминающее устройство                                 | ППЗУ  | Programmable Read Only Memory                    |
| ОЗУ         | Оперативное запоминающее устройство                                                | RAM   | Random Access Memory                             |
| ПАА         | Противоаварийная автоматика                                                        | RAS   | Remedial Action Scheme                           |
| ПЗУ         | Постоянное запоминающее устройство                                                 | ROM   | Read Only Memory                                 |
| ВХ          | Выборка и хранение                                                                 | S/H   | Sample and Hold                                  |
| ДПФ         | Дискретное преобразование Фурье симметричных составляющих                          | SCDFT | Symmetrical Component Discrete Fourier Transform |
| ПДРЗСС      | Программа дистанционной релейной защиты с использованием симметричных составляющих | SCDR  | Component Distance Relaying Program              |
| СЗЦС        | Схема защиты целостности системы                                                   | SIPS  | System Integrity Protection Scheme               |
| ССЗ         | Схемы специальной защиты либо противоаварийная автоматика (ПАА)                    | SPS   | Special Protection Schemes                       |
| SWC         | Устойчивость к (импульсным) перенапряжениям                                        | SWC   | Surge Withstand Capability                       |

|         |                                                                        |         |                                                      |
|---------|------------------------------------------------------------------------|---------|------------------------------------------------------|
| TTL     | Сигнал транзисторной логики                                            | TTL     | Transistor to Transistor Logic                       |
| СМПР    | Системы мониторинга переходных режимов                                 | WAMS    | Wide Area Measurement System                         |
| WAMPACS | Комбинированная распределенная система управления, защиты и автоматики | WAMPACS | Wide Area Measurement, Protection and Control System |
| ВМНК    | Взвешенный метод наименьших квадратов                                  | WLS     | Weighted Least Squares                               |
| БАПВ    | Быстродействующее автоматическое повторное включение                   | HSR     | High Speed Reclose                                   |
| ВАР     | Управление путем переключения емкостей                                 | VAR     | Control through capacitor switching                  |
| БИХ     | Бесконечная импульсная характеристика                                  | FIR     | Finite Impulse Response                              |
| КИХ     | Конечная импульсная характеристика                                     | IIR     | Infinite Impulse Response                            |
| ВНК     | Методика взвешенных наименьших квадратов                               | WLS     | Weighted Least Squares                               |
| ТТ      | Трансформатор тока                                                     | CT      | Current Transformers                                 |
| ТН      | Трансформатор напряжения                                               | CVT     | Current and Voltage Transformer                      |
| ИИ      | Искусственный интеллект                                                |         |                                                      |
| КЗ      | Короткое замыкание                                                     |         |                                                      |
| ЛОС     | Линейный оценщик состояния                                             |         |                                                      |
| ЛЭП     | Линия электропередачи                                                  |         |                                                      |

# ГЛАВА I

## ВВЕДЕНИЕ В КОМПЬЮТЕРНУЮ РЕЛЕЙНУЮ ЗАЩИТУ

### I.1. Развитие компьютерной релейной защиты

Исследования в области компьютерной релейной защиты начались с попытки выяснить, может ли цифровая ЭВМ выполнять функции релейной защиты энергосистемы. Эти исследования начались в 1960-е годы, в тот период, когда цифровые ЭВМ медленно, но верно начали вытеснять многие традиционные инструменты анализа в электроэнергетике. Короткое замыкание, распределение мощности, устойчивость — основные проблемы, стоявшие перед проектировщиками энергосистем, и для их решения на смену расчетным столам постоянного тока и анализаторам цепей уже успели прийти компьютерные программы. Релейная защита казалась следующей перспективной и интересной областью для компьютеризации. С самого начала было понятно, что цифровые ЭВМ того времени не справились бы с выполнением высокоскоростных функций релейной защиты. В этом не было никакого смысла и с экономической точки зрения. ЭВМ были чрезмерно дороги. Однако перспективы разработки и изучения алгоритмов релейной защиты выглядели привлекательными для ряда исследователей. Исследования этой благодатной почвы были начаты, по сути, благодаря простому академическому любопытству. Эволюция компьютеров за прошедшие годы была настолько стремительной, что современные микрокомпьютеры<sup>1</sup> наконец стали достаточно дешевыми и быстрыми для реализации сложных алгоритмов релейной защиты. Поэтому в настоящее время компьютерная релейная защита является лучшим решением проблем защиты как с технической, так и с экономической точки зрения. Более того, во многих случаях это единственное приемлемое решение. Фактически мы видим начало новой эры, в которой компьютерная релейная защита стала привычным инструмен-

---

<sup>1</sup> Микропроцессоры. — *Прим. ред.*

том, влияющим на дальнейшее развитие эффективных средств мониторинга и управления энергосистемами в реальном времени.

В настоящей главе будет кратко рассмотрена история развития компьютерной релейной защиты. Затем будет описана архитектура типовой системы релейной защиты на базе компьютерных средств. Мы также укажем критически важные компоненты аппаратного обеспечения и обсудим их влияние на выполнение задач релейной защиты.

## 1.2. Исторические предпосылки

В одной из первых опубликованных работ по компьютерной релейной защите рассматривалась довольно странная идея о том, что защиту всего оборудования на подстанции должен осуществлять единственный компьютер [1]. Очевидно, что поводом к этому послужила дороговизна вычислительной техники в то время (60-е годы), и вряд ли можно было найти хоть одну причину, по которой могло бы оказаться экономически целесообразным использование нескольких компьютеров вместо традиционной системы релейной защиты при том, что вся она была как минимум на порядок дешевле, чем единственный компьютер. Кроме того, вычислительные мощности компьютеров того времени не позволяли выполнять высокоскоростные операции релейной защиты, а их энергопотребление оставалось слишком высоким. Несмотря на эти очевидные недостатки, отражавшие текущий уровень развития компьютерной техники, в упомянутой выше работе были подробно рассмотрены несколько особенностей алгоритмов защиты, что даже сегодня может стать хорошим введением в сложные современные практики релейной защиты для новичка.

Примерно в то же время было опубликовано еще несколько работ, что привело к созданию алгоритмов защиты высоковольтных линий электропередачи [2, 3]. Довольно скоро было признано, что особый интерес для специалистов представляет функция защиты линий электропередачи (в частности, дистанционная релейная защита) по причине ее широкого использования в энергосистемах, относительно высокой стоимости и функциональной сложности. Первые исследователи положили начало работе над алгоритмами дистанционной защиты, которая продолжается и в настоящее время. Эта работа привела к важным открытиям относительно физических процессов защиты и пределов, до которых их можно сместить. Вполне вероятно, что к настоящему времени большинство исследователей уже освоило реализацию дистанционной релейной защиты на компьютерах и дальнейшего прогресса в этой области следует ожидать от нового аппаратного обеспечения, которое будет использовано для реализации хорошо изученных алгоритмов дистанционной релейной защиты.

В последние годы был предложен принципиально новый подход к дистанционной релейной защите [4, 5]. Он основан на использовании порождаемых коротким замыканием (КЗ) бегущих волн для определения расстояния до места повреждения. Релейная защита на волновом принципе требует достаточно высоких частот дискретизации входных сигналов напряжения и тока. Хотя системы релейной защиты на волновом принципе и не дают убедительных преимуществ перед другими принципами защиты ни по скорости, ни по точности срабатывания, тем не менее несколько таких систем работают в разных частях света и показывают вполне удовлетворительный результат. Данная технология будет подробнее рассмотрена в главе 9; в настоящее время она достаточно редко используется в системах релейной защиты. Алгоритмы поиска места аварии по бегущим волнам также были разработаны, и сообщается о положительном опыте использования таких устройств. Это также будет подробнее рассмотрено в главе 9.

Наряду с разработкой алгоритмов дистанционной релейной защиты была начата аналогичная работа с использованием принципа дифференциальной защиты [6–8]. Эти ранние работы указывают на тот факт, что, по сравнению с задачей релейной защиты линий электропередачи, дифференциальные алгоритмы защиты гораздо менее требовательны к вычислительным мощностям. Требование ограничения гармоник несколько усложняет проблему защиты трансформаторов, а для вопросов насыщения трансформатора тока и других погрешностей так и не найдено простое решение ни в компьютерных системах защиты, ни в традиционных релейных системах. Тем не менее развитие алгоритмов дистанционной и дифференциальной релейной защиты позволяет говорить, что уже в начале 70-х компьютерные системы релейной защиты могли работать как минимум не хуже традиционных систем.

С тех пор имел место значительный прогресс аппаратной части вычислительных систем. Размеры, энергопотребление и стоимость компьютеров снизились на порядки, в то время как скорость вычислений выросла на несколько порядков. Появление микропроцессоров с разрядностью 16 бит (а позднее и 32 бита) и построенных на их базе компьютеров сделало высокоскоростную компьютерную релейную защиту технически возможной, и в то же время стоимость систем защиты на базе компьютеров стала сравнимой со стоимостью традиционных систем. Эта тенденция продолжается в настоящее время и обязательно сохранится и в будущем, хотя, возможно, и не столь стремительными темпами. На самом деле сегодня уже ясно, что самые экономически эффективные и технически продвинутые системы релейной защиты будущего должны быть основаны на цифровых ЭВМ, за исключением разве что самых дешевых и выполняющих самые ограниченные функции. Старая идея о сочетании нескольких функций защиты в одной аппаратной системе [1] также в некотором

роде переживает второе рождение в виде современных многофункциональных систем релейной защиты.

При наличии разумной перспективы появления доступных компьютерных систем, исполняющих одну функцию защиты, внимание вскоре обратилось к возможностям, которые открываются при интеграции компьютерных систем в сеть, охватывающую всю подстанцию (а возможно, и всю энергосистему в целом) с помощью высокоскоростных широкополосных линий связи. Ранние работы на данную тему выявили несколько преимуществ, которые дает способность систем релейной защиты обмениваться данными [9, 10]. Как будет показано в главах 8 и 9, интегрированные компьютерные системы для подстанций, которые работают с задачами релейной защиты, мониторинга и управления, открывают новые возможности совершенствования работы системы благодаря способности отдельных устройств передавать и получать критически важную информацию.

### **1.3. Ожидаемые преимущества компьютерной релейной защиты**

Представляется целесообразным обобщить преимущества компьютерной релейной защиты, а также некоторые особенности данной технологии, требующие новых эксплуатационных решений. Среди прочего компьютерные системы имеют следующие преимущества.

#### **1.3.1. Стоимость**

При прочих равных условиях именно стоимость системы релейной защиты является главным фактором при ее выборе. На ранних этапах развития компьютерной релейной защиты стоимость компьютерных систем в 10–20 раз превышала стоимость традиционных систем. С годами стоимость компьютеров неуклонно снижалась, а их вычислительная мощность (оцениваемая по времени выполнения команд и по длине слова) существенно возрастала. В то же самое время стоимость традиционных (аналоговых) систем релейной защиты неуклонно увеличивалась, в основном из-за некоторых конструктивных усовершенствований, но также и из-за общей инфляции и относительно низкого объема производства и продаж. По некоторым оценкам, для равной производительности стоимость самых сложных цифровых компьютерных систем релейной защиты (вместе со стоимостью программного обеспечения) должна быть примерно такой же, что и у традиционных систем. Разумеется, существуют некоторые традиционные системы релейной защиты, например максимальные токовые защиты, которые настолько дешевы, что на сегодняшний день вряд

ли возможна их замена на более дешевые компьютерные аналоги, если только они не являются частью многофункциональной системы. Однако для крупных систем защиты на базе компьютеров конкурентоспособная цена определенно является одним из важных факторов при выборе.

### 1.3.2. Самодиагностика и надежность

Компьютерную систему релейной защиты можно запрограммировать на постоянный мониторинг некоторых ее аппаратных и программных подсистем и на обнаружение возможных сбоев и неисправностей. Она может быть запрограммирована на вывод из действия, то есть на блокировку при обнаружении сбоя и отправку аварийного запроса на техническое обслуживание в диспетчерскую. Эта функция компьютерных систем является, пожалуй, самым весомым техническим аргументом в пользу компьютерной релейной защиты. Сбои в работе релейной защиты случаются довольно редко, особенно если принять во внимание огромное количество реле, применяемых в энергосистеме. С другой стороны, в большинстве случаев катастрофических отказов энергосистем причину эскалации событий можно отследить до ложного срабатывания реле. Иногда причиной становится неправильный выбор реле для конкретной задачи защиты, но в подавляющем большинстве случаев это происходит из-за неисправности самого реле, которая ведет к неправильному срабатыванию и к последующей аварии в энергосистеме [11]. Предполагается, что благодаря функции самодиагностики компьютерной системы релейной защиты неисправности компонентов будут обнаружены вскоре после их возникновения и устранены до того, как могло бы произойти ложное срабатывание. В этом смысле, хотя системы защиты на базе компьютеров и являются куда более сложными, чем системы на базе электромеханических или твердотельных реле (и поэтому теоретически должны чаще выходить из строя), вся система в целом имеет гораздо более высокий уровень доступности. Разумеется, система не может гарантированно обнаружить неисправности абсолютно всех компонентов, особенно тех, которые не относятся к периферии системы релейной защиты.

### 1.3.3. Системная интеграция и цифровая среда

Цифровые компьютеры и цифровые технологии стали основой большинства систем на подстанциях. Измерения, обмен данными, телеметрия и управление — все эти функции реализованы на компьютерах. Многие датчики электрических величин (трансформаторы тока и напряжения) сегодня находятся в процессе преобразования в цифровые системы. Волоконно-оптические линии, благодаря их нечувствительности к электромагнитным помехам (ЭМП), могут стать средой передачи сигнала из одной точки в другую в пределах подстанции; эта технология особенно подходит для создания цифровой среды.



Компьютерные системы релейной защиты естественным образом впишутся в подстанции будущего. Они могут принимать цифровые сигналы от новейших датчиков и волоконно-оптических каналов и интегрироваться с другими системами подстанции, предназначенными для управления и мониторинга и также построенными на базе компьютеров. По сути дела, без компьютерных систем релейной защиты использование на подстанции цифровых датчиков и волоконно-оптических линий связи не имеет особого смысла.

#### **1.3.4. Функциональная гибкость и адаптивная релейная защита**

Поскольку цифровой компьютер можно запрограммировать на выполнение любых функций, лишь бы он имел необходимые для этого входы и выходы, то достаточно просто заставить компьютер системы релейной защиты выполнять и многие другие задачи на подстанции. Например, измерение и мониторинг токов и напряжений в трансформаторах и линиях электропередачи, управление замыканием и размыканием выключателей и разъединителей, резервирование других коммутационных устройств — все эти функции может взять на себя компьютер релейной защиты. Функция релейной защиты требует интенсивных вычислений при возникновении сбоев в системе. Однако такие интенсивные вычисления по времени занимают очень незначительную часть срока службы компьютера релейной защиты — не более десятой доли процента. Поэтому компьютер релейной защиты практически без дополнительных затрат может выполнить перечисленные выше задачи.

Благодаря возможности программирования и передачи данных система релейной защиты на основе компьютера обладает еще одним потенциальным преимуществом, которое не так-то просто реализовать в традиционной системе защиты. Это возможность изменения уставок релейной защиты, если того требуют изменяющиеся условия работы защищаемого объекта. Этот аспект (адаптивная релейная защита) будет более подробно рассмотрен в главе 10.

Высокие ожидания относительно компьютерной релейной защиты, как правило, оправдываются в конкретных реализациях систем. Очевидно, что большинство преимуществ компьютерной релейной защиты обеспечивается способностью компьютеров к обмену данными с различными уровнями иерархии управления. Поэтому полный расцвет технологии компьютерной релейной защиты стал возможен только с появлением разветвленных сетей обмена данными, которые могут быть развернуты на крупной подстанции. В качестве среды передачи для них предпочтительно использовать волоконно-оптические линии связи, отличающиеся уникальной нечувствительностью к помехам и способностью передавать с высокой скоростью большие объемы данных. Такая сеть обмена данными может быть полезна в разных областях, и чем шире

будут распространены подобные линии связи, тем более востребованы будут вычислительные возможности микропроцессоров релейной защиты. Там, где нет разветвленных сетей обмена данными, не удастся полностью реализовать все преимущества компьютерной релейной защиты.

Необходимо упомянуть и другие проблемы, характерные для технологии компьютерной релейной защиты. Ранее уже было отмечено, что за последние двадцать лет компьютерная технология развивалась очень быстрыми темпами. Это означает, что компьютерное оборудование имеет относительно короткий срок службы. Каждые несколько лет аппаратная часть компьютеров претерпевает существенные изменения, и решающее значение приобретает вопрос ремонтпригодности старого оборудования. Существующие системы релейной защиты успешно функционировали в течение длительного времени — некоторые из них отработали 30 лет или даже больше. Эти системы релейной защиты обслуживались и ремонтировались в течение всего срока эксплуатации. Трудно представить себе подобный срок службы оборудования на базе компьютера. Решением может стать модульная архитектура компьютерного аппаратного обеспечения. Срок службы компьютеров и периферийных устройств, принадлежащих к одному семейству, будет больше при замене нескольких модулей раз в несколько лет. Если при этом не требуется существенная переработка системы релейной защиты, такой вариант может быть приемлемым компромиссом для продления срока службы оборудования. Однако последствия стремительных изменений аппаратного обеспечения компьютерных систем очевидны как для производителей, так и для пользователей данной технологии.

Программное обеспечение представляет собой отдельную проблему. Компьютерные программы релейной защиты (либо как минимум их критически важные функции) обычно пишутся на языках низкого уровня, например на ассемблере. Это делается для того, чтобы как можно эффективнее использовать доступное время после возникновения повреждения в системе. Программы релейной защиты, как правило, ограничены скоростью вычислений и быстрым действием ввода-вывода. Языки высокого уровня, как правило, недостаточно эффективны для приложений, требовательных к времени выполнения. Вполне возможно, что со временем, когда машинная команда будет выполняться еще быстрее, языки высокого уровня смогут заменить ассемблер в программировании компьютеров релейной защиты. Проблема программирования в машинных кодах состоит в непереносимости программ между компьютерами разных типов. Может присутствовать ограниченная переносимость между разными моделями компьютеров одного и того же семейства, но даже в таком случае предпочтительно разработать новое программное обеспечение, которое позволит в максимальной степени использовать возможности разных моделей. Поскольку стоимость программного обеспечения составляет очень существенную

часть разработки системы компьютерной релейной защиты, непереносимость программного обеспечения становится серьезной проблемой.

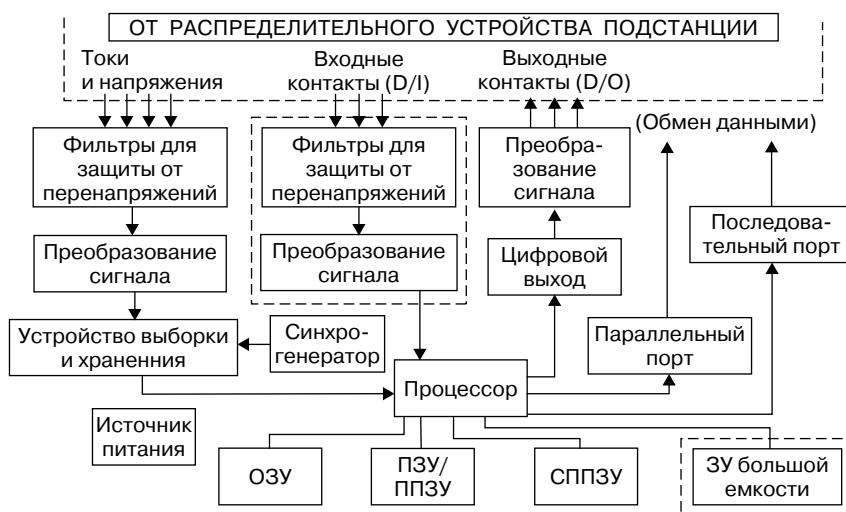
В ранний период разработки компьютерной релейной защиты существовали некоторые опасения относительно неблагоприятных условий на коммунальных электрических подстанциях, где предстояло работать оборудованию. Необходимо предусматривать защиту от высоких температур, влажности, загрязнения воздуха, а также от очень мощных ЭМП.

Другая проблема, о которой часто заявляют пользователи систем компьютерной релейной защиты, связана с широким кругом задач, которые могут выполнять используемые в них компьютеры. Абсолютное большинство компьютерных систем требует очень трудоемкой и сложной настройки перед установкой и вводом в эксплуатацию. Если организация — пользователь такой системы может позволить себе выделить достаточно сотрудников для работы с компьютерной системой релейной защиты, то сложность ее настройки не станет серьезной проблемой. Если же организация небольшая и выделять отдельный персонал для этого нецелесообразно, то правильная настройка системы и техническая поддержка на случай будущих модификаций становятся непростой задачей. Кроме того, если в одной и той же организации используется релейная защита от разных производителей, могут потребоваться специалисты, разбирающиеся в устройствах разных производителей. Несколько рабочих групп и технических комитетов Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (IEEE) предпринимали попытки разработки общего пользовательского интерфейса для систем релейной защиты разных производителей, однако задача оказалась слишком сложной и не удалось достичь сколь-нибудь существенного прогресса в данном направлении.

## 1.4. Архитектура компьютерной системы релейной защиты

Компьютерные системы релейной защиты состоят из подсистем с четко разграниченными функциями. Хотя конкретные системы релейной защиты могут отличаться в деталях, все же эти подсистемы скорее всего будут присутствовать в их архитектуре в той или иной форме. Подсистемы релейной защиты и их функции будут описаны ниже.

Блок-схема на рис. 1.1 показывает основные подсистемы компьютерной релейной защиты. Центральное место в ней занимает процессор. Он отвечает за выполнение программ релейной защиты, за поддержание различных функций распределения времени и за связь с периферийным оборудованием. На рис. 1.1 показаны различные типы памяти, каждый из них служит определенной цели.



**Рис. 1.1.** Подсистемы компьютерной релейной защиты. Пунктирная линия вверх соответствует границе открытого распределительного устройства. Все остальное оборудование располагается в диспетчерской

Оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) содержит дискретизированные входные данные по мере их поступления и обработки. Его также можно использовать в качестве буфера для данных, которые позднее будут перемещены для хранения на более постоянном носителе. Кроме того, ОЗУ используется для временного хранения результатов вычислений во время выполнения алгоритмов релейной защиты. Постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) или программируемое постоянное запоминающее устройство (ППЗУ) используется для постоянного хранения программ. Если чтение из ПЗУ происходит достаточно быстро, то программы могут выполняться непосредственно из ПЗУ. Если это не так, то на этапе инициализации программы из ПЗУ копируются в ОЗУ и их выполнение в реальном времени происходит из ОЗУ. Стираемое программируемое постоянное запоминающее устройство (СППЗУ) необходимо для хранения параметров (таких как уставки релейной защиты), которые время от времени можно менять, однако после установки их значения должны сохраняться даже в случае перебоев питания компьютера. Для этого подходит либо ЗУ на ферритовых сердечниках, либо ОЗУ с подпиткой от расположенной на плате батареи.

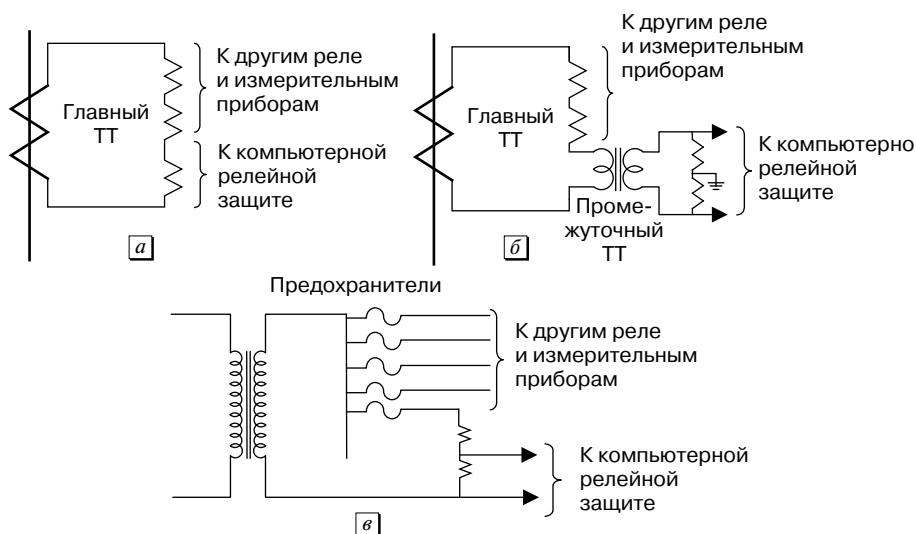
СППЗУ большой емкости может стать очень полезной особенностью компьютерной системы релейной защиты. Такую память можно использовать как среду для хранения архивных данных, таблиц данных о сбоях, журналов событий с метками времени, а также контрольных журналов сетевого обмена и изменений, внесенных в систему релейной защиты. Основным фактором здесь является стоимость такой памяти. На сегодняшний день стоимость памяти существенно снизилась, что сделало возможным архивное хранение большого

количества данных осциллографии и последовательностей событий релейной защиты.

Перейдем к рассмотрению системы аналоговых входов. Прежде всего следует отметить, что рис. 1.1 предполагает использование обычных преобразователей. Если используются цифровые ТТ и ТН, то входные каскады могут существенно отличаться, а данные скорее всего будут направляться непосредственно в память процессора. На вход системы релейной защиты подаются токи и напряжения, а также цифровые сигналы, указывающие на состояние контактов. Аналоговые сигналы необходимо преобразовать в сигналы напряжения, подходящие для преобразования в цифровую форму. Это делается с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Обычно на вход АЦП подаются значения в диапазоне  $\pm 10$  В. Сигналы тока и напряжения, поступающие со вторичных обмоток трансформаторов тока и напряжения, необходимо соответствующим образом отмасштабировать. Необходимо предусмотреть максимально высокий уровень сигнала и вычислить отношение среднеквадратичного значения сигнала к пиковому значению. В большинстве случаев не требуется учитывать высокочастотные переходные процессы, так как они удаляются сглаживающими фильтрами с низкой частотой среза. Исключением является релейная защита на волновом принципе, которая использует высокочастотные компоненты (бегущую волну). Для таких систем релейной защиты (более подробно они будут рассмотрены в главе 9) масштабирование сигналов должно производиться таким образом, чтобы весь входной сигнал с наибольшим обрабатываемым высокочастотным компонентом не превышал входной диапазон АЦП.

Токовые входные сигналы необходимо преобразовывать в напряжения, например, с помощью резистивных шунтов. Так как вторичные токи трансформатора тока в нормальных условиях могут составлять сотни ампер, для создания напряжений, подходящих для АЦП, необходимы шунты сопротивлением в несколько миллиом. Можно также использовать промежуточный трансформатор тока для уменьшения силы тока. Однако все погрешности промежуточного трансформатора тока будут вносить свой вклад в общую погрешность процесса преобразования, поэтому они должны быть как можно меньше. Промежуточный трансформатор тока выполняет и другую функцию: он обеспечивает развязку между вторичной обмоткой ТТ и входами компьютера. В этом случае шунт можно заземлить в средней точке, чтобы создать симметричный вход для следующих каскадов усиления и фильтрации. Эти соображения проиллюстрированы на рис. 1.2а и б.

На рис. 1.2в изображено подключение к трансформатору напряжения. Для каждого измерительного прибора и реле предусмотрена цепь с предохранителем, и точно такую же цепь можно предусмотреть для компьютерной релейной защиты. Нормальное значение напряжения на вторичной обмотке



**Рис. 1.2.** Масштабирование сигналов тока и напряжения для ввода в систему релейной защиты. (а) Прямое подключение к вторичной обмотке главного ТТ. (б) Использование промежуточного ТТ. (в) Трансформатор напряжения и делитель напряжения

трансформатора напряжения составляет 67 В, среднеквадратичных для подключения фаза — нейтраль. Его можно понизить до желаемого уровня резистивным делителем напряжения с номиналом, обеспечивающим соответствующий замер сопротивления для следующих каскадов фильтрации и усиления.

В этом случае можно использовать промежуточный трансформатор напряжения для дополнительной развязки, но это не является необходимостью. Цифровые входы компьютера релейной защиты обычно предназначены для получения информации о состоянии контактов других реле и подсистем внутри подстанции. Если другие подсистемы также построены на базе компьютера, то эти сигналы можно подавать на компьютер релейной защиты без дополнительной обработки. Исключением из этого правила может быть оптическая развязка между двумя системами. Если цифровые входные сигналы поступают от контактов аппаратов, расположенных в распределительном устройстве или в диспетчерской, то необходимо применять защиту от перенапряжений и/или оптическую развязку для защиты компьютера от жестких условий подстанции. Ниже будет рассмотрена защита от перенапряжений для аналоговых и цифровых сигналов.

Подавление всплесков от проводки, подключенной к любой системе защиты, — это отдельная тема, по которой имеется достаточно литературы [12, 13]. Всплески высокого напряжения и высокой энергии приносятся в проводку, соединяющую входы тока, напряжения и цифровые входы с системой защиты. Всплески происходят из-за повреждений и оперативных переключений в энергосистеме либо из-за некоторых видов операций переключения в диспетчерской.

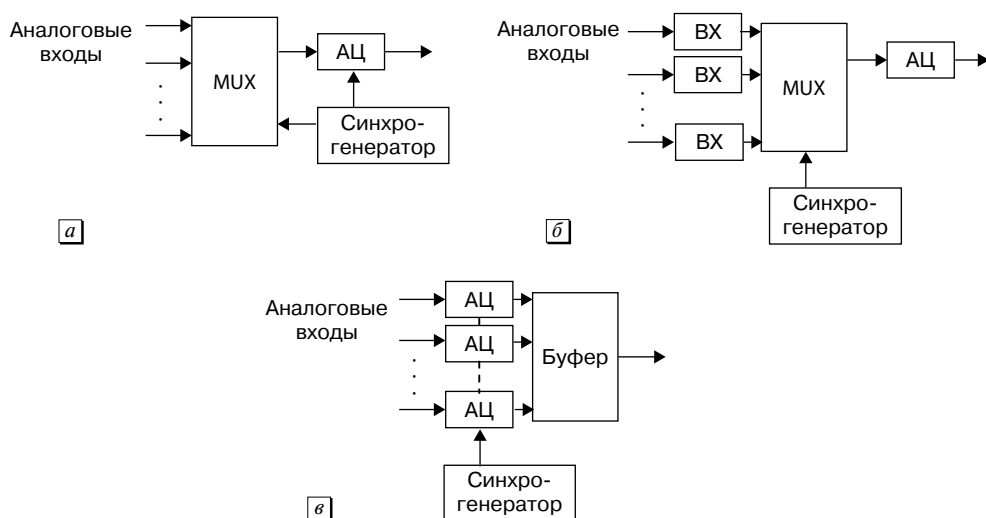
Например, оказалось, что искрящие контакты в индуктивных цепях защиты и контурах управления в диспетчерской вызывают очень серьезные возмущения в работе компьютерной защиты в энергосистеме [14] (более подробная информация приведена в главе 7). Для подавления таких всплесков необходимо очень тщательное заземление и экранирование измерительных цепей и оборудования, а также фильтрация нижних частот. Можно также использовать металлооксидные варисторы (МОВ). Фильтры для защиты от перенапряжений необходимо ставить на вводную и выводную проводку, а также на выводы для электропитания [12].

АЦП и сглаживающий фильтр, связанный с процессом дискретизации, будут подробнее рассмотрены в разделах 1.5 и 1.6. На данном этапе достаточно помнить об их роли в общем процессе функционирования релейной защиты. Сглаживающие фильтры представляют собой аналоговые фильтры нижних частот, разработанные специально для используемой частоты дискретизации. Моменты выборки определяются по синхрогенератору<sup>1</sup>, который должен выдавать импульсы с заданной частотой. Связь синхрогенератора и некоторых функций измерения, выполняемых процессором релейной защиты, обсуждается в главах 9 и 10. В настоящее время достаточно понимать, что в каждый момент, определяемый генератором, АЦП преобразует мгновенное значение аналогового входного сигнала (напряжения или тока) в цифровую форму и оно становится доступно процессору. Поскольку в общем случае для релейной защиты необходимо несколько входов, то для каждого отсчета производится несколько преобразований. Желательно (хотя и не обязательно), чтобы все отсчеты сигналов были одновременными, для чего либо преобразование и передача каждого отсчета процессору должны происходить очень быстро, либо все сигналы должны отбираться в один момент, а затем сохраняться для обработки в относительно медленном цикле преобразования-передачи для каждого отсчета. Это характерно для мультиплексных систем аналогового ввода. Третий вариант, технически возможный, но дорогостоящий, — это использование отдельных АЦП для каждого канала ввода. Тенденции развития АЦП и снижения их стоимости, как представляется, указывают на то, что вскоре предпочтительным вариантом станет использование отдельного АЦП для каждого сигнала. Все эти варианты изображены на рис. 1.3.

Полезно будет немного подробнее рассмотреть эту потребность в одновременности. Большинству функций релейной защиты требуются одновременно измеренные значения двух и более фазных векторов.

Как будет показано в главах 3 и 8, точка отсчета для этих векторов определяется моментом выборки, в который был получен отсчет. Таким образом, если комплексные амплитуды для сигналов  $x(t)$  и  $y(t)$  рассчитываются по их отсчетам,

<sup>1</sup> Генератору тактовых импульсов. — Прим. ред.



**Рис. 1.3.** Организация процесса дискретизации нескольких сигналов. (а) Единый АЦП с мультиплексным вводом. (б) Схема выборки и хранения. (в) Отдельные АЦП для каждого канала

начинающимся в моменты выборки  $t_x$  и  $t_y$ , то разность фаз двух векторов будет равна углу  $\theta$ ,

$$\theta = (t_x - t_y) \frac{2\pi}{T} \text{ радиан,}$$

где  $T$  — период основной гармоники сигнала. Если известна разность между  $t_x$  и  $t_y$ , то известен и фазовый угол между двумя векторами и их всегда можно привести к общей точке отсчета путем компенсации угла  $\theta$ . Таким образом, оказывается, что не требуется одновременно получать отсчеты разных входных сигналов, если разность между моментами выборки известна и можно ввести соответствующую компенсацию. С другой стороны, все расчеты сильно упрощаются, если угол  $\theta$  равен нулю и компенсация не требуется. Кроме того, в таком случае отсчеты разных сигналов можно объединять напрямую, как в случае с приложениями дифференциальной релейной защиты, в которых все отсчеты входных токов от различных сигналов можно складывать напрямую для создания отсчетов дифференциального тока. Для того чтобы можно было напрямую объединять отсчеты, важно, чтобы они были взяты одновременно, и это требование вкупе с относительной легкостью его выполнения привело к появлению общей практики одновременного взятия отсчетов всех входных сигналов каждым процессором релейной защиты. Имеются определенные преимущества, которые можно получить путем согласованной выборки всех значений в пределах подстанции, а также на всех подстанциях в пределах одной системы. Синхронизация в пределах всей системы будет рассмотрена в главах 8, 9 и 10.



Рассмотрим схему выборки, показанную на рис. 1.3а. При отсутствии схем выборки и хранения разные отсчеты сигналов будут получены последовательно и не могут считаться действительно одновременными. Один период волны 60 Гц составляет 16,67 миллисекунд. Это соответствует примерно 21,6 градуса на миллисекунду. Таким образом, если все отсчеты будут получены примерно за 10 микросекунд, то самая значительная ошибка из-за последовательной выборки составит примерно 0,2 градуса — для любого приложения релейной защиты эта ошибка пренебрежимо мала. На самом деле допускается длительность периода сканирования до 50 микросекунд. Допуск 10–50 микросекунд может служить хорошим критерием одновременности получения нескольких отсчетов.

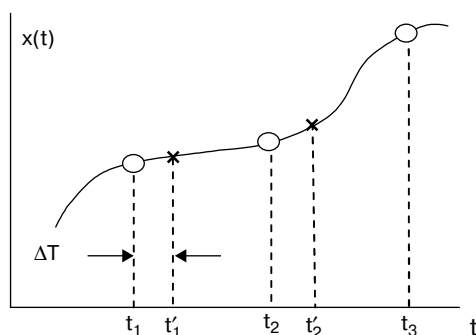
Следует отметить, что если одновременная выборка невозможна, но, тем не менее, необходима для приложения релейной защиты, то можно получить примерно одновременные отсчеты из неодновременных выборок. Предположим, что отсчеты  $x_k = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  получены в моменты  $t_k = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ , а требуются отсчеты в моменты  $t'_k = t_k + \Delta T$ . Если предположить, что  $x(t)$  имеет достаточное ограничение по полосе частот, то  $x'_k$  можно получить с помощью формул интерполяции. Проще всего использовать линейную интерполяцию:

$$x'_k = x_k + (x_{k+1} - x_k) \frac{\Delta T}{t_{k+1} - t_k},$$

где  $k = 1, 2, \dots, n - 1$  показаны на рис. 1.4. Для получения  $x'_k$  из  $x_k$  можно также использовать функции полиномов и сплайнов более высокого порядка. Подробнее об этом можно прочесть в любом учебнике по численным методам [15]. Однако необходимо помнить, что в контексте приложений релейной защиты любая формула, кроме простейшей линейной интерполяции, потребовала бы слишком долгих вычислений в реальном времени.

На рис. 1.1 цифровые выходы компьютера используются для управления релейными выходами в виде размыкания и замыкания контактов. Параллельный выходной порт процессора выдает для этих выходов одно слово (чаще всего два байта). Каждый бит можно использовать для управления одним контактом. Бит на выходе компьютера представляет собой уровневый сигнал транзистор-транзисторной логики (TTL) и должен быть направлен на оптическую развязку, а затем на высокоскоростное многоконтактное реле либо на тиристоры, которые, в свою очередь, могут использоваться для приведения в действие внешних устройств аварийной сигнализации, соленоидов отключения выключателей, устройств связи по линиям электропередачи и пр.

И наконец, источник питания чаще всего представляет собой преобразователь с одним входом и несколькими выходами постоянного тока, питающийся от батареи подстанции. На вход обычно подается постоянный ток напряжением



**Рис. 1.4.** Использование интерполяции для синхронизации отсчетов. Фактически полученные отсчеты обозначаются знаками «o», а те, которые требуется определить, — знаками «x»

125 В, а на выходе может быть 5 В и  $\pm 15$  В постоянного тока. Обычно для питания логических схем требуется 5 В, а 15 В необходимы для аналоговых схем. Разумеется, сама батарея подстанции непрерывно подзаряжается от сети переменного тока системы собственных нужд подстанции.

## 1.5. Аналого-цифровые преобразователи

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) преобразует уровень аналогового напряжения в его цифровое представление. Основной характеристикой АЦП является его длина слова, выраженная в битах. В конечном итоге это определяет способность АЦП представлять аналоговый сигнал в достаточно детальном цифровом виде. Рассмотрим АЦП с длиной слова 12 бит: такая длина, наряду с 16-битовым<sup>1</sup> преобразователем, чаще всего встречается у АЦП, доступных сегодня на рынке. При использовании двоичной системы счисления двоичное число 0111 1111 1111 (7FF в шестнадцатеричном представлении) представляет самое большое положительное число, которое может выдать 12-битовый АЦП, а 1000 0000 0000 (800 в шестнадцатеричном представлении) представляет самое малое (отрицательное) число. В десятичном представлении шестнадцатеричное 7FF равно  $(2^{11} - 1) = 2047$ , а шестнадцатеричное 800 равно  $-2^{11} = -2048$ . С учетом того что аналоговый сигнал может меняться в диапазоне  $\pm 10$  В, видим, что каждый бит 12-битного АЦП представляет 10/2048 В или 4,883 мВ. В табл. 1.1 показаны входные напряжения и их соответствующие преобразованные значения в двоичном и десятичном представлении для АЦП разрядностью 12 и 16 бит.

Изменение входного сигнала, которое приводит к изменению выходного представления на единицу (4,883 мВ для 12-битного аналого-цифрового

<sup>1</sup> Разрядным. — Прим. ред.

**Таблица 1.1.** Входные напряжения и выходные значения для 12- и 16-битных АЦП (максимальное входное напряжение считается равным 10 В)

| Входное напряжение, В | 12-битовый АЦП                  |                          | 16-битовый АЦП                  |                          |
|-----------------------|---------------------------------|--------------------------|---------------------------------|--------------------------|
|                       | Шестнадцатеричное представление | Десятичное представление | Шестнадцатеричное представление | Десятичное представление |
| 9,995                 | 7FF                             | 2047                     | 7FFF                            | 32767                    |
| 5,0                   | 400                             | 1024                     | 4000                            | 16384                    |
| 3,0                   | 266                             | 614                      | 2666                            | 9830                     |
| 2,0                   | 198                             | 408                      | 1999                            | 6553                     |
| 0,0                   | 000                             | 0                        | 0000                            | 0                        |
| -1,0                  | F33                             | -205                     | FCCB                            | -3277                    |
| -5,0                  | C00                             | -1024                    | BFFF                            | -16384                   |
| -10,0                 | 800                             | -2048                    | 8000                            | -32768                   |

преобразователя) является важным параметром АЦП. Этот параметр описывает неопределенность входного сигнала для данного цифрового представления. Таким образом, шестнадцатеричное число 001 может представлять любое входное напряжение в диапазоне от 2,442 до 7,352 мВ. Это ошибка квантования АЦП. В общем случае, если длина слова АЦП составляет  $N$  бит, а максимальное входное напряжение, подаваемое на АЦП, равняется  $V$ , то ошибку квантования  $q$  можно определить следующим образом:

$$q = \frac{V}{2 \cdot 2^{N-1}} = 2^{-N} V,$$

и в пересчете на самое большое входное напряжение  $V$  ошибка квантования на единицу составляет

$$\text{на единицу } q = 2^{-N},$$

откуда очевидно, что чем больше битов в слове преобразователя, тем меньше будет ошибка квантования.

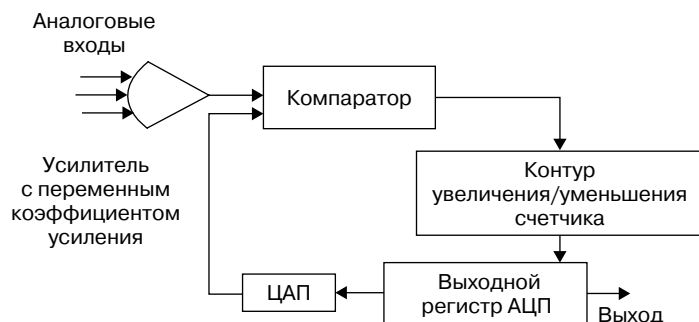
Помимо ошибки квантования, АЦП подвержены и другим ошибкам. Для того чтобы проще было понять источник этих ошибок, полезно будет рассмотреть принципы работы АЦП.

### 1.5.1. АЦП последовательного приближения

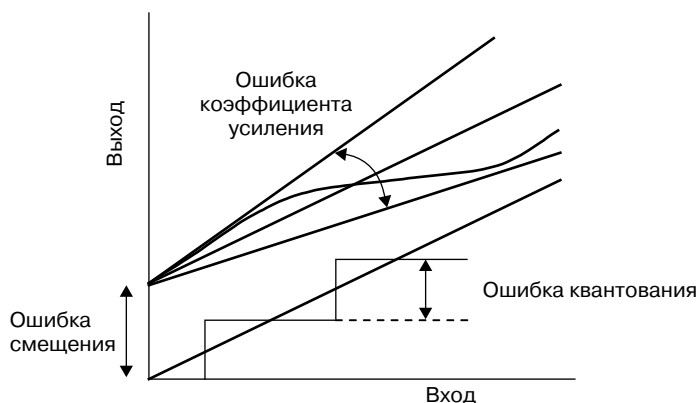
Одним из распространенных типов АЦП является АЦП последовательного приближения. Подробную информацию о данном типе АЦП и его конструкции можно найти в соответствующей литературе [16]. Аналоговый сигнал

проходит через усилитель с регулируемым коэффициентом усиления, как показано на рис. 1.5. Цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) преобразует число в выходном регистре АЦП в аналоговое значение. Этот сигнал сравнивается с аналоговым сигналом на входе, и разность используется для увеличения значения счетчика в выходном регистре АЦП. Если значение на выходе ЦАП попадает в пределы диапазона квантования аналогового входа, то выходное значение остается постоянным и считается преобразованным значением аналогового сигнала. Усилитель является источником дополнительной ошибки АЦП. Он может иметь ошибку смещения постоянного тока, а также ошибку коэффициента усиления. Кроме того, усиление может оказаться нелинейным.

Совокупное воздействие всех ошибок АЦП показано на рис. 1.6. Ошибка смещения приводит к сдвигу кривой входа/выхода, а ошибка коэффициента усиления изменяет ее крутизну. Нелинейность привносит область неопределенности



**Рис. 1.5.** АЦП последовательного приближения. Если на выходе компаратора положительное значение, то выходной регистр АЦП увеличивается, если отрицательное, то уменьшается. Если значение на выходе компаратора не превышает ошибку квантования, то это значение считается истинным



**Рис. 1.6.** Влияние ошибки коэффициента усиления, нелинейности коэффициента усиления и ошибки квантования на общую ошибку АЦП

в отношении вход/выход. Если ошибка коэффициента усиления и ошибка нелинейности ограничены двумя прямыми, как показано на рис. 1.6, то общая ошибка АЦП при заданном входном напряжении  $V$  определяется величиной  $\epsilon_v$ :

$$\epsilon_v = K_1 \cdot FS + K_2 \cdot V,$$

где  $FS$  — значение полного диапазона входного напряжения, а  $K_1$  и  $K_2$  — это постоянные коэффициенты, зависящие от фактических неопределенностей процесса преобразования.

Значения коэффициента усиления можно менять для разных отсчетов, хотя при частотах дискретизации, используемых в приложениях релейной защиты (порядка 1 кГц), динамическое изменение коэффициента усиления отбирало бы слишком много времени. Следовательно, приведенная выше модель ошибок достаточно репрезентативна для АЦП, используемых в релейной защите. Также должно быть ясно, что в том случае, когда входной сигнал составляет малую часть от значения полного диапазона, будет преобладать первая составляющая ошибки и ошибка для каждого отсчета, скорее всего, будет иметь одинаковый размер. С другой стороны, когда значение входного сигнала приближается к полному диапазону, может преобладать вторая составляющая и ошибка каждого отсчета может быть пропорциональна его номинальному значению.

Составляющая общей ошибки, вносимая ошибкой квантования, является случайной величиной, в то время как остальные составляющие — это детерминированные ошибки, зависящие от ошибок коэффициента усиления, смещения и нелинейности в каждый конкретный момент. Если мы рассмотрим совокупность всех условий, при которых должна работать релейная защита, все это тоже можно считать случайными величинами. В таком случае приведенную выше модель ошибки  $\epsilon_v$  следует понимать как представление среднеквадратичного отклонения  $\sigma_v$  случайных помех при измерениях. Такие модели ошибок будут рассмотрены в главе 3.

### 1.5.2. Дельта-сигма-АЦП

В последние годы предпочтительным вариантом стали аналого-цифровые преобразователи дельта-сигма [17]. В этих преобразователях используется 1-битный аналого-цифровой преобразователь, благодаря чему обработка аналоговых сигналов делается простой и недорогой. Используется очень высокая частота дискретизации (избыточная выборка) и цифровая обработка сигнала для сглаживающей и прореживающей цифровой фильтрации. Цифровая схемотика таких АЦП более сложна, но относительно недорога в производстве.

Блок-схема типового дельта-сигма-АЦП показана на рис. 1.7а. Сигнал  $x_1$  получается вычитанием из входного сигнала  $x$  выхода однобитного АЦП ( $y$ ), преобразованного в аналоговую форму однобитным цифроаналоговым