

## Глава 8

### Математическая модель релейной защиты и противоаварийной автоматики

#### § 8.1. Структура модели

Модель релейной защиты и автоматики (РЗА) энергосистемы в программе расчета электромеханических переходных процессов должна обеспечить:

- конструирование устройств РЗА с произвольными наборами измеряемых режимных параметров и контролируемых состояний объектов энергосистемы;
- моделирование алгоритмов работы аналоговых и цифровых устройств РЗА;
- взаимодействие различных устройств РЗА;
- удобный и быстрый ввод данных и настройку устройств РЗА с минимальным использованием клавиатуры, автоматизированный ввод данных для стандартных устройств автоматики, копирование и передачу устройств РЗА между схемами.

Релейная защита и автоматика энергосистем по своей сути является системой автоматического регулирования направленного действия, рис. 8.1. Стрелки показывают направление потоков информации и действий.

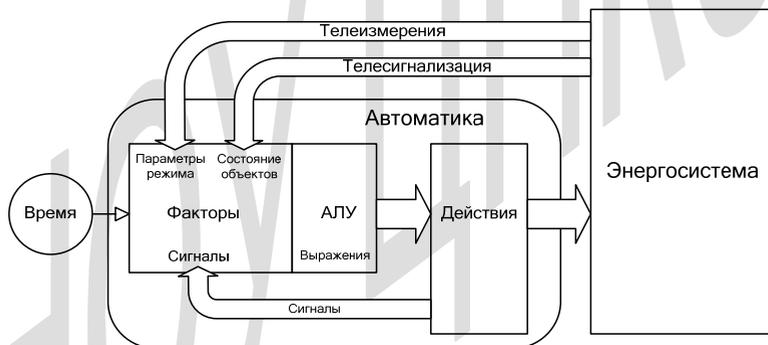


Рис. 8.1. Система автоматического регулирования энергосистемы

Объектно-ориентированная модель РЗА должна отображать ее структуру, направленность информационных потоков и потоков управления. При описании модели РЗА для краткости используется ряд терминов, имеющих следующий смысл:

- Автоматика – математическая модель РЗА энергосистемы, набор автоматов, связанных между собой сигналами.
- Автомат – алгоритмическая модель устройства РЗА или его части или нескольких устройств. Получает факторы, обрабатывает их в АЛУ и активирует действия.
- Фактор – время, выдержка времени, параметр режима, состояние объекта энергосистемы, сигнал или фактор запуска.
- Фактор запуска – фактор, вырабатываемый релейным или микропроцессорным устройством, имеющим встроенный алгоритм обработки телеизмерений (ТИ) и телесигнализаций (ТС).
- АЛУ – алгоритмическое устройство, вычисляет алгебраические и логические выражения.
- Условие срабатывания – логическое выражение АЛУ для активации одного или нескольких действий.
- Действие – управляющее воздействие на один или несколько объектов энергосистемы или сигнал.
- Сигнал – действие по изменению значения и/или состояния связанного с действием-сигналом фактора-сигнала.

Информационные потоки, обрабатываемые автоматикой, и потоки автоматического управления энергосистемой структурируются по автоматам, рис. 8.2.

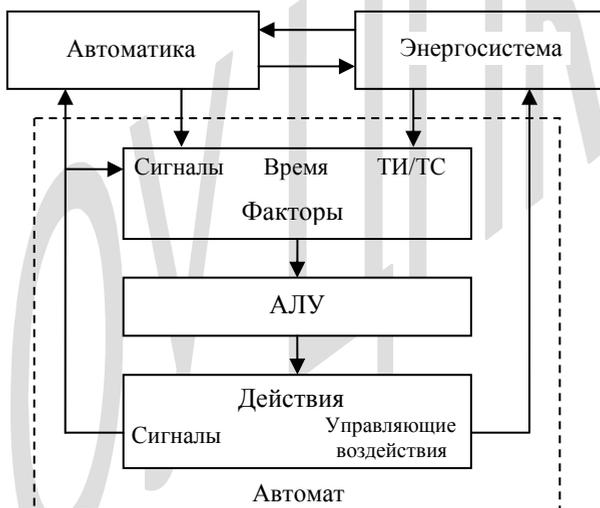


Рис. 8.2. Блок-схема автомата

Автомат связан с объектами энергосистемы каналами телеизмерений (ТИ), телесигнализаций (ТС) и управляющих воздействий. Действия-сигналы автомата связаны с его факторами-сигналами, а также с факторами-сигналами других автоматов.

## § 8.2. Алгоритмическое устройство

Совершенство автомата с точки зрения предоставляемых возможностей моделирования алгоритмов работы устройств РЗА определяет АЛУ. Чтобы удовлетворить требования, предъявляемые к модели РЗА, минимальная реализация АЛУ должна обеспечить:

- операции над действительными числами:  
*унарный +, унарный -, +, -, \*, /, %;*
- математические функции: *abs, sqrt, x<sup>y</sup>, sin, cos, tg, ctg, arcsin, arcos, arctg, arcctg, exp, lg, ln, sh, ch, th, ctg;*
- логические операции: *и - &&, или - ||, не - !;*
- операции сравнения:  
*равно ==, не равно !=,  
больше >, больше или равно >=,  
меньше <, меньше или равно <=;*
- константы: *число e - e, число π - pi;*
- логические константы: *истина - 1 (true), ложь - 0 (false);*
- скобки *(, ), [, ];*
- отсчет выдержек времени.

Минимальную реализацию АЛУ можно сравнительно просто осуществить встроенными средствами используемого языка программирования, обозначение операций и функций взято из языка программирования C++. Дополнительно потребуются создать синтаксический и лексический анализатор выражений АЛУ.

Автомат с таким АЛУ позволяет моделировать устройства РЗА, обрабатывающие информацию в виде целых и действительных чисел. Анализ условий срабатывания на комплексной плоскости тоже возможен, но в виде отдельных операций над вещественной и мнимой частями комплексов. Громоздкие алгоритмы сложных устройств РЗА, выполняющих анализ факторов на комплексной плоскости, требуют большого количества выражений АЛУ, что затрудняет построение и анализ алгоритма работы автомата. Реализация в АЛУ операций над комплексными числами резко усложняет практическую реализацию самого автомата. Поэтому для реле и устройств РЗА, обрабатывающих комплексные числа, или программируемых микропроцессорных уст-

роЙств, предусматриваются специальные факторы запуска, имеющие встроенные алгоритмы обработки (теле)измерений и (теле)сигналов.

Фактор запуска имеет входные настроечные параметры и привязывается к объекту энергосистемы. В ходе расчета переходного процесса фактор запуска получает параметры режима и/или состояния контролируемого объекта, выполняет свой алгоритм и возвращает численное и/или логическое значение, полученное в результате работы алгоритма. Такой фактор запуска включается в набор факторов автоматики. В частности, в виде факторов запуска целесообразно реализовать реле сопротивления и реле мощности с громоздкими алгоритмами определения условий срабатывания.

### § 8.3. Факторы и действия

Изложенная концепция построения автомата предполагает, что набор факторов является predeterminedным.

В табл. 8.1 представлен минимальный predeterminedный набор факторов, который необходим для моделирования устройств РЗА энергосистем.

По мере появления новых устройств РЗА со сложными алгоритмами обработки информации, которые затруднительно или невозможно реализовать посредством АЛУ, к набору факторов добавляются новые факторы срабатывания. Поэтому практическая реализация набора факторов в программе должна обеспечить расширение этого набора без изменения кода уже реализованных факторов.

Факторы привязываются к одному или нескольким объектам энергосистемы. Если объект имеет сложную структуру, например, узел с генерацией, нагрузкой и шунтом, фактор может быть привязан к элементу объекта. Факторы для приема сигналов связываются с действиями-сигналами автоматов.

Действия подразделяются на управляющие воздействия на объекты энергосистемы и сигналы, которые изменяют состояние и значение факторов-сигналов. Сигналы обеспечивают логическую взаимосвязь и последовательность выполнения действий одного автомата, а также взаимодействие различных автоматов.

Набор действий тоже является predeterminedным, табл. 8.2. Практическая реализация набора действий в программе должна обеспечить расширение этого набора без изменения кода уже реализованных управляющих воздействий и сигналов.

Таблица 8.1

## Набор факторов автоматики

Фактор	Параметры	Объект/элемент	Особенности реализации в программе
1	2	3	4
Модуль напряжения	нет	узел	Линейное напряжение в одном узле. Среди объектов больше одного узла выбрать нельзя.
Угол напряжения	нет	узел	Угол отсчитывается относительно вектора напряжения в базисном узле. Среди объектов больше одного узла выбрать нельзя.
Частота напряжения	нет	узел	Частота в генераторных узлах равна мгновенной частоте вращения генератора. Частота в остальных узлах определяется численным дифференцированием угла напряжения по времени. Больше одного узла выбрать среди объектов нельзя.
Модуль тока ветви	начало/ конец ветви	ветви	Если среди объектов выбраны несколько ветвей, производится суммирование комплексов токов этих ветвей, затем определяется модуль суммарного комплекса тока.
Активная мощность ветви	начало/ конец ветви	ветви	Если среди объектов заданы несколько ветвей, производится алгебраическое суммирование активных мощностей для начала или конца всех ветвей. Активный переток ветви имеет знак: если из узла в ветвь, $P < 0$ , если из ветви в узел, то $P > 0$ , § 1.2.
Реактивная мощность ветви	начало/ конец ветви	ветви	Если среди объектов выбраны несколько ветвей, производится алгебраическое суммирование реактивных мощностей для выбранного начала или конца ветвей.
Модуль полного сопротивления ветви	начало/ конец ветви	ветви	Если среди объектов выбраны несколько ветвей, производится суммирование комплексов токов ветвей (подразумевается, что вершины ветвей в месте замера сопротивления включены в один и тот же узел), затем определяется комплекс полного сопротивления делением комплекса напряжения в узле на комплекс суммарного тока и определяется его модуль.

Таблица 8.1(продолжение)

1	2	3	4
Аргумент полного сопротивления ветви	начало/ конец ветви	ветви	Если среди объектов выбраны несколько ветвей, производится суммирование комплексов токов ветвей (подразумевается, что вершины ветвей в месте замера сопротивления включены в один и тот же узел), затем определяется комплекс сопротивления делением комплекса напряжения в узле на комплекс суммарного тока и определяется его аргумент.
Напряжение на ветви $U = \text{abs}(\dot{U}_n - \dot{U}_k)$	нет	ветвь	Если среди объектов выбраны несколько ветвей, замер делается для первой ветви в списке объектов, остальные объекты игнорируются. Модуль линейного напряжения определяется и для включенных, и для отключенных ветвей (выключателей).
Угол на ветви $\arg(\dot{U}_n) - \arg(\dot{U}_k)$	нет	ветвь	Если среди объектов выбраны несколько ветвей, измерение угла производится для первой ветви в списке объектов, остальные объекты игнорируются. Угол определяется и для включенных, и для отключенных ветвей (выключателей).
Отключение ветви	начало/ конец ветви	ветви	Принимает значение 1, если ветвь отключена от узла. Если среди объектов заданы несколько ветвей, то фактор имеет истинное значение 1, если все ветви, включенные в список объектов, отключены в одном и том же выбранном начале/конце ветви, иначе фактор имеет ложное значение 0.
Направление мощности	начало/ конец ветви	ветви	Принимает значение 1, если переток активной мощности направлен из ветви в узел. Если переток направлен из узла в ветвь, принимает значение 0. Если среди объектов заданы несколько ветвей, фактор принимает значение 1, если для всех ветвей направление перетока из ветви в узел, иначе – 0.

Таблица 8.1(окончание)

1	2	3	4
Реле сопротивления	$Z$ , $\varphi_{мч}$ , квадрант, смещение, коэффициент эллипсоидности	ветви, узел/ генератор	Если выбрана не одна, а несколько ветвей, то суммируются комплексы токов этих ветвей (подразумевается, что вершины ветвей в месте установки реле сопротивления включены в один и тот же узел). Комплекс сопротивления вычисляется делением комплекса фазного напряжения на сумму комплексов токов и производится анализ условий срабатывания реле на комплексной плоскости.
Реле мощности	$S$ , $\varphi_{мч}$	ветви	Если выбрана не одна, а несколько ветвей, то производится суммирование комплексов полных мощностей ветвей и затем анализ условий срабатывания реле на комплексной плоскости.
Параметры режима генератора	$P$ , $Q$ , $I$	узел/ генератор	В узле должен быть только один генератор. Эквивалентный генератор замещает только однотипные генераторы.
Сигнал	значение, готов/ блокирован	нет	Значение фактора-сигнала и его состояние (готов/блокирован) изменяет действие-сигнал данного автомата или других автоматов. Значение заблокированного сигнала можно изменить после или во время изменения его состояния.
Время	нет	нет	Отсчитывается от начала расчета переходного процесса.

Таблица 8.2

Набор действий автоматики

Действие	Параметры	Объект
Короткое замыкание в узле	параметры шунта к.з., шунт включить/отключить	узел
Короткое замыкание на линии	вид к.з., параметры шунта к.з., расстояние от начального узла линии	ветвь
Отключение к.з. на линии	нет	ветвь
Коммутация ветви в начальном/конечном узлах	начальный/конечный узел, включить/отключить	ветвь
Изменение параметров ветви	новые параметры ветви	ветвь
Синхронное включение ветви	допустимая разность частот, разность напряжений, угол между напряжениями	ветвь
Переключение РПН	анцапфа	ветвь
Коммутация генераторов в узле	включить/отключить, число коммутируемых генераторов	узел/генератор
Управление генерацией	изменение уставки АРС агрегата однократное и по программе, импульсная разгрузка турбины, изменение уставки АРВ генератора однократное и по программе, подача возбуждения, гашение поля, потеря возбуждения.	узел/генератор
Коммутация нагрузки	включить/отключить	узел/нагрузка
Управление нагрузкой <sup>(1)</sup>	включить/отключить, доля коммутируемой нагрузки	узел/нагрузка
Управление шунтом	включить/отключить, изменить проводимость	узел/шунт
Управление УШР	включить/отключить, форсировать	узел/УШР
Сигнал <sup>(2)</sup>	значение сигнала, операция над фактором-сигналом, новое состояние фактора-сигнала	автомат и фактор-сигнал
Сигнал–выдержка времени <sup>(3)</sup>	нет	автомат и фактор-сигнал

Примечания:

1. Мощность коммутируемой нагрузки определяется в % от заданного номинального значения активной мощности нагрузки в узле, без учета зависимости от частоты и напряжения в узле.

2. Действие-сигнал изменяет значение и/или состояние фактора-сигнала. К одному фактору-сигналу может быть привязано несколько действий-сигналов данного автомата и других автоматов.

3. Передает своему фактору-выдержке времени текущее значение выдержки времени из соответствующего выражения АЛУ. Сигнал передается постоянно, независимо от значения соответствующего логического выражения АЛУ. Как только логическое выражение АЛУ становится ложным, значение выдержки времени обнуляется.

Набор сигналов должен обеспечить моделирование блинкера, блокировки, ускорения, торможения работы релейных устройств, счетчиков, отсчет выдержек времени с обнулением отсчета, если условие запуска выдержки времени станет ложным, отсчет выдержек времени с сохранением отсчитанного времени и др.

Для действий-сигналов необходимо определить объект (фактор-сигнал данного или других автоматов), значение сигнала, операцию над текущим значением фактора-сигнала и задать новое состояние, в которое переводится фактор-сигнал действием-сигналом.

Действия-сигналы могут выполнять следующие операции над факторами-сигналами:

- нет операции – сохраняет старое значение фактора-сигнала, изменяется только его состояние;
- установка – фактор-сигнал получает новое значение;
- инкремент – значение фактора-сигнала алгебраически складывается со значением сигнала;
- декремент – из значения фактора-сигнала алгебраически вычитается значение сигнала;
- отсчет времени – фактору-сигналу передается значение отсчитываемой в АЛУ выдержки времени, если истинно логическое выражение АЛУ. Если логическое выражение станет ложным, передача прекращается, и значение выдержки времени в факторе-сигнале сохраняется до тех пор, пока логическое выражение АЛУ вновь не станет истинным и начнется новый отсчет времени (моделирование реле времени с памятью). Возможен сброс выдержки времени в ноль операцией сброса;
- значение АЛУ – фактору-сигналу передается текущее значение выражения АЛУ;
- импульс – выполняет пересылку значения в фактор-сигнал однократно, как только условие срабатывания станет истинным. После этого сигнал-импульс получает статус «выполнено» и далее не обрабатывается, независимо от значения условия срабатывания в АЛУ. В факторе-сигнале остается значение, установленное им-

пульсом, до тех пор, пока над этим фактором не будет произведена какая-либо новая операция другими сигналами;

- сброс – перевод фактора-сигнала в исходное состояние.

Фактор-сигнал может находиться в состоянии «готов» или «блокирован». Действие-сигнал может изменить текущее состояние, в котором находится фактор-сигнал, при помощи следующих операций над его состоянием:

- готов;
- блокирован;
- нет операции.

Обработка сигнала в зависимости от заданной операции изменения состояния сигнала подчиняется следующим правилам, табл. 8.3.

Таблица 8.3

Операция над состоянием	Выполнение действия-сигнала
Готов	Если фактор-сигнал находится в состоянии «блокирован», то он переводится в состояние «готов». Если фактор-сигнал находится в состоянии «готов», то его состояние сохраняется. Одновременно выполняется операция над значением фактора-сигнала, если она задана, независимо от текущего состояния фактора-сигнала.
Блокирован	Если фактор-сигнал находится в состоянии «готов», то он блокируется, если фактор-сигнал находится в состоянии «блокирован», то его состояние сохраняется. Одновременно выполняется операция над значением фактора-сигнала, если она задана, независимо от текущего состояния фактора-сигнала.
Нет операции	Сохраняется текущее состояние фактора-сигнала. Операция над значением фактора-сигнала выполняется только в том в случае, если фактор-сигнал находится в состоянии «готов».

Эти правила позволяют уменьшить количество сигналов внутри автомата и между автоматами.

#### § 8.4. Алгоритм обработки автоматов

Перед началом расчета выполняется установка автомата в исходное состояние. Автомат в исходном состоянии может быть выведен из работы (оперативный ток отключен). В процессе расчета ввод в работу

выведенного автомата действием другого автомата не допускается. Для организации взаимодействия автоматов используются сигналы.

Обработка автоматов производится за два прохода. При первом проходе формируется информация о состоянии и режиме контролируемых элементов схемы, вычисляются условия срабатывания при текущих значениях факторов. Если условие срабатывания истинно и имеется выдержка времени, производится отсчет выдержки времени. Выполняются действия-сигналы, изменяющие значение и состояние факторов-сигналов.

При втором проходе заново вычисляются условия срабатывания автоматов с изменившимися сигналами. Выполняются управляющие воздействия на энергосистему, если соответствующие условия срабатывания истинны и отсчитаны заданные выдержки времени. Проверяется адекватность действий, если они не могут быть выполнены, выдаются диагностические сообщения. Если воздействия приводят к изменению конфигурации схемы, то после выполнения действий всех автоматов один раз проводится топологический анализ схемы.

Такой алгоритм обеспечивает правильное взаимодействие автоматов независимо от последовательности их обработки. При этом возможна взаимоблокировка действий автомата или автоматов их сигналами. Автоматический контроль правильной последовательности взаимных блокировок при одновременном выполнении соответствующих условий срабатывания до проведения расчета переходного процесса невозможен, поэтому исключение взаимных блокировок возлагается на разработчика автомата.

### **§ 8.5. Коммутации в электрической схеме**

Коммутация элементов электрической схемы является основным управляющим воздействием на энергосистему, табл. 8.2. Включение и отключение элементов электрической схемы можно выполнить различными способами с учетом особенностей используемых моделей элементов схемы и алгоритмов расчета электрического режима. Излагаемые ниже соображения по реализации коммутаций элементов схемы в алгоритме и программе расчета электромеханических переходных процессов ориентированы на использование для расчета электрических режимов метода эквивалентных преобразований, § 2.3, но частично могут быть реализованы и при использовании других методов расчета.

Минимальная по размеру схема или ее часть состоит из одной ветви и двух узлов. Отключенный узел (от узла отключены все ветви)

схемой не является. Изолированный узел (этого узла нет среди вершин ветвей) схемой не является. Отключенные и изолированные узлы обрабатываются как узлы свертки схемы. Узел свертки является самодостаточным, позволяя свести баланс мощности, если в узле включены генерация и нагрузка. При отсутствии генерации напряжение в отключенном и изолированном узле равно нулю, мощность нагрузки также равна нулю.

При двусторонней коммутации ветви число узлов схемы не изменяется. При одностороннем отключении ветви в схеме появляется новый узел отключенного конца ветви, а при включении ветви этот узел исчезает. Поскольку коммутации выполняются во время расчета переходного процесса, необходимо, чтобы создание и удаление узлов отключенных с одной стороны ветвей происходило автоматически. Следовательно, и в расчетах установившихся режимов при отключении ветвей «вручную» создание и удаление узлов отключенных концов ветвей тоже должно происходить автоматически.

Созданные автоматически узлы отключенных концов ветвей обрабатываются, как и остальные узлы схемы, но функциональность этих узлов ограничена, поскольку они могут появляться и исчезать, время жизни этих узлов не определено. В частности, эти узлы нельзя назначить базисно-балансирующим узлом, в них нельзя «вручную» включить генерацию, нагрузку, шунт или УШР. Однако шунт или УШР могут быть перенесены из старого узла в узел отключенного конца ветви, если при отключении шунт или УШР остаются подключенными к ветви.

Коммутацию узлов любого типа (без генерации, нагрузки, шунтов и УШР или при их наличии в различных сочетаниях) можно выполнить, коммутируя ветви с одной стороны. При отключении узла отключаются с одной стороны все ветви, имеющие вершиной этот узел. При включении узла включаются с одной стороны все ветви, которые до отключения были включены в этот узел.

Коммутация генераторов за счет коммутации ветвей является частным случаем разделения схемы на части и сборки схемы из изолированно работающих частей. Если при коммутациях ветвей генераторный узел отделяется от схемы и хотя бы одна ветвь будет связана с этим узлом, то образуется часть схемы с одним генераторным узлом, который является узлом свертки. Если окажется, что все ветви отключены от коммутируемого узла, образуется отключенный узел. Если отключенный узел является генераторным, то в расчетах установившихся режимов этот генератор не участвует в балансировании режима. Баланс мощности в исходном режиме сводится для самого узла, который обра-

батьвается как узел свертки, а в переходном процессе поведение генерирующего агрегата определяется его АРВ и АРС.

Часто в узле включен эквивалентный генератор, замещающий несколько генераторов. Чтобы в расчетах переходных процессов иметь возможность коммутировать один из этих генераторов за счет коммутации ветвей, нужно генератор выделить из эквивалентного генератора, для чего в схему необходимо добавить минимально один узел и одну ветвь. Вместе с генератором в добавленный узел может быть перенесена и часть нагрузки. Отключение генератора осуществляется отключением ветви, одновременно выдаются команды на разгрузку/останов турбины и, если требуется, на гашение поля.

Коммутация генераторов схемы за счет коммутации ветвей отображает реальный процесс управления генераторами энергосистемы и обеспечивает единообразную обработку генераторов при коммутациях. Процессы деления энергосистемы, синхронизации ее частей и отключения, включения, синхронизации генераторов с сетью обрабатываются единообразно.

Если действиями автоматики нужно отключить часть генераторов, входящих в эквивалентный агрегат узла, то предварительное разделение эквивалентного агрегата на отдельные агрегаты, требующее добавления узлов и ветвей в схему, может показаться неудобным и может быть отнесено к недостаткам алгоритма и программы. Поэтому целесообразно в дополнение к основному способу коммутации генераторов через коммутацию ветвей предусмотреть также коммутацию генераторов в узле с эквивалентным генератором, замещающим несколько параллельно включенных генераторов (блоков), без коммутации ветвей.

В программах для расчетов установившихся режимов, использующих  $PQ$ - и  $PQ$ -модели генераторов, традиционно отключение части генераторов в узле имитируется изменением мощности генератора. Имитация отключения части генераторов в узле изменением мощности агрегата и уставки АРС является некорректной, если используется более точная  $PEq$ -модель генераторов и/или необходимо коммутировать генераторы в ходе расчета динамики, так как при изменении числа включенных генераторов изменяются параметры эквивалентного генератора. Пересчет параметров генератора несложно выполнить, если уравнения генератора записаны в относительных единицах при номинальных условиях, § 5.1, поскольку в относительных единицах индуктивные сопротивления одного из генераторов и эквивалентного генератора равны.

Для эквивалентного генератора задаются число параллельно включенных генераторов узла и параметры одного агрегата. При коммутациях генераторов в узле изменяется текущее число параллельно

включенных генераторов узла в пределах от нуля до максимального числа генераторов, имеющихся в узле, и пересчитываются параметры эквивалентного генератора, выраженные в именованных единицах, в зависимости от числа генераторов, оставшихся включенными.

Если при включении/отключении генераторов в узле текущее значение параллельно включенных генераторов больше или равно 1, то пересчитываются  $S_n$ ,  $I_n$ ,  $Z_n$  эквивалентного генератора узла, которые используются для перевода источников тока, замещающих генераторы, из относительных единиц при номинальных условиях в именованные единицы при расчете мгновенного электрического режима схемы на шаге (подшаге) численного интегрирования, см. § 6.1, и для перевода параметров режима генератора в именованные единицы. Если текущее число включенных генераторов становится равным нулю, это означает полное отключение эквивалентного генератора с гашением поля.

При такой реализации коммутаций генераторов в узле текущая мощность эквивалентного агрегата будет изменяться пропорционально числу генераторов, поскольку уставка АРС для них одинакова, то есть генерация между ними распределяется равномерно. Для непропорционального изменения мощности одновременно с изменением числа генераторов в узле нужно действием автоматики изменить уставку АРС, либо использовать для коммутации выделенных генераторов коммутацию ветвей.

Следует подчеркнуть, что вышеизложенное подразумевает, что в эквивалентный агрегат объединены одинаковые генерирующие агрегаты. Для разнотипных генераторов, объединенных в один эквивалентный, такой подход к изменению параметров эквивалентного генератора не работает. В этом случае нужно знать и хранить параметры каждого генератора, входящего в эквивалентный агрегат, что не совместимо с форматом хранения данных узлов в унифицированном формате [6] и в других перспективных форматах, которые предусматривают наличие одного генератора в генераторном узле схемы. Кроме того, не существует надежной методики эквивалентирования разнотипных генерирующих агрегатов. Поэтому обработка разнотипных генераторов в эквивалентном генераторе узла или обработка нескольких генераторов, включенных в один и тот же узел схемы, не рациональна по соображениям совместимости форматов данных при обмене электрическими схемами с другими программами и отсутствия методики эквивалентирования разнотипных агрегатов.

Если в схеме есть узлы с эквивалентными генераторами, замещающими несколько генераторов различных типов и мощности, то эти узлы следует разделить на несколько узлов с эквивалентными генера-

торами, замещающими одинаковые генераторы, и хранить схему в таком виде. Это соглашение обеспечивает корректные значения параметров эквивалентных агрегатов в расчетах динамики. Если эквивалентный генератор замещает несколько одинаковых генераторов, его параметры в относительных единицах при номинальных условиях равны параметрам одного генератора, параметры АРВ и АРС в относительных единицах тоже одинаковы.

Генератор узла может быть отключен в исходном режиме, причем у эквивалентного агрегата считаются отключенными все параллельно включенные генераторы. Такой генератор не участвует в балансировании установившегося режима. В ходе расчета переходного процесса действием автоматики может быть выдана команда на включение генератора, отключенного в исходном режиме. Поэтому нужно определить возможные варианты поведения такого агрегата при включении в сеть и предусмотреть реализацию нужного поведения в алгоритме и программе.

**Вариант 1.** Если ротор агрегата стоит, то при включении генератора в сеть возможно моделирование пуска генератора от сети, например, прямой пуск агрегатов ГАЭС в насосный режим от сети без токоограничивающих устройств. От моделирования процессов пуска генераторов при включении генератора узла следует отказаться, поскольку для расчета таких процессов есть модель синхронного двигателя, обеспечивающая воспроизведение пусковых характеристик.

**Вариант 2.** Моделирование процесса самосинхронизации. Для воспроизведения процессов самосинхронизации достаточно задать начальное значение скольжения нулевым, над- или подсинхронным, и при включении генератора в сеть одновременно подать возбуждение.

**Вариант 3.** Моделирование процесса точной синхронизации. Этот процесс удобнее моделировать, используя для коммутации генераторов коммутацию ветвей схемы, поскольку при этом автоматически балансируется исходный режим генератора с заданным начальным значением скольжения и определяются начальные условия.

На основании вышеизложенного можно заключить, что в расчетах динамики при включении генератора в узле, генерация в котором в исходном режиме была отключена, целесообразно воспроизводить только процесс самосинхронизации генератора. При коммутации генераторов за счет коммутации ветвей целесообразно моделировать только процесс точной синхронизации. Последующее изменение активной и реактивной мощности генератора осуществляется уже другими управляющими воздействиями автоматов на регуляторы скорости и возбуждения.

Комплексная нагрузка в узле может состоять из статической и/или динамической составляющих. Динамическая составляющая комплексной нагрузки состоит из эквивалентных асинхронного и/или синхронного двигателей, § 7.1. В управляющих воздействиях на энергосистему целесообразно реализовать три способа коммутации комплексной нагрузки:

1. Узлы с нагрузкой отключаются от схемы или подключаются к схеме посредством одно- или двусторонней коммутации ветвей.
2. Отключение нагрузки от узла и подключение нагрузки к узлу.
3. Частичная коммутация нагрузки в узле.

Первый способ является основным, позволяющим адекватно моделировать процессы пуска, группового и индивидуального выбега при перерывах питания и самозапуска двигателей комплексной нагрузки узлов. После каждой коммутации требуется проведение топологического анализа схемы. Математические модели двигателей, § 7.3 и 7.9, позволяющие рассчитывать электромеханические переходные процессы в многомашинных узлах нагрузки. Для этого узел необходимо развернуть в сеть питания нагрузки и применить индивидуальное моделирование мощных электродвигателей.

Если в исходном установившемся режиме в схеме или в отделившейся части схемы есть генераторы, то напряжения в узлах этой части схемы имеют рабочие значения, двигатели работают и для них формируются ненулевые начальные условия. Если в отделившейся части схемы нет генераторов, то напряжения в узлах этой части схемы равны нулю. При этом потребление статической нагрузки равно нулю, двигатели стоят, для двигательной составляющей комплексной нагрузки узлов формируются нулевые начальные условия. В отключенных узлах, образовавшихся при коммутации ветвей схемы, двигатели стоят, для них формируются нулевые начальные условия.

Если один или несколько узлов с работающей двигательной нагрузкой при коммутации ветвей схемы потеряли питание (оказались в части схемы без генераторов), моделируется процесс группового выбега с перераспределением запасенной кинетической энергии между выбегающими двигателями и между двигательной и статической нагрузкой. У синхронных двигателей при выпадении из синхронизма происходит автоматическое гашение поля возбуждения с последующим замыканием обмотки возбуждения на шунтирующее сопротивление. По мере затухания напряжения групповой выбег переходит в индивидуальный выбег.

При подаче питания (после коммутации ветвей часть схемы с двигателями соединяется со схемой или ее частью, в которой есть ге-

нераторы) воспроизводится процесс самозапуска, у синхронных двигателей работает автоматическая ресинхронизация, при достижении входного скольжения и/или по спаду тока статора подается возбуждение. Если двигатель в исходном режиме не работал (подключен к узлу, принадлежащему части схемы без генераторов, или к отключенному узлу), после получения питания воспроизводится процесс пуска двигателя. У синхронных двигателей в конце пуска происходит автоматическая синхронизация.

Второй способ позволяет всю комплексную нагрузку узла отключать от узла или подключать ее к узлу без изменения конфигурации схемы, поэтому после коммутации проводить топологический анализ схемы не требуется. Если в исходном режиме комплексная нагрузка в узле отключена, а в составе нагрузки есть асинхронный и/или синхронный (эквивалентные) двигатели, для них при переходе к расчетам динамики формируются нулевые начальные условия. В динамике после включения нагрузки происходит процесс пуска двигательной нагрузки, а после отключения нагрузки происходит индивидуальный выбег двигателей.

Третий способ является упрощенным способом коммутации нагрузки в динамике. Частичная коммутация нагрузки в узле реализуется путем изменения мощности нагрузки. Для коммутации нагрузки необходимо задать долю активной мощности коммутируемой нагрузки по отношению к значению активной мощности нагрузки, заданной в параметрах узла, без учета регулирующего эффекта нагрузки по напряжению и частоте. Если за один раз отключить/включить 100% нагрузки, то третий способ эквивалентен второму. В исходном режиме возможно только полное отключение нагрузки в узле, частичная коммутация не предусматривается, так как частичное отключение нагрузки узла эквивалентно изменению мощности нагрузки.

Третий способ можно использовать, если переходный процесс в узле не представляет интереса, например, в расчетах АЧР. При отключении части нагрузки узла уменьшается мощность нагрузки и далее рассматривается только неотключенная нагрузка, поведение отключенной нагрузки не воспроизводится. При включении части нагрузки увеличивается мощность нагрузки узла, причем переходный процесс разгона двигателей не воспроизводится. Если в составе нагрузки есть двигатели, то увеличение мощности двигательной нагрузки означает, что двигатели уже разогнались и вышли на рабочий режим. Поэтому частичное включение нагрузки допустимо использовать, если в нагрузке узла нет двигателей или если заведомо известно, что можно пренебречь влиянием переходного процесса в узле нагрузки на общее движение энергосистемы.

Если комплексная нагрузка содержит статическую, асинхронную и синхронную составляющие, то доля коммутируемой нагрузки распределяется между составляющими пропорционально их доле в исходной нагрузке узла. Реактивная мощность статической нагрузки изменяется пропорционально активной мощности, текущая реактивная мощность асинхронного двигателя определяется параметрами двигателя, скольжением и напряжением в узле, текущая реактивная мощность синхронного двигателя определяется действием его АРВ.

При частичной коммутации комплексной нагрузки в узле изменение текущей активной мощности двигателей осуществляется за счет изменения номинальной мощности эквивалентного двигателя при сохранении исходного коэффициента загрузки двигателя. При этом уравнения эквивалентных двигателей, записанные в относительных единицах при номинальных условиях, не изменяются. Параметры эквивалентных двигателей, выраженные в именованных единицах (источников тока в расчете мгновенного электрического режима схемы на шаге или подшаге численного интегрирования и параметры режима двигателей), пересчитываются в зависимости от текущей номинальной мощности двигателей.

Нижний предел мощности нагрузки в узле при частичной коммутации контролируется, изменение активной мощности нагрузки при ее отключении может происходить до нуля. Если на отключение нагрузки в одном узле воздействуют различные автоматы, их воздействия суммируются. Если в результате последовательных отключений значение активной мощности нагрузки станет равным нулю, это означает, что вся нагрузка (100 %) в узле отключена.

Изменение мощности нагрузки при ее включении может достигнуть значения, заданного в данных узла и превысить его (мощность добавляемой нагрузки всегда вычисляется по отношению к значению исходной мощности нагрузки, заданному в параметрах узла). Верхний предел мощности нагрузки не контролируется и не ограничивается, что позволяет организовать динамическое утяжеление режима. При этом контроль допустимого значения нагрузки при ее увеличении возлагается на расчетчика. При включении части комплексной нагрузки узла процесс пуска двигателей не воспроизводится. Увеличение номинальной мощности эквивалентного асинхронного или синхронного двигателя означает, что процесс пуска двигателя уже завершился. Поэтому для адекватного моделирования процессов пуска необходимо использовать первый способ коммутации комплексной нагрузки.

Для частичной коммутации нагрузки в узлах в ходе расчета переходного процесса можно задать программу изменения мощности на-

грузки в функции времени. Нагрузка изменяется не дискретно, а непрерывно на каждом шаге интегрирования. Такая возможность позволяет, например, анализировать режимы методом динамического утяжеления.

Покомпонентная коммутация статической, асинхронной и синхронной составляющих комплексной нагрузки узла, то есть изменение мощности отдельно статической, асинхронной и синхронной составляющих, не предусматривается. Для статики такая возможность избыточна, так как в расчетах установившихся режимов можно изменять как состав нагрузки узла, так и ее мощность. При возникновении необходимости в покомпонентном управлении комплексной нагрузкой в динамике его можно реализовать имеющимися, рассмотренными выше средствами управления. Узел с комплексной нагрузкой следует разбить на два узла или более. Новые узлы подключаются к старому узлу индивидуальными ветвями (выключатель и/или линия питания), и нагрузка распределяется между старым и новыми узлами. При этом появляется возможность коммутации узлов со статической и двигательной нагрузкой вследствие коммутации ветвей, а также возможность полного и частичного отключения (изменения мощности) статической и двигательной нагрузки в узлах.

### § 8.6. Практическая реализация автомата

Автоматика является набором связанных сигналами автоматов, обрабатывающих информационный поток от объектов энергосистемы и воздействующих на режим и состояние объектов энергосистемы. Для формирования автоматов, сохранения их в базе данных, чтения из базы и для других операций над автоматами предусматривается специальный пользовательский интерфейс.

Для иллюстрации свойств предложенной модели РЗА рассмотрим примеры автоматов для задачи расчета динамической устойчивости электростанции в схеме на рис. 9.3 (см. § 9.4). Выключатели линий 220 кВ связи станции с системой оборудованы устройствами автоматического повторного включения (АПВ). После возникновения к.з. и двустороннего отключения линии повторное включение выключателей 22-221 и 22-222 в узле примыкания к системе 22 происходит при отсутствии напряжения на линии, то есть после бестоковой паузы осуществляется подача напряжения на линию. Повторное включение выключателей 21-211 и 21-212 в узле 21 производится с улавливанием

синхронизма, если подача напряжения на линию оказывается успешной.

Для расчетов динамической устойчивости электростанции при возникновении к.з. на линиях необходимо создать автоматы включения и отключения шунта к.з. на линии, самой линии и автоматы, моделирующие АПВ с контролем отсутствия напряжения на линии (АПВН) и АПВ с улавливанием синхронизма (АПВУС).

Практическая реализация автомата в программе, отображающая его структуру, рис. 8.2, может быть различной. Например, автомат можно представить тремя таблицами:

- таблицей факторов, которые получают информацию от объектов энергосистемы и сигналы как собственные, так и от других автоматов;
- таблицей АЛУ, в выражениях которого используются значения факторов;
- таблицей действий, связанной с условиями срабатывания АЛУ, которые посылают сигналы автоматам и осуществляют управляющие воздействия на объекты энергосистемы.

На рис. 8.3 показан автомат коммутации шунта к.з. на линии 211-221 и ее выключателей.

### Факторы

ID	Имя	Параметры	Объекты	Значение
t	время	нет	нет	0.00
I	ток ветви	конец ветви	211-221	630,58
aclr	ускорение	готов	нет	0

### АЛУ

ID	Выражение	dt	Значение
kz	$t \geq 1.0$	0.00	0
otkz	$I > 1000$	0.18	0
otL	$aclr \ \&\& \ I > 1000$	0.05	0

### Действия

ID	Имя	Параметры	Объекты	Статус
kz	к.з.	$K(3), L=0.05$	211-221	готов
otkz	отк. выключ...	н-отк., к-отк.	22-221, 21-211	готов
otkz	отк. к.з.	нет	211-221	готов
otkz	сигнал рассо...	импульс 0, готов	$apv11 > kuv$	готов
otkz	сигнал рассо...	импульс 0, готов	$apv12 > kuv$	готов
otL	отк. линии	н-отк., к-отк.	22-221	готов
otL	сигнал рассо...	импульс 0, готов	$apv12 > kuv$	готов

Рис. 8.3. Автомат коммутации шунта короткого замыкания в начале линии 211-221 (см. рис. 9.3)

Связь факторов, выражений АЛУ и действий осуществляется при помощи идентификаторов (ID), причем идентификаторы факторов-сигналов доступны действиям-сигналам не только данного, но и других автоматов. Помимо ID в таблицах отображаются имена, параметры и объекты факторов и действий, текущие значения факторов и статус действий. Имена факторов и действий раскрывают их смысл и облегчают анализ алгоритма работы автомата.

Алгоритм работы записан в виде выражений АЛУ. В выражениях АЛУ можно использовать ID факторов, а также выражений, расположенных выше в таблице АЛУ, числа, предопределенные символы констант, зарезервированные символы операций и имена математических функций. Лексемы разделяются пробелами. Условия срабатывания, если становятся истинными, вызывают выполнение действий с тем же идентификатором ID.

Действия могут быть выполнены немедленно или через заданную выдержку времени  $dt$ , которая отсчитывается, как только и пока выражение АЛУ является истинным. Если в процессе отсчета выражение АЛУ становится ложным, выдержка сбрасывается в ноль. Отсчитываемая выдержка времени действием-сигналом может быть передана фактору-сигналу, идентификатор ID которого используется в выражениях АЛУ.

Управляющие воздействия выполняются однократно, после чего получают статус «выполнено». Если управляющее воздействие является программой, например, импульсная разгрузка турбины, то действие автомата запускает эту программу, которая затем выполняется самостоятельно. Сигналы выполняются постоянно (на каждом шаге интегрирования), пока истинно условие срабатывания, за исключением импульсного сигнала, который выполняется один раз.

В автомате, показанном на рис. 8.3, используется три фактора. Включение шунта к.з. происходит по времени (идентификатор  $ID = t$ ), которое отсчитывается от начала расчета переходного процесса. Ток линии 211-221 с идентификатором  $ID = I$  используется для выявления к.з. на линии. Причем ток измеряется в конце линии (у узла 221), поскольку ток в начале линии при отключенном выключателе 21-211 после подачи напряжения со стороны системы на линию с неустранившимся к.з. близок к нулю. В исходном установившемся режиме ток линии равен 630,58 А. При любом виде к.з., при одностороннем отключении линии и при включенной или отключенной параллельной линии ток к.з. превышает 1000 А. При качаниях в процессе синхрони-

зации ток не превышает 1000 А. Для выявления к.з. можно использовать и другие факторы, например, сопротивление или сочетание нескольких факторов. Если фактор выявления к.з. не имеет значения, можно использовать сигнал.

Фактор-сигнал **aclr** является сигналом ускорения отключения выключателя 22-221 после неуспешного АПВ, если на линии возникло устойчивое короткое замыкание. Время повторного отключения к.з. определяется полным временем отключения выключателя с приводом в цикле «отключение – бестоковая пауза – включение-отключение» и в примере равно 0,05 с (время включения выключателя учитывается в бестоковой паузе, отсчитываемой в автомате АПВ).

АЛУ имеет три логических выражения с идентификаторами **kz**, **otkz** и **otL**, которые являются условиями срабатывания и вызывают активацию действий с такими же идентификаторами. Если рассчитывается переходный процесс при успешном АПВ, то шунт к.з. на линии отключается действием **otkz** одновременно с линией (погасание дуги и деионизация). Если моделируется неуспешное АПВ, то действие **otkz** по отключению шунта к.з. на линии при ее отключении выводится из работы (деактивируется). Тогда при включении выключателя 22-221 происходит подача напряжения на линию с неустранившимся к.з., и по сигналу ускорения после АПВ действием **otL** происходит повторное отключение выключателя 22-221.

Через одну секунду после запуска расчета переходного процесса при  $t \geq 1,0$  с действие  $ID = kz$  включает шунт трехфазного к.з. в начале линии 211-221 (на расстоянии  $L = 0,05$  о.е. от узла 211), после чего получает статус «выполнено». Целесообразно возмущение устраивать через несколько секунд от момента начала расчета, чтобы убедиться, что исходный установившийся режим без возмущений при интегрировании системы дифференциальных уравнений не изменяется, что является косвенным свидетельством отсутствия грубых ошибок.

Время отключения к.з. на линии (складывается из времени работы релейной защиты и полного времени отключения выключателя с приводом) равно 0,18 с. Выдержка времени  $dt = 0,18$  с отсчитывается, как только и пока ток линии  $I > 1000$  А. Через 0,18 с выполняются все действия с идентификатором  $ID = otkz$ . Отключаются выключатели 22-221 и 21-211, ветви выключателей отключаются в начале и в конце (параметры n-отк. и k-отк.), а также отключается шунт к.з. на линии. Автоматам АПВ с именами **apv11** и **apv12**, воздействующих на выключатели 21-211 и 22-221 первой линии, посылаются сигналы о согласовании положения ключа управления и положения выключателя (факторы-сигналы этих автоматов с  $ID = kuv$  получают значение ноль

и состояние «готов»). Используется импульсный сигнал (выполняется один раз), чтобы исключить повторный запуск автоматов АПВ от несоответствия положения выключателя и ключа управления, если в переходном процессе ток линии превысит 1000 А.

Автомат с именем **apv11**, моделирующий АПВ на выключателе 21-211, представлен на рис. 8.4. Автомат моделирует алгоритмы работы АПВН и АПВУС, описанные в [52, 53].

### Факторы

ID	Имя	Параметры	Объекты	Значение
<b>kuv</b>	полож. КУ и В	готов	нет	1
<b>UL</b>	напряжение	нет	211	227.92
<b>Us</b>	напряжение на В	нет	21-211	0
<b>crv</b>	управление РВ	готов	нет	0
<b>tv</b>	время АПВ	нет	нет	0
<b>N</b>	накладка	блокирован	нет	0

### АЛУ

ID	Выражение	dt	Значение
<b>tapv</b>	1.00	0.00	1.00
<b>Usrab</b>	$2*220 * \sin(40 / (180/\pi) / 2)$	0.00	150.49
<b>Uvzv</b>	$2*220 * \sin((0.85*40 / (180/\pi)) / 2)$	0.00	128.64
<b>srab</b>	!kuv && !N && Us >= Usrab	0.00	0
<b>vzv</b>	!kuv && !N && Us <= Uvzv	0.00	0
<b>ps</b>	!kuv && (UL > 0.0) && crv	0.00	0
<b>pu</b>	!kuv && N && (UL < 1.0)	0.00	0
<b>ts</b>	ps    pu	5.00	0
<b>onv</b>	tv >= tapv	0.1	0

### Действия

ID	Имя	Параметры	Объекты	Статус
<b>srab</b>	сброс РВ	уст.0, готов	apv11>crv	готов
<b>vzv</b>	пуск РВ	уст.1, готов	apv11>crv	готов
<b>ts</b>	время действия АПВ	отсчет t, готов	apv11>tv	готов
<b>onv</b>	вкл. ветви	н-вкл., к-вкл.	21-211	готов
<b>onv</b>	сигнал КУ и В	уст.1, готов	apvos>kuv	готов

Рис. 8.4. Автомат АПВ

Фактор-сигнал с идентификатором **kuv** при совпадении положения выключателя и ключа управления равен 1, при рассогласовании получает значение 0 от автомата на рис. 8.3. Фактор **UL** получает напряжение в узле 211 на конце линии, в исходном режиме оно равно 227,92 кВ. Фактор **Us** получает напряжение на ветви выключателя (см. табл. 8.1). Фактор-сигнал **crv** используется для управления реле

времени, фактор-сигнал **tv** получает отсчет от реле времени. Фактор-сигнал **N** имитирует накладку, изменяющую алгоритм работы АПВ. Значение фактора **N** заблокировано от изменения сигналами, его значение можно изменять «вручную» при настройке автомата. Если установлено значение **N = 0**, автомат моделирует АПВУС с контролем синхронизма и допустимой разности частот, если установлено **N = 1**, то моделируется АПВН с контролем отсутствия напряжения на линии.

Первое выражение АЛУ с идентификатором **ID = tapv** задает время действия устройства АПВ (время с момента пуска устройства АПВ до момента подачи импульса на включение). Если угол срабатывания реле контроля синхронизма (РКС) равен  $40^\circ$ , то при коэффициенте возврата  $0,85$  угол возврата РКС составит  $0,85 \cdot 40 = 34^\circ$ , тогда при **tapv = 1** с разность частот при включении составит  $0,2$  Гц, а при **tapv = 2** с разность частот равна  $0,1$  Гц [53]. Если контроль разности частот не требуется, нужно задать значение **tapv** равным собственному времени включения выключателя, которое определяет задержку на включение.

При установке накладки (задано значение **N = 1**) смысл выражения **tapv** изменяется. Теперь **tapv** является выдержкой времени, определяющей длительность бестоковой паузы перед подачей напряжения на линию ( $0,15 \div 0,4$  с для линий различных классов напряжения [52]).

Второе выражение АЛУ вычисляет напряжение срабатывания РКС **Usrab** при угле срабатывания  $40^\circ$ , третье выражение АЛУ вычисляет напряжение возврата РКС **Uvzv** при угле возврата  $34^\circ$ . Идентификаторы **Usrab** и **Uvzv** используются в последующих выражениях. Очевидно, АЛУ после вычисления выражений **Usrab** и **Uvzv** можно упростить. Для этого в последующих выражениях вместо **ID = Usrab** и **ID = Uvzv** используются непосредственно вычисленные значения, а второе и третье выражения АЛУ удаляются.

Выражения АЛУ с идентификаторами **srab** и **vzv** управляют запуском и остановом реле времени при возврате и срабатывании РКС, действия-сигналы с теми же идентификаторами изменяют значение фактора-сигнала **crv**. Выражение АЛУ с **ID = ps** определяет условие отсчета времени действия АПВ, если автомат настроен для АПВУС (**N = 0**). Выражение с идентификатором **pu** определяет условие отсчета выдержки времени для АПВН (**N = 1**, **tapv = 0,3** с для линий 220 кВ). Выражение с **ID = ts** является реле времени с максимальным отсчетом **dt = 5** с. Как только и пока **ts = 1**, реле отсчитывает время. Значение отсчитываемого времени действием-сигналом **ts** передается фактору-сигналу **tv**. Если отсчитываемое время сравняется со значением **tapv**, выдается команда на включение выключателя линии, выдержка вре-

мени при включении равна собственному времени включения выключателя,  $dt = 0,1$  с. Действие с  $ID = onv$  включает выключатель, а сигнал  $onv$  устанавливает фактор-сигнал  $kuv$  в 1, снимая рассогласование положения ключа управления и выключателя.

Автоматы АПВ на остальных выключателях можно создать копированием рассмотренного автомата с последующей корректировкой привязки факторов и действий к соответствующим объектам. В отличие от автомата  $apv11$  в список действий автомата  $apv12$ , действующего на выключатель 22-221, добавляется сигнал  $onv$ , который устанавливает значение фактора  $aclr$  автомата на рис. 8.3 равным 1 и блокирует его, для ускорения после АПВ.

Автоматы можно хранить вместе с электрической схемой и/или в отдельной базе данных, что позволит использовать созданные автоматы в других схемах. При наличии базы данных типовых автоматов с отлаженными АЛУ и описанием использования создание автоматики упрощается и ускоряется. После чтения автоматов из базы данных потребуется только привязка факторов и действий к объектам схемы и к другим автоматам.