



PS2 – S4-04



Устройство автоматического ограничения перегрузки линий

Н.А. СЕЛЕЗНЕВА¹, П.В. ИЛЮШИН², А.И. БАРБЕТОВ³
ОАО «Институт «ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ»¹, ОАО «Холдинг МРСК»²,
ОАО «Энера Инжиниринг», ГК Оптима³
Россия
selezneva_n@oaoesp.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Противоаварийная автоматика; воздушные, кабельные и кабельно-воздушные линии; токовая и термическая перегрузка; устройство автоматического ограничения перегрузки линии; унифицированный алгоритм; управляющие воздействия.

1 ВВЕДЕНИЕ

Возникновение перегрузок линий электропередач является актуальной проблемой для распределительных сетей 110 кВ Московской энергосистемы. При этом опасности подвержены как воздушные (ВЛ), так и кабельные (КЛ) и кабельно-воздушные (КВЛ) линии.

Опасность термической перегрузки главным образом заключается в следующем:

- для ВЛ – в увеличении длины провода при нагревании → увеличении стрелы провеса → возможности перекрытия и последующего КЗ → отключении линии,
- для КЛ – в ускорении старения изоляции → возможности пробоя и возникновения КЗ → отключении линии,
- для КВЛ – комбинация указанных факторов: в летнее время большей опасности подвержен воздушный участок, в зимнее – кабельный (как правило).

Если отключить при этом перегруженную линию, её нагрузка ляжет на другие связи, что может привести к возникновению перегрузок на них и их последующему отключению, а далее и к каскадному развитию аварии. Поэтому отключение перегруженной линии должно считаться крайней мерой. Предпочтение должно отдаваться противоаварийным мероприятиям по её разгрузке.

В связи с этим в конце 2007 г. Московская объединённая электросетевая компания (МОЭСК) заключила договор с Институтом «ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ» на разработку автоматики ограничения перегрузки линий (далее – АОПЛ) и выполнения проектов для шести сетевых районов, в которых в ходе эксплуатации наблюдались перегрузки линий. В составе проектов были определены принципы работы автоматики и разработаны общие функциональные и структурные схемы АОПЛ. В 2009 г. на базе данных проектов компания «Энера Инжиниринг» приступила к выполнению рабочих чертежей для реализации выбранной логики на конечном устройстве. Полученный в ходе работы опыт был обобщён.

В отличие от ранее используемых устройств, определяющих перегрузку линии только по её току, устройство АОПЛ, предложенное Институтом «ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ», позволяет определить термическую перегрузку линии, то есть её перегрев. Противоаварийное управление осуществляется в зависимости от степени перегрева, что является более совершенным решением в принципе, а также позволяет уточнить и в конечном счёте уменьшить объём реализации управляющих воздействий от автоматики.

2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для определения термической перегрузки линии необходимо определить текущую температуру провода/кабеля и сравнить её с длительно допустимым значением: 70°C для ВЛ, 85°C для КЛ (аварийно допустимые значения равны соответственно 90 и 100°C). Указанные значения в различных источниках варьируются, и потому даны в качестве рекомендуемых. Определение температуры выполняется на основании теплового баланса проводника [1].

Для практического определения термической перегрузки линии в устройстве АОПЛ линия моделируется инерционным звеном первого порядка, характеризуемым постоянной времени нагрева. Это позволяет учесть постепенность изменения температуры и рассматривать динамику её изменения. В качестве параметров, которые определяют нагрев провода, используются две величины, измерение которых на практике осуществляется достаточно легко:

- 1) ток линии на наиболее загруженном участке,
- 2) температура окружающего воздуха.

Для защиты выбирается потенциально опасный участок ВЛ – с наибольшей нагрузкой.

В большинстве случаев таким участком будет являться:

- a) для линии с отпайкой – головной участок (до отпайки с питающей стороны),
- b) для линии, выполненной проводами разного сечения/ кабелями разной марки – участок с наименьшей пропускной способностью,
- c) для линии с реверсивным перетоком мощности – начало и конец линии, если по результатам расчётов (или на практике) токовая перегрузка выявлялась при обоих направлениях мощности,
- d) для кабельно-воздушной линии – наиболее загруженный воздушный и наиболее загруженный кабельный участки,
- e) для двухцепной линии – наиболее загруженные участки каждой цепи.

Как показывает практика, перегрузка может возникать на двух линиях, последовательно составляющих один транзит с промежуточными отборами мощности. В зависимости от аварийной ситуации перегружаться будут разные участки такого транзита. Подобные линии целесообразно рассматривать вместе, поскольку они могут быть защищены одним устройством (данное решение также оказывается наиболее экономичным). Это явилось предпосылкой к тому, что при разработке унифицированной конфигурации устройства АОПЛ приоритет получил алгоритм, обеспечивающий одновременное определение перегрузки двух участков с учётом реверса мощности по ним.

В качестве уставки для моделирования линии в устройстве АОПЛ используется постоянная времени нагрева проводника, которая определяется следующим образом.

Постоянная времени нагрева T , с, представляющая собой отношение теплоёмкости проводника к теплоотдаче, для провода (воздушный участок) рассчитывается по формуле [1]:

$$T = \frac{mc}{\alpha_k + \alpha_{\text{л}}} \quad (\text{с}), \quad [1]$$

где m – масса одного метра провода, кг/м;

c – удельная теплоёмкость провода, (Вт·с)/(кг·°C);

α_k – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м·°C);

$\alpha_{\text{л}}$ – коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием, Вт/(м·°C).

Для определения теплоёмкости провода необходимо знать его каталожные данные; для расчёта коэффициента теплоотдачи конвекцией необходимо задаться скоростью ветра и учесть температуру воздуха; для расчёта коэффициента теплоотдачи лучеиспусканием также следует учесть температуру воздуха, плюс состояние поверхности провода (блестящий/ грязный) [1].

Для кабеля (кабельный участок) постоянная времени нагрева рассчитывается в зависимости от того, как проложен кабель: в земле или воздухе (тоннеле, лотках и т.д.). Сопротивление теплоотдаче кабеля оказывают:

- 1) изоляция кабеля,
- 2) защитные покровы,
- 3) оболочка кабеля,

4) почва, окружающая кабель.

В соответствии с этим постоянная времени нагрева кабеля, проложенного в воздухе, рассчитывается по формуле [2]:

$$T = (S_1 + S_3) \cdot [c_{ж} + 0,5(c_{из} + c_{св})] \quad (ч), \quad [2]$$

где S_1 – тепловое сопротивление изоляции кабеля, $(^{\circ}\text{C} \cdot \text{см})/\text{Вт}$;

S_3 – тепловое сопротивление оболочки кабеля, $(^{\circ}\text{C} \cdot \text{см})/\text{Вт}$;

$c_{ж}$ – удельная теплоёмкость жилы кабеля, $(\text{Вт} \cdot \text{ч})/(\text{см}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$;

$c_{из}$ – удельная теплоёмкость изоляции жил, $(\text{Вт} \cdot \text{ч})/(\text{см}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$;

$c_{св}$ – удельная теплоёмкость свинца, $(\text{Вт} \cdot \text{ч})/(\text{см}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Постоянная времени нагрева кабеля, проложенного в земле, определяется как [3]:

$$T = (S_1 + S_2 + S_4) \cdot [c_{ж} + 0,5(c_{из} + c_{св} + c_{пок})] \quad (ч), \quad [3]$$

где S_2 – тепловое сопротивление защитных покровов подземных кабелей, $(^{\circ}\text{C} \cdot \text{см})/\text{Вт}$;

S_4 – тепловое сопротивление почвы, окружающей кабель, $(^{\circ}\text{C} \cdot \text{см})/\text{Вт}$;

$c_{пок}$ – удельная теплоёмкость защитных покровов, $(\text{Вт} \cdot \text{ч})/(\text{см}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Удельные теплоёмкости материалов являются справочными данными; тепловые сопротивления определяются условиями прокладки кабеля и определяются расчётным путём [3].

Кроме температуры проводника, устройство АОПЛ определяет значение тока, длительно допустимого для линии при текущих погодных условиях. Длительно допустимый ток I_d – такое значение тока, при протекании которого установившаяся температура проводника равна длительно допустимой. Расчёт производится по формуле (для ВЛ) [4]:

$$I_d = \sqrt{\frac{(\alpha_k + \alpha_{\text{л}}) \cdot (\theta_d - \theta_{\text{в}}) - P_p}{R_{\text{п}}}} \quad (\text{А}), \quad [4]$$

где θ_d – длительно допустимая температура провода, $^{\circ}\text{C}$;

$\theta_{\text{в}}$ – температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$;

P_p – мощность солнечной радиации, $\text{Вт}/\text{м}$,

$R_{\text{п}}$ – сопротивление одного метра провода при длительно допустимой температуре, $\text{Ом}/\text{м}$.

Эта формула получается из теплового баланса провода в установившемся режиме.

После того как постоянная времени нагрева будет рассчитана, можно определить текущую температуру проводника по выражению [5]:

$$\theta_{\text{п}} = \theta_{\text{нач}} + (\theta_{\text{уст}} - \theta_{\text{нач}}) \cdot (1 - e^{-t/T}) \quad (^{\circ}\text{C}), \quad [5]$$

где $\theta_{\text{нач}}$ – начальная температура провода, $^{\circ}\text{C}$;

$\theta_{\text{уст}}$ – установившаяся температура провода, $^{\circ}\text{C}$;

t – время, прошедшее с начала переходного процесса (или с начала небольшого интервала времени, принятого в устройстве за расчётный), с.

Установившаяся температура провода определяется расчётом по величине протекающего тока с учётом погодных условий и условий нагрева и охлаждения провода. За начальную температуру можно принять усреднённое значение установившейся температуры за предшествующий период.

Путём сравнения рассчитанной текущей температуры проводника с длительно допустимым значением θ_d устройство АОПЛ выявляет возникновение перегрузки линии:

$$\theta_{\text{п}} \geq \theta_d. \quad [6]$$

По данному условию устройство АОПЛ срабатывает на сигнал. Параллельно диспетчеру передаётся ориентировочное время, оставшееся до начала срабатывания первой ступени устройства, если ток линии не снизится.

В качестве уставки срабатывания устройства АОПЛ предлагается также использовать значение длительно допустимого тока, рассчитанное по вышеприведённой формуле и постоянно обновляемое в цикле расчёта устройства. Путём сравнения текущего тока линии с данным значением формируется сигнал перегрузки, который должен быть передан персоналу подстанции или диспетчеру:

$$I \geq I_d, \quad [7]$$

где I – ток контролируемого участка, А.

Таким образом, возникновение перегрузки линии фиксируется и сигнализируется как по её температуре, так и по её току. Однако выбор УВ в зависимости от степени токовой перегрузки не производится, так как увеличение тока сверх допустимого не всегда сопровождается перегревом проводника.

При дальнейшем увеличении температуры проводника устройство начинает ступенчато осуществлять управляющие воздействия (УВ):

$$\theta_n \geq K_i \theta_d. \quad [8]$$

Здесь K_i – множитель для данной ступени фиксации перегрузки. Как правило, устройство АОПЛ имеет две ступени. О выборе и реализации УВ будет подробно сказано позднее.

Устройство АОПЛ не рассчитывает необходимое УВ, а реализует управление, выбранное заранее. Устройство АОПЛ не дозирует УВ до их осуществления, оно действует итерационно. Достаточность разгрузки определяется по току линии:

$$I \leq 0,95 I_d. \quad [9]$$

Температура провода не может служить критерием ликвидации перегрузки, так как это инерционный параметр. Считается, что после ограничения тока линии до допустимого (с небольшим запасом) опасность аварии в принципе будет ликвидирована.

Поскольку длительность отключения потребителей должна быть минимальной, в устройстве АОПЛ предусмотрено поочерёдное обратное включение нагрузки. Оно осуществляется автоматически, по условию остывания проводника, но после получения разрешения диспетчера. При этом непрерывно контролируется ток линии, чтобы включение слишком большого (для послеаварийного режима) объёма нагрузки не привело к возникновению новой перегрузки.

В качестве управляющих воздействий по разгрузке линии могут быть использованы различные мероприятия. Принципиально все они могут быть сведены в следующие три группы.

1) Ограничение мощности, поступающей в транзит с питающей стороны:

- одностороннее отключение (авто)трансформатора, питающего систему шин, на которой скоммутирована защищаемая линия,
- ограничение генерации электростанций – отключение генераторов гидроэлектростанций, ограничение мощности генераторов тепловых электростанций через механизм управления турбиной, отключение газотурбинных установок в составе парогазовых установок.

2) Увеличение подпитки, поступающей в транзит с нагрузочной стороны, за счёт дополнительных резервов:

- загрузка электростанций – пуск генераторов, находящихся в «горячем» резерве или вывод их из режима синхронных компенсаторов на гидроэлектростанциях, увеличение мощности работающих генераторов тепловых электростанций, включение газотурбинных установок в составе парогазовых установок, пуск мобильных газотурбинных электростанций в дефицитном районе, временное ограничение теплофикационных отборов пара для увеличения электрической мощности на теплоэлектроцентралях,
- включение шиносоединительного выключателя для обеспечения питания транзита от двух (вместо одного) трансформаторов.

3) Ограничение мощности, потребляемой на нагрузочной стороне транзита:

- включение источников реактивной мощности с целью компенсации и подъёма напряжения,
- отключение фидеров нагрузки,
- одностороннее отключение одной из линий, отходящих от шин подстанции на нагрузочной стороне.

Понятия «нагрузочная» и «питающая» стороны введены условно, поскольку любой участок сети 110-220 кВ Московской энергосистемы имеет двустороннее питание. Другая особенность – практически повсеместное секционирование сети.

Для автоматического выбора необходимого УВ в устройстве АОПЛ потребовался бы слишком большой объём информации, включая топологию прилегающей сети, и слишком

сложная логика. В связи с этим выбор УВ осуществляется заранее при проектировании и расчётах.

Работу устройства АОПЛ целесообразно рассмотреть на отдельном примере. Для этого потребуется поясняющая схема, приведённая на рисунке 1.

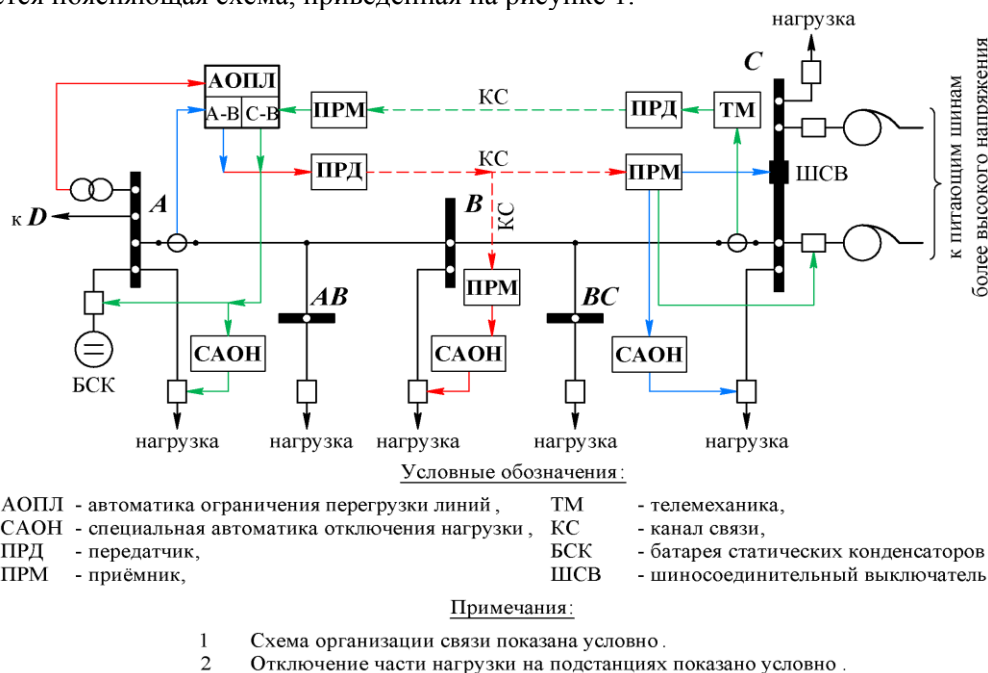


Рис. 1: Пример организации системы АОПЛ на участке сети

Защищаемый транзит состоит из двух линий: А-В и В-С, с промежуточными отборами мощности, и имеет двустороннее питание. В разных послеаварийных режимах имеет место реверс перетоков мощности.

При направлении мощности А→В→С перегружаются обе линии, но у шин подстанции А наиболее сильно (головной участок). Значит, ток необходимо контролировать в этом месте. В качестве противоаварийного управления предлагается:

- первая ступень – включение шинносоединительного выключателя на подстанции С (увеличение подпитки с нагрузочной стороны),
- вторая ступень – отключение нагрузки на подстанциях С, В (уменьшение потребления на нагрузочной стороне).

На рисунке 1 цепи, относящиеся к АОПЛ линии А-В, показаны синим цветом.

При направлении мощности С→В→А также перегружаются обе линии, но у шин подстанции С наиболее сильно, и ток контролируется в этом месте. Для ликвидации перегрузки предлагается:

- первая ступень – одностороннее отключение питающего автотрансформатора на подстанции С (ограничение мощности, поступающей с питающей стороны), а также включение БСК на подстанции А (уменьшение потребления на нагрузочной стороне),
- вторая ступень – отключение нагрузки на подстанциях А, В (уменьшение потребления на нагрузочной стороне).

Цепи, относящиеся к АОПЛ линии С-В, показаны на рисунке 1 зелёным цветом. Красным показаны цепи, являющиеся общими (относящиеся к линиям А-В и С-В сразу).

Отключение нагрузки на промежуточных подстанциях (АВ, ВС) также позволяет снизить перегрузку линии, однако для этого требуется организация новых каналов связи, которые являются наиболее дорогостоящим элементом системы противоаварийного управления. Следует стремиться к тому, чтобы эта система охватывала минимум объектов – в частности, за счёт выбора управляющих воздействий, общих для нескольких случаев (например, отключение нагрузки на подстанции В). Само устройство АОПЛ целесообразно устанавливать на той подстанции, где контролируется ток (что позволит сэкономить на устройствах телемеханики) и реализуются управляющие воздействия (что позволит сэкономить на каналах связи).

В соответствии с изложенным, можно изобразить упрощённую схему работы устройства АОПЛ подстанции А. Изображённая конфигурация может считаться универсальной, поскольку она предусматривает защиту двух участков в одном устройстве, с учётом реверса мощности по транзиту и разным противоаварийным управлением для разных аварийных ситуаций. Данная схема приведена на рисунке 2; применяется аналогичная расцветка.

Предложенные в схеме решения относятся в полной мере к реализации АОПЛ для ВЛ. При определении перегрузки КЛ и КВЛ следует учесть некоторые особенности.

Перегрев кабельных линий практически не зависит от температуры окружающего воздуха, поскольку кабель прокладывается в земле, коллекторе, тоннеле и т.п. Соответственно, измерение температуры воздуха и сам датчик не требуется, а в качестве уставки АОПЛ используется фиксированное (а не «текущее») значение длительно допустимого тока. Эта величина определяется заводом-производителем и даётся с учётом условий прокладки кабеля, либо определяется по справочным данным.

В кабельно-воздушных линиях кабельная вставка, как правило, может ограничивать пропускную способность всей линии в зимний период, когда за счёт низкой температуры воздуха воздушный участок охлаждается лучше. В течение летнего периода, наоборот, воздушный участок перегружается раньше кабельного. Нагрузка потребителей в летнем режиме меньше, но летом производятся ремонты линий и другого сетевого оборудования. В ремонтных схемах перетоки ложатся на шунтирующие связи, и загрузка работающих линий может быть значительно больше, чем зимой. Следовательно, возникновение перегрузки возможно и зимой, и летом, поэтому в любое время года необходимо защищать оба участка КВЛ.

Предложенная конфигурация устройства АОПЛ позволяет учесть указанные особенности и пригодна для защиты КЛ и КВЛ.

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Устройство АОПЛ, разработанное Институтом «ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ», позволяет достаточно точно определить термическую перегрузку линий, не требуя при этом сложной и дорогостоящей аппаратуры для его выполнения. Логика АОПЛ может быть реализована на базе практически любого микропроцессорного терминала. Расчёты, которые необходимо выполнить для выбора уставок АОПЛ, доступны большинству инженеров технического профиля. Измерение тока линии и температуры окружающего воздуха, необходимые для работы устройства, так же не представляют трудности. В связи с этим использование устройств АОПЛ может быть широко рекомендовано для защиты распределительной сети, т.е. линий 110 кВ.

Большие перспективы представляет использование устройств АОПЛ в сочетании с непосредственным измерением температуры провода/ кабеля. Для этого потребуются использовать высоковольтные датчики температуры, устанавливаемые на линии в контрольных точках, либо осуществляющие контроль температуры проводника по всей длине. Это приведёт к значительному удорожанию системы АОПЛ, однако позволит использовать пропускную способность линий полностью. Данное решение может быть рекомендовано для защиты линий 220 кВ, составляющих системообразующую сеть.

Проекты, выполненные Институтом по устройствам АОПЛ, согласованы МОЭСК и региональным диспетчерским управлением Москвы и Московской области. В настоящее время ОАО «Энера Инжиниринг» выполняет по ним рабочую документацию. Устройство АВР с функцией АОПЛ на ПС 220/110 кВ Красногорская уже смонтировано, налажено и введено в промышленную эксплуатацию, как и устройства АОПЛ на ПС Некрасовка и Вернадская. Устройство АВР на ПС Красногорская в 2009 году успешно и корректно отработало.

Использование устройств АОПЛ позволяет в автоматическом режиме ликвидировать термическую перегрузку защищаемой линии, её последующее отключение защитами и, возможно, каскадное развитие аварии. Однако в большинстве случаев для обеспечения ликвидации перегрузки линии помимо устройства АОПЛ требуется использование и других устройств ПА, организация связи со смежными объектами, обеспечение взаимодействия системы автоматики с диспетчером. Как показывают расчёты и практика, замена проводов и кабелей на новые с большей пропускной способностью и развитие электрической сети являются наилучшей мерой, позволяющей избежать возникновения перегрузок линий. Задача

повышения надёжности электроснабжения не должна всецело возлагаться на противоаварийную автоматику. Первоочередными мерами должны оставаться совершенствование и реконструкция самой электрической сети.

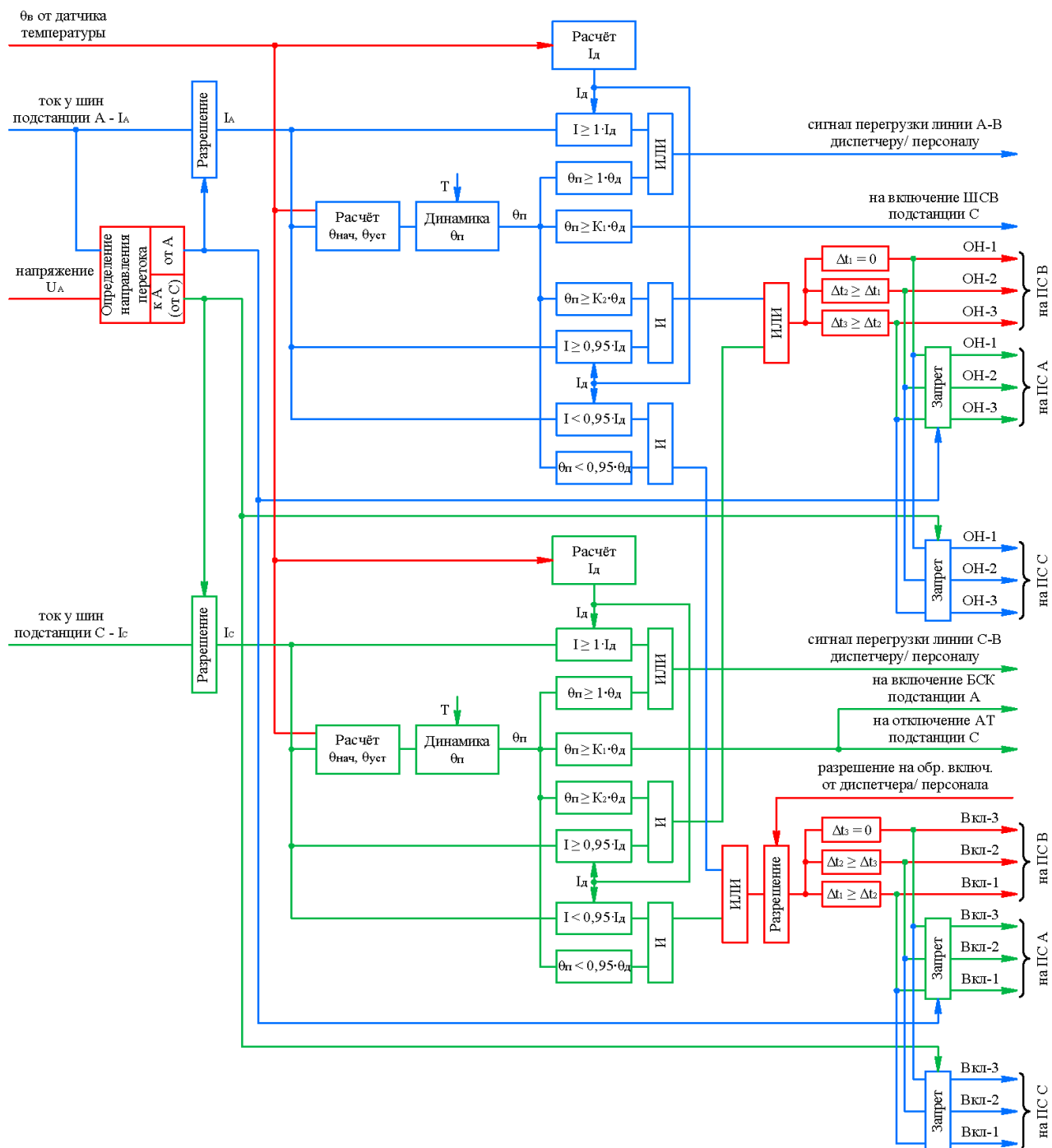


Рис. 2: Схема работы устройства АОПЛ

**Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем
Санкт-Петербург, 30 мая – 3 июня 2011 г.**

Далее в таблице 1 предлагается обзор решений по проектам, выполненным Институтом «ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ» для МОЭСК в 2008 г.

Проект для ПС	Устанавли- ваемые устройства	Защищаемые линии	Противоаварийное управление	
			1-я ступень	2-я ступень
ПС 500 кВ Очаково	АОПЛ1	ВЛ 110 кВ Одинцово – Очаково I	одностороннее отключение питающего АТ 220/110 кВ на ПС Очаково	
	АОПЛ2	ВЛ 110 кВ Одинцово – Очаково II		
ПС 110 кВ Вернадская	АОПЛ1	ВЛ 110 кВ Семёновская – Вернадская I	одностороннее отключение питающего АТ 220/110 кВ на ТЭЦ-20	ОН на ПС Вернадская
	АОПЛ2	ВЛ 110 кВ Семёновская – Вернадская II		
ПС 110 кВ Некрасовка	АОПЛ1	ВЛ 110 кВ Красково – Некрасовка с отп. I	одностороннее отключение отходящей ВЛ 110 кВ Минеральная – Некрасовка	ОН на ПС Некрасовка, Прогресс, Минеральная, Чистая, Кучино
	АОПЛ2	ВЛ 110 кВ Красково – Некрасовка с отп. II	одностороннее отключение отходящей ВЛ 110 кВ Прогресс – Некрасовка	
ПС 220 кВ Красно- горская	АВР (с функцией АОПЛ)	ВЛ 110 кВ Герцево – Павшино – Красногорская с отп.	включение ШСВ 110 кВ на ПС Красногорская	
ПС 110 кВ Черёмушки	АОПЛ1	КВЛ 110 кВ ТЭЦ-20 – Черёмушки – Южная с отп. I	одностороннее отключение питающего АТ 220/110 кВ на ТЭЦ-20	ОН на ПС Черёмушки, Зюзино, Нагорная
	АОПЛ2	КВЛ 110 кВ ТЭЦ-20 – Черёмушки – Южная с отп. II		
ПС 110 кВ Серпухов	АОПЛ1	ВЛ 110 кВ Ока – Серпухов I	включение БСК на ПС Пушино	ОН на ПС Серпухов, Пушино
	АОПЛ2	ВЛ 110 кВ Ока – Серпухов II		
ПС 110 кВ Клязьма	АОПЛ1	ВЛ 110 кВ Трубино –Клязьма с отп. I и II	включение БСК на ПС Клязьма, сигнал о подготовке включения МГТЭС на ПС Пушкино	ОН на ПС Пушкино, Тополь
	АОПЛ2	ВЛ 110 кВ Роса – Пушкино – Клязьма		ОН на ПС Клязьма, Пушкино, Тополь, Подлипки, Н. Подлипки
	АОПЛ3	ВЛ 110 кВ Н. Подлипки – Тополь – Подлипки – Клязьма с отп.		
Используемые аббревиатуры: АВР – автоматическое включение резерва АТ – автотрансформатор БСК – батарея статических конденсаторов ОН – отключение нагрузки ПС – подстанция ШСВ – шиносоединительный выключатель				

Табл. 1: Решения по АОПЛ для объектов МОЭСК

ЛИТЕРАТУРА

- [1] В.В. Бургсдорф, Л.Г. Никитина. Определение допустимых токов нагрузки воздушных линий электропередачи по нагреву их проводов. Электричество, 1989, № 11.
- [2] Т.Е. Петрова, Е.П. Фигурнов. Защита от перегрузки по току проводов воздушных линий электропередачи. Электричество, 1991, № 8.
- [3] «Электрические кабели, провода и шнуры». Д.С. Бачелис, Н.И. Белоруссов, А.Е. Саакаян, 1971 г. Раздел «Основы электрического расчёта кабелей и проводов».
- [4] Справочник по проектированию электрических сетей под редакцией Д.Л. Файбисовича – М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2005.
- [5] Е.Ф. Макаров. Справочник по электрическим сетям 0,4-35 кВ и 110-1150 кВ – М.: Папирус ПРО, 2003.
- [6] Ж. Эндреню, Н. Мартье. Определение максимально допустимых токов на провода с учетом действительных условий нагрузки, погоды и старения. СИГРЭ, 1968, доклад 23-04. – М.: Энергия, 1970.